РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы V Международной научной конференции

Красноярск, 11–14 сентября 2018 г.

Красноярск, 2018

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет
Институт космических и информационных технологий

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Проект организации V Международной научной конференции "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли"»

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы V Международной научной конференции

Красноярск, 11–14 сентября 2018 г.

Научный редактор
Е.А. Ваганов

Красноярск
СФУ
2018

УДК 528.8
ББК 40.6-01
Р326

Редакционная коллегия:
Е.А. Ваганов (науч. ред.), доктор биологических наук, профессор, академик РАН, научный руководитель СФУ; *Г.М. Цибульский* (отв. ред.), доктор технических наук, профессор, директор ИКИТ СФУ, заведующий кафедрой СИИ ИКИТ СФУ; *М.В. Носков*, доктор физико-математических наук, профессор; *В.Б. Кашкин*, доктор технических наук, профессор; *В.И. Харук*, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой Б-ГИС ИКИТ СФУ; *Ю.А. Маглинец*, кандидат технических наук, профессор, руководитель НУЛ «ИПКМ» ИКИТ СФУ

Р326 **Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли** : материалы V Междунар. науч. конф., Красноярск, 11–14 сентября 2018 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. – 444 с.

ISBN 978-5-7638-3978-4

Представлены современные и перспективные системы регионального дистанционного зондирования, рассмотрены модели и методы обработки данных дистанционного зондирования Земли, приведены результаты мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов и явлений. Обсуждена проблематика построения и развития региональных систем дистанционного зондирования Земли из космоса и показана их роль в решении социально-экономических задач регионов.

Предназначены для специалистов в области дистанционного зондирования Земли, ГИС-технологий, аспирантов, студентов, обучающихся по соответствующим профилям подготовки.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.

УДК 528.8
ББК 40.6-01

Электронный вариант издания
см.: http://catalog.sfu-kras.ru

ISBN 978-5-7638-3978-4

© Сибирский федеральный университет, 2018

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 528.8

О.П. Архипкин, Г.Н. Сагатдинова

Национальный центр космических исследований и технологий, Алматы, Казахстан
e-mail: oarkhipkin@rambler.ru

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ РАДАРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ЗЕМЛИ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ВОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Описаны методики формирования водных поверхностей по оптическим (Landsat-8 и Sentinel-2A) и радарным (Sentinel-1A и Sentinel-1B) космоснимкам среднего разрешения. По радарным данным для уменьшения зернистости формируется суммарная по двум поляризациям водная поверхность. Проведено сравнение водных поверхностей на реке Ишим в районе поселка Гастелло Акмолинской области, выделенных по оптическому снимку Sentinel-2 и по радарным данным Sentinel-1B за 1 мая 2017 г.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, паводки, зоны затопления, радарные данные, слияние данных.

Введение. Космическим мониторингом паводков и наводнений наша организация занимается с 2002 г. При прохождении паводковых вод главная задача состоит в выделении зон затопления. Зоны затопления определяются как разность текущей водной поверхности и водной поверхности в период минимального уровня воды, который считаем в качестве постоянной водной поверхности. Он формируются по осенним данным Landsat. Определение зон затопления осуществляется в трех уровнях.

На первом уровне зоны затопления формируются ежедневно в оперативном режиме на основе данных низкого разрешения. На втором уровне по мере поступления формируется боле детальная информация о зонах затопления с использованием данных среднего разрешения. При необходимости для отдельных территорий на третьем уровне формируется еще более детальная информация на основе космоснимков высокого и сверхвысокого разрешения.

Первоначально регулярно формировались зоны затопления только первого уровня, два других использовались нерегулярно в качестве вспомогательных или в особых случаях. После появления в свободном доступе оптических данных Landsat-8 и Sentinel-2A, а также радарных данных Sentinel-1A и Sentinel-1B стало возможным формировать регулярно зоны затопления и на втором уровне. Эти данные охватывают значительно меньшие территории и имеют большой период повторной съемки, но использование всех четырех спутников при мониторинге позволяет существенно нивелировать эти недостатки.

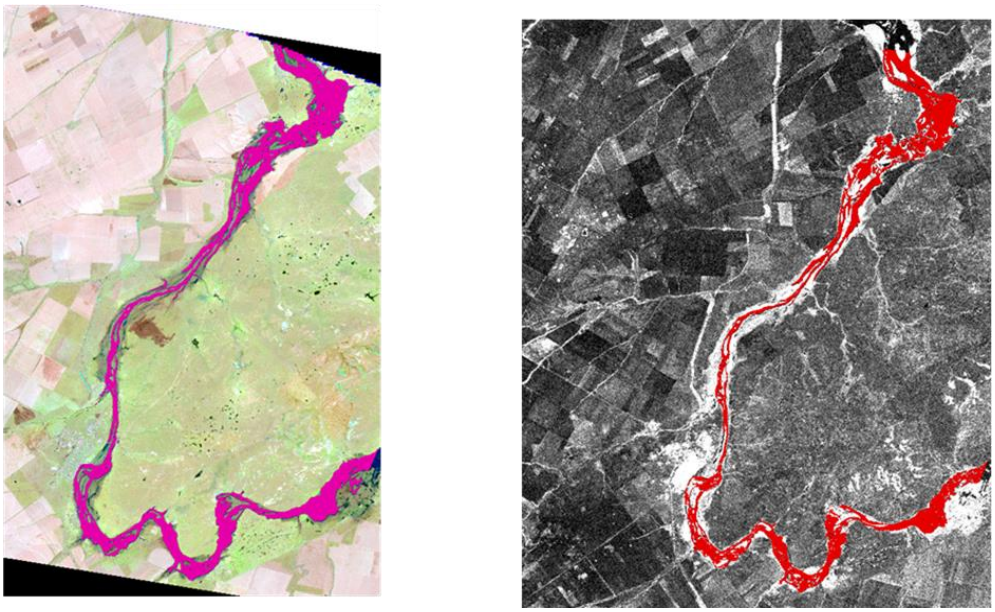
Особо отметим роль радарных данных при мониторинге паводковых вод. Период прохождения паводковых вод часто сопровождается высокой облачностью, которая приводит к тому, что до 80 % оптических космоснимков могут быть непригодны для определения зон затопления. На радарную съемку не влияет ни облачность, ни время суток, и часто они являются единственным источником информации о паводковой ситуации.

© Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н., 2018

Новые возможности для повышения информационности космического мониторинга предоставляет совместное рассмотрение оптических и радарных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Ниже рассмотрим некоторые моменты совместного анализа радарных и оптических данных при выделении водных поверхностей.

Выделение водной поверхности по оптическим и радарным данным среднего разрешения. Оптические космоснимки Landsat-8 и Sentinel-2A обрабатываются для выделения водных поверхностей по одной схеме. Сначала в автоматическом режиме проводится скачивание снимков и их стандартная и тематическая предварительная обработки. Последняя заключается в выделении водных поверхностей по пороговым значениям с использованием индекса растительности NDVI и водного индекса NDWI. Пороговые значения были определены опытным путем для каждого спутника для территории Казахстана по результатам обработки многих снимков.

Затем проводится экспертная оценка, которая заключается в анализе полученных водных поверхностей и удалении ложных водных объектов. Обычно таких объектов немного, при этом часто наблюдается их полное отсутствие. Иногда анализ показывает пропуск водных поверхностей. В этом случае может проводиться повторное выделение водных поверхностей с немного измененными пороговыми значениями. Пример выделения водных поверхностей по оптическим данным Sentinel-2 для средней части реки Ишим за 1 мая 2017 г. приведен на рис. 1, *а*. Отметим, что на рис. 1 в обоих случаях вектор водной поверхности наложен на исходный снимок.



а *б*

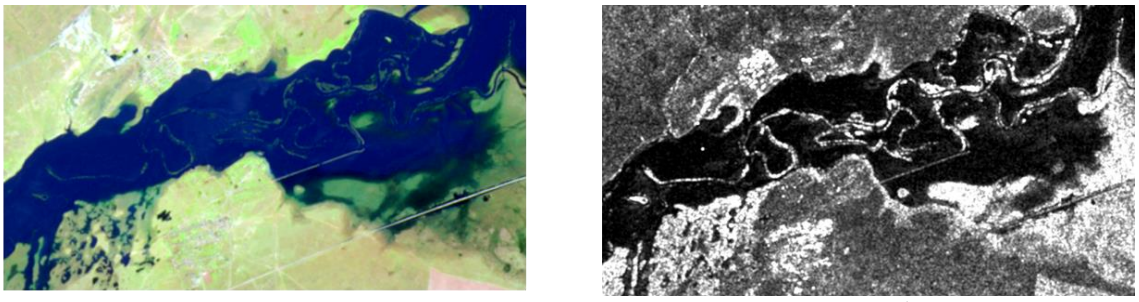
Рис. 1. Выделение водных поверхностей по оптическому снимку Sentinel-2A (*а*) и по радарным данным Sentinel-1B (*б*) на реке Ишим в районе поселка Гастелло Акмолинской области за 1 мая 2017 г.

Для радарных снимков Sentinel-1A и Sentinel-1B процесс получения вектора водной поверхности существенно сложней, чем для оптических снимков. Для них пока автоматизирован только процесс скачивания снимков, хотя в дальнейшем планируется повысить уровень автоматизации и для других этапов. Затем проводится процесс предварительной обработки, который включает в себя такой важный элемент как фильтрация, обусловленный большим спекл-шумом радарных снимков. Тематическая обработка проводится с использованием пороговых значений, лежащих в некотором диапазоне, из которого выбираются наиболее подходящие значения в каждом конкретном случае.

Тематическая обработка проводится для каждой из поляризаций (VV и VH), в результате чего формируются маски водной поверхности по каждой из них. Затем формируется единая суммарная маски водной поверхности (рис. 1, *б*), что позволяет существенно уменьшить зернистость итогового изображения. Оставшуюся зернистость («дырки») можно уменьшить с помощью фильтрации, но в результате контуры станут более размытыми и, кроме того, могут исчезнуть небольшие структуры. Можно убрать «дырки» с помощью визуального анализа методами ГИС, но это может привести к существенному увеличению времени обработки.

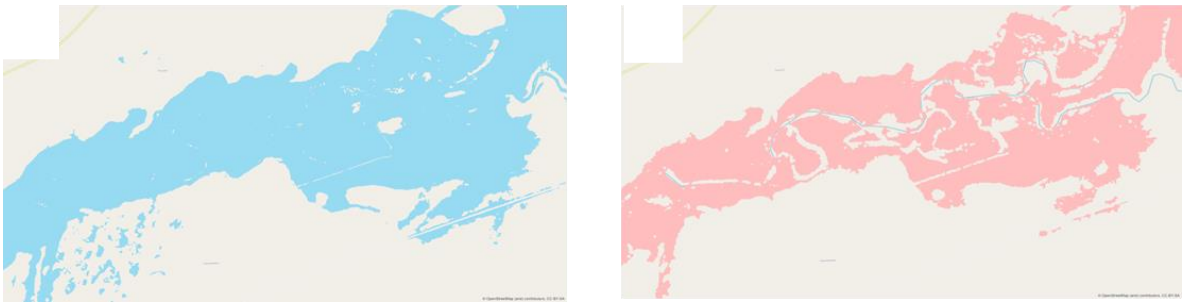
Сравнение водных поверхностей, полученных по радарным и оптическим данным. Проводить сравнение водных поверхностей, полученных по радарным и оптическим данным, лучше всего по снимкам, сделанным в один день при прохождении паводковых вод. Такая возможность иногда предоставляется. На рис. 1 как раз проиллюстрирован такой случай. Из него видно, что структура водной поверхности для обеих съемок похожа, но имеет и некоторые различия. Для выяснения этих различий проанализировали фрагменты радарных и оптических снимков с привлечением данных высокого разрешения из Google. При этом конечно учитывалась разница в пространственном разрешении Sentinel-2A (10 м) и Sentinel-1 (25 м).

В результате выявлено несколько объектов, по-разному отражающихся на радарных и оптических снимках. Часть таких различий можно объяснить разным пространственным разрешением. Наиболее интересное различие представлено ниже. На рис. 1 представлены фрагменты исходных оптического и радарного снимков одного и того же участка реки Ишим, а на рис. 2 результаты их тематической обработки для выделения водных поверхностей. Контуры затопленной территории практически совпадают. Существенное различие в структуре самой зоны затопления.



а *б*

Рис. 2. Фрагмент оптического Sentinel-2A (*а*) и радарного Sentinel-1B (*б*) снимков реки Ишим в районе поселка Гастелло Акмолинской области за 1 мая 2017 г.



а *б*

Рис. 3. Выделение водной поверхности по оптическим (*а*) и радарным (*б*) данным на реке Ишим в районе поселка Гастелло Акмолинской области за 1 мая 2017 г.

Что касается структуры затопленной территории, то можно сказать следующее. На исходных снимках на ней выделяются и на радарном, и на оптическом дополни-

тельные структуры, в том числе отражающие русло реки и протоки до начала затопления. При этом дополнительные структуры практически идентичны на обоих снимках. При выделении водной поверхности по оптическому снимку дополнительные структуры фактически исчезают за исключением нескольких островов, а по радарному присутствуют и эти острова, и дополнительные структуры. Вполне возможно, что эти дополнительные структуры образуют затопленные растительные объекты.

Перспективы дальнейших исследований. Вообще объединение различных данных при совместном анализе часто называют слиянием данных (data fusion). Данные ДЗЗ различаются между собой по спектральным характеристикам, по радиометрическому разрешению, по пространственному разрешению, по времени съемки, сенсорами, с которых их получают, природой (типом) данных (оптические, радарные, СВЧ). Цель слияния различных данных состоит в повышении их информативности.

Классические примеры такого слияния является давно и широко используемое формирование RGB-композита разных по спектральным характеристикам данных, полученных одновременно с помощью одного сенсора, т.е. каналов многоспектрального снимка. Другим классическим примером является слияния PAN и MX снимков, полученных одним и тем же сенсором, к примеру с помощью процедуры Pansharpening. Отметим, что методики слияния PAN и MX изображений для конкретных практических задач активно разрабатываются до сих пор.

В последние годы большое внимание уделяется совместному анализу радарных и оптических данных, которые являются в некотором роде взаимно дополняющими. Слияние радарных и оптических данных используется при классификации подстилающей поверхности в картографии, сельском и лесном хозяйствах, ирригации, при геологических и гидрологических исследованиях, городской инфраструктуры и т.д. Имеются примеры использования этих методов и при космическом мониторинге ЧС (выгоревшие площади, последствия землетрясений, ледовая обстановка, зоны прибрежного затопления).

Алгоритмы слияния данных условно разбиваются на три группы: уровень элементов изображения (точечный уровень), уровень объектов, уровень решений (интерпретации). На точечном уровне предполагается объединение данных на уровне элементов нового изображения. На уровне объектов происходит первоначальное выделение исследуемых объектов с последующим их совместным анализом. Можно сказать, что один из вариантов такого подхода рассмотрен выше.

Сейчас исследуются различные методики слияния на точечном уровне оптических и радарных ДДЗ для выделения водных объектов. Для этих целей также может использоваться процедура формирования RGB-изображений. В зависимости от поставленной задачи подбираются наиболее информативные комбинации оптических и радарных каналов, включая порядок их расположения. При этом рассматриваются и разновременные данные.

Заключение. Совместный анализ выделения водных поверхностей по радарным и оптическим данным показал, что радарные данные предоставляют возможность выделить также дополнительный класс затопленные водные объекты.

Использование методик слияния оптических и радарных ДДЗ позволит получить новые возможности для выделения водных поверхностей.

УДК 528.852

А.А. Бучнев[1], П.А. Ким[1], В.П. Пяткин[1],
Ф.В. Пяткин[2], Е.В. Русин[2]

[1]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
[2]Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», Новосибирск, Россия
e-mail: pvp@ooi.sscc.ru

ФРЕЙМВОРК СЕТИ ОБЛАЧНЫХ WEB-СЕРВИСОВ ДЛЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрена распределенная сеть облачных web-сервисов для обработки спутниковых данных, предоставляющая услуги обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках облачной модели SaaS. Фактически это совокупность web-сервисов, реализующих функциональные модули программного комплекса обработки данных ДЗЗ PlanetaMonitoring.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, программное обеспечение PlanetaMonitoring, высокопроизводительные вычисления, облачная среда, web-сервис, линеаменты, кольцевые структуры, кластеризация, метод K-средних.

Целью работы является разработка и реализация фреймворка модели (макета) распределенной сети облачных web-сервисов для обработки спутниковых данных, предоставляющей услуги обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках облачной модели SaaS. Фактически это совокупность web-сервисов, реализующих функциональные модули комплекса тематической обработки данных ДЗЗ PlanetaMonitoring [1].

Программный комплекс PlanetaMonitoring. Разработанный в ИВМиМГ СО РАН совместно с ФГБУ «НИЦ "Планета"» этот программный комплекс обеспечивает функционально полный набор операций по обработке данных ДЗЗ [1–3]. Он реализует ряд программных технологий обработки многоспектральной спутниковой информации оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов. Перечислим некоторые из этих программных технологий: фильтрация спутниковых изображений; радиометрическая и геометрическая коррекция; географическая привязка; трансформирование в картографические проекции и построение мозаик из отдельных изображений; выделение линеаментов и кольцевых структур; распознавание и классификация объектов окружающей среды (кластерный анализ и классификация с обучением); определение пространственных перемещений объектов по разновременным спутниковым изображениям. Каждая из перечисленных выше программных технологий комплекса PlanetaMonitoring для использования в облачной среде реализована в виде Windows-приложения (пакетный режим). В данной работе предлагается подход к организации распределённой облачной среды, способной обеспечить надежное и эффективное выполнение этих Windows-приложений при обработке данных ДЗЗ.

Облачные вычисления. В настоящее время становится актуальным использование Internet-технологий для оперативной интеграции информационно-вычислительных ресурсов при решении задач обработки данных ДЗЗ. Парадигма облачных вычислений (cloud computing) дает такую возможность [4]. Основная идея облачных вычислений – технологии распределенной обработки и хранения данных, в которых все необходимые ресурсы

© Бучнев А.А., Ким П.А., Пяткин В.П., Пяткин Ф.В., Русин Е.В., 2018

предоставляются пользователю как Internet-сервис. Концептуально технологию облачных вычислений делят на предоставление инфраструктуры в качестве сервиса (IaaS, Infrastructure as a Service), платформы в качестве сервиса (PaaS, Platform as a Service) или программного обеспечения в виде сервиса (SaaS, Software as a Service) и многих других возможных интернет-технологий для удаленных пользовательских вычислений. В ИВМиМГ СО РАН разрабатываются макеты web-сервисов, реализующих программные технологии (пакетные Windows-приложения) комплекса PlanetaMonitoring, что решает новую задачу предоставления услуг обработки данных ДЗЗ в рамках облачной модели SaaS [5]. Макеты сервисов реализуются на платформе Windows и состоят из двух компонент. Вычислительной компоненты, созданной на основе разработанного ранее соответствующего Windows-приложения (пакетный режим), и web-интерфейса, выполненного на основе свободного web-сервера Apache. Основной (опорный) облачный web-сервер для обработки спутниковых данных реализуется на базе ИВМиМГ СО РАН. Ряд обстоятельств диктуют такое решение. Прежде всего, на основном сервере формируется так называемая облачная среда, предоставляющая услуги обработки данных ДЗЗ в рамках облачной модели SaaS [6]. Важно, что имеется возможность организации высокопроизводительных масштабируемых вычислений в Центре коллективного пользования Сибирский Суперкомпьютерный Центр (ССКЦ), организованном на базе ИВМиМГ СО РАН [7].

Высокопроизводительные масштабируемые вычисления. Разрабатываемый фреймворк предполагает использование для трудоемких вычислений высокопроизводительных ресурсов ССКЦ. Подсистема высокопроизводительных вычислений реализуется на основе развиваемого авторами программного комплекса интеграции удаленной высокопроизводительной ЭВМ в процессы обработки и анализа спутниковых данных SSCCIP [8]. Комплекс состоит из четырех компонент: клиентской – рабочего места оператора в Windows-окружении (обеспечивает графический интерфейс конфигурирования запроса на обработку данных, отслеживания результатов его выполнения и визуализации результатов); серверной – Unix-приложения, функционирующего на суперЭВМ (обеспечивает обработку запроса клиентской компоненты и его диспетчеризацию); коммуникационной – сетевого обмена между клиентской и серверной компонентами (реализована на основе защищенного сетевого протокола SSH); вычислительной – развиваемой авторами библиотеки высокопроизводительной обработки изображений ParImProLib [9]. Библиотека ParImProLib обеспечивает выполнение расчетов на гибридном кластере типа НКС-30Т+GPU ССКЦ: межузловой обмен обеспечивается интерфейсом MPI, а вычисления на GPU (в настоящее время в разработке) – технологией Nvidia CUDA. В перспективе планируется расширение библиотеки функцией обработки на CPU Intel Xeon Phi для обеспечения возможности выполнения вычислений на новом кластере ССКЦ НКС-1П. Отметим, что комплекс SSCCIP и библиотека ParImProLib также построены в виде фреймворка: их исходный код организован так, что операции, общие для определенного типа алгоритмов обработки, отделены от операций, специфичных для конкретных алгоритмов данного типа. В [8] показано, что данный подход позволяет сохранить высокую производительность программного кода при существенном упрощении процесса добавления в комплекс новых алгоритмов обработки. Для использования комплекса в качестве подсистемы облачного web-сервиса, его клиентская компонента будет расширена возможностью выполнения обработки в автономном режиме с интерфейсом, идентичным интерфейсу, предоставляемому пакетом PlanetaMonitoring. Таким образом, разрабатываемый фреймворк будет обеспечивать изоляцию web-сервера от особенностей конкретного вычислителя.

Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации (НКПОР) ФГБУ «НИЦ "Планета"». Реализованная на основном сервере облачная среда (полностью или частично) переносится на серверы НКПОР с использованием технологии «зеркалирования» [10]. НКПОР включает в себя три ре-

гиональных центра, входящих в состав ФГБУ «НИЦ "Планета"»: Европейский (Обнинск – Москва – Долгопрудный), Сибирский (г. Новосибирск) и Дальневосточный (Хабаровск). Кроме того, в состав НКПОР входит сеть стационарных и мобильных автономных пунктов (около 70) приема спутниковой информации в России, Антарктиде и на морских судах, находящихся под научно-методическим руководством ФГБУ «НИЦ "Планета"». Первое резервное зеркало будет реализовано на сервере Сибирского центра (СЦ) ФГБУ «НИЦ "ПЛАНЕТА"». Важно, что СЦ ФГБУ «НИЦ "Планета"» поддерживает web-сервер, на котором представлена оперативная спутниковая продукция, поступающая в режиме реального времени (ftp1.rcpod.ru).

Вычислительные компоненты распределенной системы облачных web-сервисов. Практически каждая вычислительная компонента некоторого web-сервиса является пакетным вариантом соответствующей программной технологии комплекса PlanetaMonitoring. В данной статье представлен макет облачной среды, состоящей из двух web-сервисов, созданных на основе разработанных ранее Windows-приложений: LINECOIL [11] (выделение линеаментов и кольцевых структур на спутниковых изображениях) и KMEAN [12] (кластеризация методом *K*-средних). Для обращения к соответствующему web-сервису необходимо передать в облачную среду текстовый файл, содержащий параметры обработки. Заметим, что технология выделения линеаментов и кольцевых структур уже реализована в виде облачного web-сервиса и доступна пользователям сети Internet [5]. В настоящее время нами завершаются испытания макета облачного web-сервиса кластеризации данных ДЗЗ. Основным алгоритмом кластеризации в нашей системе является широко известный алгоритм *K* -средних [13]. Алгоритм основан на итеративной процедуре отнесения векторов признаков кластерам по критерию минимума расстояния вектора до центра кластера. Оптимальным считается такое разбиение входных векторов на кластеры, при котором внутриклассовый разброс не может быть уменьшен при переносе какого-либо вектора из одного кластера в другой. Алгоритм *K* -средних обеспечивает получение минимума (в общем случае локального) следующей функции ошибок

$$E = \sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{N} \gamma_{ij} \rho(x_j, m_i), \text{ где } \gamma_{ij} = \begin{cases} 1, x_j \in C_i; \\ 0 \end{cases}$$

N – количество векторов признаков; K – число кластеров; x_j – j-й вектор признаков$ m_i – центр i-го кластера; $\rho(x, y)$ – выбранная метрика (расстояние) между векторами x и y; C_i – i-й кластер.

Результатами кластеризации можно управлять с помощью следующих параметров [14]: количество выделяемых кластеров; количество итераций алгоритма; тип метрики (расстояния) между векторами (Евклида, Чебышева, Махаланобиса, сити-блок расстояние), выбранная метрика определяет форму получаемых кластеров; способ выбора начальных центров кластеров (один из трех, два из них определяются на основе статистических характеристик набора данных и один основан на случайной выборке); точность вычислений. Кроме того, предоставляется возможность сохранения статистических данных полученной кластерной карты (объемы кластеров, векторы средних в кластерах, стандартные отклонения и т.п.) в текстовом файле.

Web-интерфейс распределенной системы облачных web-сервисов. Разработка «частных» облачных сервисов имеет в своей природе также и такую аргументацию, как возможность обеспечения сохранности интеллектуальной собственности на создание и использование в режиме ноу-хау авторских программных алгоритмов. Тем самым, оказывается оправданным вложение усилий в развитие облачных технологий несоизмеримое по масштабам возможностям программных корпораций. Численное расширение спектра web-сервисов, развиваемых в рамках единой облачной технологии, с необхо-

димостью должно учесть при конструировании их программного наполнения качественные особенности в структуре пользовательских запросов, в частности, асинхронную природу обращений к ним. Большие временные затраты на обслуживание конкретного сервиса в режиме online требует отслеживания его текущего состояния, и, принятое решение о взаимодействии по этой задаче с пользователем удачно сочетает баланс между вычислительными нагрузками на собственно процесс и его вспомогательное обеспечение. Другая насущная проблема развития облака, решение которой увеличивает его эффективный потенциал – это необходимость перераспределять ресурсы для однотипных запросов, оттягивающих их на свою реализацию, что наиболее безболезненно возможно при «зеркалировании» сервисных процессов на компьютерах доступной сети, т.е. дублирование инфраструктуры процессов по соответствующим серверам облака с сохранением иерархии каталогов файловой системы, вписываемое в гипертекстовое пространство возможных браузеров работы с web-сервисами. Работа «зазеркалья» обеспечивается диспетчером распределения ресурсов для конкретных сервисных запросов. Структурная сложность, находящегося в разработке облачного диспетчера, определяется архитектурой вложения предметно-ориентированного облака web-сервисов в эксплуатируемые уже сейчас распределенные сети НКПОР. Как уже отмечалось, с начальных реализаций представленного web-сервиса, целенаправленно продолжилось многолетнее развитие идеологически поддерживаемой в лаборатории обработки изображений ИВММГ СО РАН концепции объединения в рамках единой интерфейсной программной оболочки разнородных алгоритмов для обработки изображений [15]. Таким образом, «сменные» вычислительные компоненты, опирающиеся на унифицированный сетевой интерфейс, предусматривают возможность реализации вычислительных компонентов на различных архитектурных платформах гетерогенных сетей, объединяющих как многопроцессорные архитектуры ССКЦ, так и распределенные сети НКПОР. С учетом разнородности и обширности рынка пользовательских браузеров, используемых в сети Интернет, web-интерфейс в макетном варианте реализуется с использованием базовых средств гипертекстового языка HTML. Сервисная часть выполнена на Apache 2.2 [16; 17], при этом, с учетом природной гетерогенности объемлющей инфраструктуры, развиваются и другие платформы в архитектуре IIS Windows. Информационные потоки данных обеспечиваются по FTP-протоколу. Таким образом, пользователь имеет возможность вести поиск «скрытых» в «облаке» объектов, как по архивным данным, так и по индивидуальным образцам изображений. Здесь отслеживается облачная парадигма хранения данных. Собственно пользовательский интерфейс реализуется посредством «формы» в HTML – разделе документа, позволяющем вводить информацию для последующей обработки системой, и, дополнительно к разметке обычных элементов, содержит разметку для элементов управления и надписей [18].

Заключение. Успешный опыт реализации макета облачного web-сервиса по выделению линеаментов и кольцевых структур на космических изображениях был использован для создания макета облачного web-сервиса кластеризации данных ДЗЗ, представляющего известный алгоритм *K*-средних. В дальнейшем предполагается разработка макетов облачных web-сервисов и по другим программным модулям комплекса PlanetaMonitoring.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-00066) и базового проекта ФАНО (проект № 0315-2016-0003) с использованием ресурсов ЦКП «Сибирский суперкомпьютерный центр» ИВМиМГ СО РАН.

Список литературы

1. Planetamonitoring: программный комплекс обработки спутниковых данных / В.В. Асмус, А.А. Бучнев, В.А. Кровотынцев [и др.] // Проблемы информатики. 2013. № 3. С. 85–99.

2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

3. Software System for Satellite Data Processing of Applied Tasks in Remote Sensing of the Earth / V.V. Asmus, A.A. Buchnev, V.P. Pyatkin, G.I. Salov // Pattern Recognition and Image Analysis. 2009. Vol. 19, № 3. P. 69–74.

4. Kim P.A., Kalantaev P.A., Pyatkin V.P. Cloud Multiagent System for the Database of Natural Resources // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25, № 2. P. 220–222.

5. Макет облачного web-сервиса по выделению линеаментов и кольцевых структур на космических изображениях / А.А. Бучнев, П.А. Ким, В.П. Пяткин, Г.И. Салов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия «Техника и технология». 2017. Т. 10, № 6. С. 741–746.

6. Бучнев А.А., Пяткин В.П., Пяткин Ф.В. Облачная среда в прикладных дистанционных исследованиях Земли // Тр. XIII Междунар. выставки и научного конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь – 2017», пленарное заседание, 17–21 апреля 2017. Новосибирск, 2017. С. 8–13.

7. Сибирский суперкомпьютерный центр ИВМиМГ СО РАН. URL: http://www.sscc.icmmg.nsc.ru/.

8. Rusin E.V. SSCCIP – A Framework for Building Distributed High-Performance Image Processing Technologies // Malyshkin V. Parallel Computing Technologies. 11th International Conference PaCT 2011 Proceedings, Kazan, Russia, September 19–23, 2011. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6873. Berlin Heidelberg New-York: Springer-Verlag, 2011. С. 467–472.

9. Rusin E.V. Object-Oriented Parallel Image Processing Library // Malyshkin V. (ed.). Parallel Computing Technologies. 10th International Conference PaCT 2009 Proceedings, August 31 – September 4, 2009, Novosibirsk, Russia. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5698. Berlin Heidelberg New-York: Springer-Verlag, 2009. С. 344–349.

10. Mirror website. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mirror_website.

11. Программа выделения линеаментов и кольцевых структур на аэрокосмических изображениях LINECOIL / В.В. Асмус, А.А. Бучнев, В.П. Пяткин [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663473 от 18 декабря 2015 г.

12. Программа кластеризации данных дистанционного зондирования Земли методом K-средних KMEAN / В.В. Асмус, А.А. Бучнев, В.П. Пяткин, В.А. Кровотынцев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662037 от 16 ноября 2015 г.

13. Jain A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters. 2010. № 31. P. 651–666.

14. Асмус В.В., Бучнев А.А., Пяткин В.П. Кластерный анализ данных дистанционного зондирования Земли // Автометрия. 2010. № 46 (2). С. 58–66.

15. Системная поддержка процесса обработки цифровых изображений / А.А. Бучнев, П.А. Калантаев, П.А. Ким, В.П. Пяткин // Математические структуры и моделирование: сб. науч. тр. Омск. гос. ун-т, 1999. Вып. 3. С. 42–46.

16. Environment Variables in Apache. URL: https://httpd.apache.org/docs/2.4/env.html.

17. Running CGI Scripts on Apache2. URL: https://tasdikrahman.me/2015/09/30/Running-CGI-Scripts-on-Apache2-Ubuntu.

18. Form (HTML). URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/HTML.

УДК 528.7, 528.87

А.П. Гук[1], Л.Г. Евстратова[2]

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия, e-mail: guk_ssga@mail.ru
[2]Государственный университет по землеустройству,
Москва, Россия, e-mail: lge_21@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ

Рассмотрены принципы формирования модели распознавания объектов по их изображениям на многоспектральных снимках. Обсуждается эффективность применения различных критериев при использовании непараметрической статистической модели распознавания.

Ключевые слова: модель распознавания, непараметрический статистический метод, статистические эталоны, многоспектральные снимки.

Основной информацией для распознавания объектов по многоспектральным снимкам являются измеренные спектральные яркости объектов, записанные как яркости элементов изображения. В результате обработки этих измерений требуется выполнить классификацию объектов и определить их качественные характеристики. Непосредственно определить эти характеристики не возможно, следовательно, нужно на основе измерений сформировать признаки, однозначно определяющие объект и некоторые из его свойств. Таким образом, объект и его состояние связаны с измерениями посредством выбранных признаков. Идеальным был бы вариант, если можно было бы измерять непосредственно признаки. Однако это тоже не возможно на современном уровне развития средств дистанционного зондирования. Более того невозможно измерять даже спектральные характеристики объекта, так как на измерения влияет масса факторов (атмосфера, положение носителя положение съемочной системы). Еще один важный фактор – это то, что спектральные коэффициенты отражения для различных объектов сильно коррелированны и подвержены значительным флуктуациям.

Таким образом, возникает сложная задача, включающая несколько этапов: изучение спектральных свойств отражения объектов, описание свойств объекта на основе коэффициентов спектральных яркостей (формирование признаков объекта по коэффициентам спектральных яркостей), создание модели связи между измеренными яркостями и признаками. Как видно для реализации такой схемы требуется выполнить исследования свойств объекта, оценить влияние атмосферы и других факторов, сформировать модели, описывающие все указанные взаимосвязи. Очевидно, что это будут вероятностно-детерминированные модели (модели детерминированного хаоса) решение которых сопряжено с большими трудностями.

Однако на практике применяется другой подход. Создается модель, связывающая измерения и признаки и считается, что признаки выбраны таким образом, что они однозначно определяют объект. Часто это очень простые модели для интерактивного дешифрирования, использующие интуицию оператора-дешифровщика – модели кластерного анализа. К такому же типу моделей относятся и статистические модели типа Байесовского классификатора, метода максимального правдоподобия и т.п. С целью

© Гук А.П., Евстратова Л.Г., 2018

упрощения решения задачи большинство таких моделей использует нормальный закон распределения вероятностей. Однако, зачастую это приводит к не адекватному результату.

В работах [1; 2] предложен статистический непараметрический подход к дешифрированию многоспектральных снимков. Статистический анализ не параметрических распределений до настоящего времени находится в периоде становления. Получены существенные результаты лишь для одномерного распределения. В то же время, для многомерных непараметрических методов сложно получить достоверные оценки.

Сущность предложенного подхода заключается в следующем. Для всех классов объектов, которые требуется распознать по их изображениям на многоспектральных снимках, создаются эталонные признаки. В качестве признака используется функция распределения плотности вероятностей для яркостей соответствующих элементов многоспектрального изображения. Эталонные функции плотности распределения вероятностей определяют по достаточно большим выборкам размера $N \leq N_m$, Измерения выполняются по изображениям эталонных объектов, количество измерений $N_{\min}$ выбирается с достоверностью, соответствующей критерию $\alpha \leq 0{,}1$.

Как известно, при непараметрических методах функции распределения получают в результате статистических исследований различными методами (гистограммным, методом Парзена, полигональные оценки и др.).

Учитывая, что при обработке изображений случайная функция задается дискретными значениями с заданным шагом на ограниченном интервале [0–255], [0–1023] или [0–4 095], то наиболее приемлемым для оценки непараметрической функции распределения следует считать гистограммный метод. Действительно все другие методы основаны на аппроксимации (интерполяции) значений выборки на каком либо интервале, что целесообразно при большом количестве измерений оцениваемой функции.

В случае обработки изображений количество значений яркости ограничено уровнями квантования, применяемым в приемнике излучения, используемого для формировании изображения.

Гистограммный подход позволяет получить дискретную оценку функции плотности распределения вероятностей, достоверность которой зависит от размера выборки. В [2] в результате исследований получены значения минимального размера выборки, который возможно использовать для классификации данных (с достоверностью $1 - \alpha$, где $\alpha = 0{,}05$). При оценке эталонных функций распределения необходимо проверить распределение «на нормальность». Если распределение не соответствует нормальному закону тогда целесообразно использовать непараметрические статистики. Проверка на нормальность осуществляется на основе критерия ω^2 [3]:

$$\omega_m^2 = m\int\ldots\int \psi^2[F(X_m,\mu)]\,[F_m(X_m) - F_m(X_m,\mu)]^2\, dF(X_m,\mu) \succ \omega_\alpha^2,$$

где $F_m(x_m)$ – эмпирическая функция распределения выборки $\{x_i\}^m$; $F_m(X_m,\mu)$ – функция нормального распределения с параметрами μ и $\Psi^2[F]$ – весовая функция.

Эталонные функции различны для многоспектральных снимков, полученных различными съемочными системами. Таким образом, для использования непараметрического подхода требуется создать банк данных, включающий функции плотности распределения вероятностей для всех классов объектов, которые предполагается дешифрировать на снимках. Кроме того, эти функции должны быть получены для различных типов съемочных систем. Что касается масштаба изображений, то в результате исследований, выполненных в [2], установлено, что при изменении масштаба изображений в пределах $\pm$30 % функция плотности вероятностей изменяется в пределах точности метода.

После создания банка эталонных функций приступают собственно к дешифрированию снимков. Для этого выполняется сегментация изображений. При этом целесообразно использовать площадные признаки, например текстурные. Размер выделенных

сегментов не должен содержать количество элементов меньше n_0. Количество элементов определяется из условия минимально возможного размера участка, для которого отличие от эталонного распределений не превышает уровня $\alpha \leq 0{,}05$. Затем для каждого выделенного сегмента гистограммным методом рассчитывают функции плотности распределения вероятностей и сравниваются со всеми эталонными функциями.

В методе распознавания, предложенным в [2], использовались измерения только одного канала, которая полностью характеризуется одномерной функцией плотности распределения. Информативность канала определялась визуально – по максимальному отличию кривых функций распределения для различных классов в различных каналах. Хотя такой подход и не является математически обоснованным, но на практике его применение вполне допустимо. Тем не менее, ясно, что в общем случае необходимо использовать информацию всех каналов съемочной системы и соответственно, потребуется оценивать многомерную плотность информации и многомерные критерии соответствия.

Таким образом, возникает типичная задача статистики с так называемой «нулевой гипотезой». Несмотря на то, что для решения этой задачи разработан достаточно широкий набор статистик критериев, нужно детально знать физические свойства явления, в данном случае – изменение спектральных яркостей изображений объекта, что бы принять достоверное решение (с заданным уровнем значимости).

Сущность изложенного метода заключается в получении функций эталонов и вычисление уровня соответствия функции распределения, полученной по измерениям изображения объекта на дешифрируемом снимке, и отнесения объекта к тому или иному классу.

Как известно [4], все виды решающих правил основаны на формировании отношения правдоподобия и его сравнении с определенным порогом c, значение которого выбирается критерий качества:

$$L = \frac{F(x_1, x_2 \ldots x_n / s_1)}{F(x_1, x_2 \ldots x_n / s_0)} \geq c \,.$$

Практически при вычислении статистики нужно учитывать вид и структуру функции плотности вероятностей.

В соответствии с этим статистики разделяют на [4]:

а) статистики Колмогорова, оценивающие максимум расхождения между значениями измеренной и эталонной функциями функции

$$D = \sup_x \, [F_0(x) - F_j(x)];$$

б) взвешенные статистики Колмогорова, вида $D = \int_{-\infty}^{+\infty} [F_0(x) - F_j(x)]^2 \, dF_0(x)$, когда больший вес придается «хвостам» распределения;

в) статистики типа χ^2 (хи – квадрат):

$$D = \sum_{x_k}^{x_k + \Delta_l} \frac{F(x) - F_0(x)}{F(x)},$$

где k и l величины, которые выделяют необходимые интервалы из функций распределения для анализа соответствия функций; $F(x_0)$ и $F(x)$ – эталонные и измеренные функции распределения соответственно.

Указанные статистики просто использовать при одномерной функции плотности распределения и вычислительная задача становится достаточно сложной при увеличении размерности вектора измерений и количества распознаваемых объектов. Кроме того, сложно интерпретировать полученный результат.

На первом этапе при использовании предложенного метода [1], вместо статистик типа «а» использовалась статистика, основанная на вычислении корреляционной функ-

ции $R_j(0) = \dfrac{\sum_{j=1}^{k} F_0(x)F_j(x)}{F_0(x)}$ и определении $\max R_{j\forall j}$.Этот критерий, по крайней мере, позволяет в некотором смысле оценить общее несоответствие функций распределения.

Примерно такой же результат дает применение оценка корреляции по критерию Фишера Z [3].

Заключение. Применение простого метода при использовании одного канала [2], позволяет получить хороший результат (достоверность распознавания выше 90 %). И хотя этот результат получен для определенных условий и ограниченного круга объектов, можно надеяться на улучшение результата, повышение устойчивости алгоритма и возможность применения для объектов различного типа.

Для этого нужно выполнить дополнительные исследования:

1) определить устойчивые статистических характеристик распределения яркостей изображения для заданных классов объектов;

2) выбрать характерные участки кривой функции плотности вероятностей, определяющей различие классов;

3) выбрать наиболее информационные признаки и сформировать оптимальное пространство признаков, обеспечивающих максимум коэффициента, определяющего различия функций распределения для исследуемых классов.

Список литературы

1. Гук А.П., Евстратова Л.Г. Новый статистический подход к распознаванию лесных массивов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. Красноярск, 13–16 сентября 2016 г. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 14–17.

2. Гук А.П. Автоматизация дешифрирования снимков. Теоретические аспекты статистического распознавания образов // Изв. вузов. Серия «Геодезия и аэрофотосъемка». 2015. № 5. С. 166–170.

3. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов: пер. с англ. / под ред. А.А. Дорофеева. М.: Наука, 1970.368 с.

4. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978. 560 с.

УДК 528.8.04, 528.88

Е.В. Дмитриев[1], В.В. Козодеров[2], А.А. Соколов[3], А.Н. Сафонова[4]

[1]Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия, e-mail: yegor@mail.ru
[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, e-mail: vkozod@mail.ru
[3]Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université du Littoral Cote d'Opale,
Дюнкерк, Франция, e-mail: mailto:anton.sokolov@univ-littoral.fr
[4]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,
e-mail: sunny1991-2010@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАКСАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Рассмотрена задача дистанционной инвентаризации лесных территорий с использованием спутниковых изображений высокого разрешения. Предложена методика определения ряда лесотаксационных параметров на основе совместной обработки мультиспектральных и панхроматических изображений. Методика позволяет построить эффективную комбинацию базовых классификаторов различной сложности с учетом решения проблем переобучения и проклятия размерности. Для классификации объектов используются спектральные и текстурные признаки. Проведены тестовые эксперименты по тематической обработке изображений WorldView-2 выбранной территории Савватьевского лесничества (Тверская область). Получены оценки точности с использованием наземных данных.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, спутниковые изображения высокого разрешения, оптимизация пространства признаков.

Спутниковые системы высокого разрешения, позволяющие получать мультиспектральные изображения с разрешением 1,0–2,5 м, обладают высоким потенциалом для осуществления мониторинга природных ресурсов и проведения экологических исследований. В частности, соответствующие данные могут быть использованы для высокодетального картирования лесных территорий и повышения точности дистанционной инвентаризации.

Коммерческая спутниковая система WorldView-2 содержит восьмиканальную мультиспектральную камеру с разрешением 1,84 м и панхроматическую камеру с разрешением 0.46 м. По своим точностным характеристикам WorldView-2 отвечает самым высоким требованиям. В работе [1] проводилось сравнение эффективности использования мультиспектральных изображений WorldView-2 и авиационных изображений MicaSense RedEdge сверхвысокого разрешения (7 см) для восстановления индекса листовой поверхности лесных выделов. Проведенный анализ показал, что обе системы демонстрируют схожие точности. Авиационная аппаратура показала большую точность для выделов с чистым породным составом, а аппаратура WorldView-2 оказалась более предпочтительной для смешанных древостоев.

В работе [2] приведены результаты использования многосезонных изображений WorldView-2 для определения доминантных пород лесных территорий центральной части Буркина-Фасо. Для классификации породного состава использовался алгоритм случайного леса. На основе проведенного анализа было сделано заключение, что аппаратура WorldView-2 имеет удачное расположение спектральных каналов и позволяет решать указанную задачу с точностью более 83%. Полученные результаты могут быть

© Дмитриев Е.В., Козодеров В.В., Соколов А.А., Сафонова А.Н., 2018

улучшены в дальнейшем при использовании данных новой, более совершенной системы WorldView-3, которая относительно недавно была введена в эксплуатацию.

В данной работе рассматривается задача дистанционной инвентаризации лесов средней полосы европейской части России по спутниковым изображениям высокого разрешения. В качестве основного определяемого параметра рассматривается породный состав лесных выделов. Также рассматриваются задачи определения возрастных классов и полноты доминантной породы. Определение указанных параметров производится на основе совместной обработки мультиспектральных и панхроматических изображений WorldView-2.

Методику составляют этапы предварительной обработки, обучаемой классификации и постобработки. На этапе предварительной обработки производится радиометрическая коррекция мультиспектральных изображений, выравнивание контрастности и приведение к заданному количеству градаций серого соответствующих панхроматических изображений.

Для проведения обучаемой классификации используется метод декодирования (МД) [3]. Метод позволяет решать задачу многоклассовой классификации на основе проведения серии бинарных классификаций и последующего голосования. Общая схема МД состоит в следующем. Каждому классу ставится в соответствие уникальный код (вектор-строка), содержащий числа 1, –1 и 0. Коды классов имеют одну и ту же заданную длину и могут быть объединены в кодовую матрицу, строки которой соответствуют распознаваемым классам, а столбцы – различным способам обучения некоторого бинарного классификатора (или, лучше сказать, некоторым задачам бинарной классификации, построенным на основе имеющихся классов). Для обеспечения возможности успешного решения задачи классификации, для любых двух классов должен существовать столбец кодовой матрицы, в котором эти классы разделяются.

На этапе декодирования решаются задачи бинарной классификации, определяемые столбцами кодовой матрицы. Ответы бинарных классификаторов записываются в вектор-строку. Далее рассчитываются расстояния между полученной строкой и кодами классов в смысле некоторой заданной меры. Класс соответствующий минимальному расстоянию является ответом МД.

В качестве бинарных классификаторов используются стандартные базовые алгоритмы: метод ближайших эталонов, квадратичный дискриминантный анализ и метод опорных векторов с гауссовским ядром. Данные алгоритмы отличаются точностью и скоростью вычислений. Нелинейные классификаторы, как правило, имеют преимущество по точности за счет использования более сложных дискриминантных поверхностей. При этом они проигрывают в скорости и устойчивости результатов обучения. Квадратичный дискриминантный анализ имеет более низкую скорость расчетов по сравнению с методом ближайших эталонов, причем различие в скорости существенно возрастает с увеличением размерности признакового пространства. Различие в скорости классификации может также зависеть от числа реализаций в обучающем ансамбле. В частности, это имеет место для метода опорных векторов с мягким зазором из-за увеличения числа опорных векторов. МД позволяет построить эффективную комбинацию указанных алгоритмов [4].

В качестве спектральных признаков рассматриваются спектральные яркости отдельных пикселей изображения, нормализованные на интегральную яркость. Данная трансформация позволяет существенно уменьшить разброс, возникающий вследствие различия освещенности. Текстурные признаки строятся на основе статистик матрицы совместной встречаемости уровней серого (МСВУС). МСВУС рассчитывается для некоторой малой прямоугольной области исходного изображения, центром которой является классифицируемый пиксель. Элементы МСВУС представляют собой частоты встречаемости градиентов яркости по заданному направлению. В качестве статистик

используются: контраст, корреляция, энергия и однородность. Указанные статистики могут рассчитываться для нескольких направлений.

Рис. 1. Схема метода классификации наземных объектов на основе спектральных и текстурных признаков: y_i – наименования классов; l_i – метки бинарных классификаторов; y^* – метка классифицируемого объекта

Совокупность текстурных и спектральных признаков, даже в случае многоспектральных изображений, образует пространство большой размерности. При использовании стандартных методов классификации мы неизбежно приходим к проблеме проклятия размерности, либо к потере полезной информации. В данной работе предлагается метод, который должен позволить решить эту проблему. Концепция данного метода представлена на рис. 1.

В МД используется кодовая матрица, соответствующая стратегии каждый против каждого. Обоснование такого выбора представлено в работе [4]. Для каждой задачи бинарной классификации выбирается базовый алгоритм, обеспечивающий максимальную скорость классификации без значимой потери точности. Базовые алгоритмы классификации не должны производить существенной экстраполяции за пределами обучающего множества, т.е. для каждого из них реализуется отказ от классификации. Для каждой задачи бинарной классификации выбирается оптимальный набор признаков с помощью регуляризованного метода пошагового отбора [5].

В результате проведения попиксельной классификации, особенно в случае разделения схожих объектов возникают ошибки. Как правило, большая часть таких ошибок видна без использования наземной информации из соображений нарушений геометрии и характерных размеров объектов. Например, это могут быть множественные малоразмерные для заданного класса объекты, состоящие из единичных пикселей, нехарактерная эрозия площадных объектов, ложные разрывы линейных объектов и т.д.

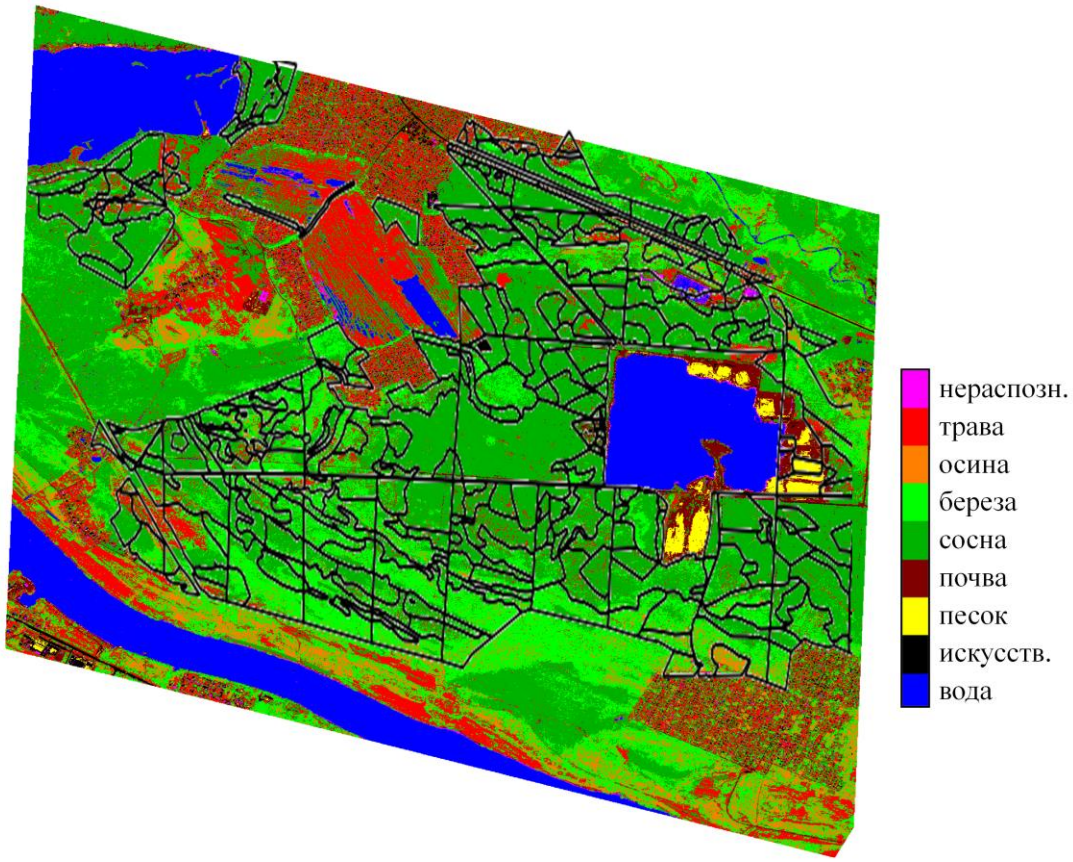


Рис. 2. Результаты тематической обработки изображений WorldView-2
для тестового участка на территории Савватьевского лесничества

Для устранения такого рода артефактов применяются алгоритмы постобработки, основанные на методах математической морфологии. Для рассматриваемых классов в зависимости от решаемой задачи создаются структурные элементы и применяются операции открытия или закрытия. Необходимо отметить, что при проведении постобработки необходимо иметь обоснование предположений, используемых при задании структурных элементов. В противном случае может происходить снижение качества тематической обработки.

Результаты классификации изображения WorldView-2 территории Савватьевского лесничества с выделением основных типов объектов представлено на рис. 2. Черными линиями обозначены границы лесотаксационных выделов. Имеется хорошее соответствие полученных результатов при сравнении с наземными данными по породному составу и данными визуального определения объектов тестовой территории.

Оценки ошибки классификации представлены в таблице. Строки таблицы соответствуют истинным классам, столбцы, за исключением последних двух, соответствуют ответам классификатора. Последние два столбца содержат относительные ошибки, полученные методом переклассификации (ОМП) и методом случайных контрольных выборок (ОМСКВ). ОМП рассматривается как априорная оценка ошибки классификации, поскольку при ее вычислении обучающие и тестовые ансамбли совпадают. При вычислении ОМСКВ тестовые данные не участвуют в обучении, и она рассматривается как независимая оценка ошибки классификации. Хорошее соответствие между ОМП и ОМСКВ говорит об отсутствии проблем переобучения и проклятия размерности.

Таблица

Результаты оценки ошибок классификации
мультиспектральных изображений WordView-2
для основных типов объектов тестового участка

Материал	Вода	Искусст.	Почвы	Сосна	Береза	Осина	Травы	ОМП	ОМСКВ
Вода	2 483	0	0	1	0	0	0	0	0,0004
Искусст.	0	594	0	5	0	0	0	0	0,0083
Почвы	0	0	746	2	0	0	0	0	0,0027
Сосна	0	0	0	6 052	43	0	11	0,0039	0,0088
Береза	0	0	0	11	1 844	133	12	0,0664	0,0780
Осина	0	0	0	0	187	795	0	0,1284	0,1904
Травы	0	0	0	10	6	0	1888	0,0031	0,0084

Наилучшим образом удается классифицировать водные объекты, почвы и искусственные объекты. Вероятность ошибки классификации составляет менее 1 %. Отдельные пиксели указанных объектов могут быть ошибочно классифицированы как сосновый древостой. Это видимо происходит из-за наличия спектральных характеристик соответствующих значительным межкроновым промежуткам, характерных для спелых и перестойных древостоев. Вероятность ошибки распознавания сосновых древостоев и луговой растительности также не превышает 1 %. Луговая растительность может быть неверно классифицирована как сосновый или березовый древостой. Можно видеть хорошую различимость хвойных древостоев, мелколиственных древостоев и луговой растительности. Наибольшие ошибки возникают при распознавании осиновых древостоев. Полная вероятность ошибочной классификации менее 5 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-11-00007) и РФФИ (проекты № 14-05-00598 и 14-07-00141).

Список литературы

1. Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest / J. Tian, L. Wang, X. Li [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. № 61. P. 22–31.

2. Assessing the potential of multi-seasonal WorldView-2 imagery formapping West African agroforestry tree species / M. Karlson, M. Ostwald, H. Reese [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. № 50. P. 80–88.

3. Dietterich T.G., Bakiri G. Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes // Journal of Articial Intelligence Research. 1995. Vol. 2. P. 263–286.

4. Комплексирование классификаторов в задаче тематической обработки гиперспектральных аэрокосмических изображений / Е.В. Дмитриев, В.В. Козодеров, А.О. Дементьев, А.Н. Сафонова // Автометрия. 2018. № 3. Р. 3–13.

5. Дмитриев Е.В. Классификация лесного покрова тверской области на основе гиперспектральных аэроизображений // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 22–32.

УДК 556.33: 550.348: 551.524

Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев

Научная станция РАН в Бишкеке, Киргизская Республика
e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОБ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ

Представлен алгоритм совместной обработки геохимических и динамических параметров проб воды в скважинах, температуры атмосферы и сейсмических данных. Результаты анализа наземных и спутниковых экспериментальных данных в период с января 2015 по май 2017 г. позволили выявить аномалии в высокочастотных вариациях рассматриваемых параметров, которые могут служить индикатором подготовки землетрясений энергетического класса $K \geq 10$.

Ключевые слова: алгоритм, программное обеспечение, геохимические и динамические параметры проб воды, температура атмосферы, землетрясения, аномалии.

Введение. Известно, что в основе прогнозных оценок сейсмической опасности лежит представление о динамическом режиме конкретного участка земной коры. И в этом плане широко востребованы результаты исследований физико-химических параметров подземных вод, поведение которых позволяет улавливать аномалии гидродинамических процессов, приводящих к нарушению равновесия самой среды. Сведения о гидрогеологических параметрах в решении задач прогноза землетрясений приводятся во многих работах, в которых показана сходимость между режимом подземных вод и проявлениями сейсмичности [1]. При этом, несмотря на то, что часто максимальные амплитуды эффектов совпадают с периодами активизации сейсмичности, однозначные связи не выявлены, даже когда эпицентры были расположены в районах действующих пунктов мониторинга. Вследствие этого существует необходимость совершенствования методики обработки и интерпретации временных рядов гидрогеологических параметров.

Для реализации идеи комплексного подхода геохимические данные были сопоставлены с вариациями температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы.

Исходные данные. К настоящему времени в Кыргызстане накоплен большой объем данных химических и динамических наблюдений в подземных водах (более 40 лет), которые проводятся на восьми участках с периодичностью один раз в сутки. На основе первичной информации создаются временные ряды, которые сопоставляются с развитием сейсмической обстановки. Обсуждение разработанного алгоритма обработки временных рядов параметров подземных вод проведены на примере данных пункта мониторинга «Джеты-Огуз», характеристики и измеряемые параметры которого приведены в таблице.

Таблица

Характеристики и измеряемые параметры
на пункте мониторинга «Джеты-Огуз»

Скважина (глубина, м)	Геохимические параметры	Динамические параметры
Скважина 6 (163)	T, °C, pH, CO^-_2, HCO^-_3, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^2	T, °C, дебит
Скважина 20 (520)	T, °C, pH, CO^-_2, HCO^-_3, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^2	T, °C, дебит

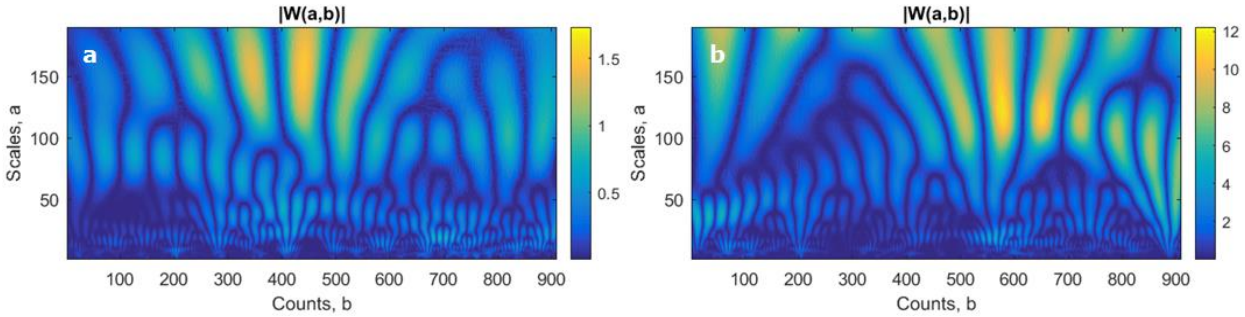
© Свердлик Л.Г., Имашев С.А., 2018

Для анализа временных и высотных вариаций температуры использовались данные спутникового зондирования атмосферы в инфракрасном и микроволновом диапазонах (AIRS/Aqua, MERRA 3D), представленные в системе визуализации и анализа Giovanni [2] на 10 изобарических уровнях от 500 до 70 hPa. Данные восстановлены над участком (78–80 °E и 41–43 °N), центр которого соответствовал расположению пункта отбора проб.

Методика исследований. Вследствие нестационарной и нелинейной природы факторов, влияющих на изменение измеряемых геохимических параметров, классические методики, основанные на анализе стационарных неоднородностей (Фурье-анализ), а также линейных корреляций, не могут дать полной информации об аномальных вариациях, имеющих связь с процессами подготовки землетрясений. Поэтому в настоящей работе приводится алгоритм программного обеспечения «GeoChemistry», позволяющий, используя спектральный анализ на основе аппарата непрерывного вейвлет-преобразования (НПВ), исключить нестационарные крупномасштабные (низкочастотные) компоненты временных рядов геохимических и динамических параметров, связанные с сезонностью и синоптическими процессами, и проанализировать высокочастотные аномалии. Эти шумоподобные сигналы характеризуются, как правило, малой амплитудой и состоят из двух главных составляющих: случайных флуктуаций и всплесков (аномалий), связанных с процессами подготовки землетрясений. Исходя из предположения, что аномалии должны отчетливо выделяться во временных рядах всех параметров и коррелировать между собой при подготовке землетрясений энергетического класса $K \geq 10$ [3], они были объединены с помощью синтетического параметра D, который учитывает суммарный эффект этих аномалий. С использованием пороговой фильтрации во временном ряду параметра D выделялись уровни в пределах доверительного коридора двойного среднеквадратичного отклонения ($\pm 2\sigma$), которые отражают связь параметров термоминеральных вод (ТМВ) с процессами подготовки землетрясений. Аналогичная методика устранения тренда и сезонной составляющей применялась для анализа рядов температуры атмосферы [4; 5]. Все этапы алгоритма выявления аномалий в наборах временных рядов наземных и спутниковых данных приведены в виде блок-схемы на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема алгоритма выявления аномалий в вариациях временных рядов параметров подземных вод и температуры атмосферы (слева – номера этапов)

Результаты применения методики к временным рядам геохимических и геодинамических параметров подземных вод. На рис. 2 представлены абсолютные значения коэффициентов НПВ временных рядов параметров ТМВ. В качестве анализирующей функции выбран вейвлет Морле, который оптимально подходит для выявления низкочастотных и высокочастотных компонент, а также вносит минимальный краевой эффект [6]. Вейвлетограммы позволили выделить скрытые периодичности, в частности проявляются квазистационарные компоненты с периодами в 180–200, 120–150 и 70–80 дней, которые необходимо устранить наряду с низкочастотным трендом.



а *б*

Рис. 2. Коэффициенты НПВ параметров ТМВ: *а* – PH; *б* – CO_2. По оси абсцисс отложен сдвиг по времени с 01.01.2015 по 31.05.2017, по оси ординат – масштабный коэффициент

Принимая во внимание аномальное отклонение от средних значений для всех параметров (*PH*, *T* и содержания CO_2, HCO_3, *Ca*, *Cl*, *Mg*), произведено объединение их в общий временной ряд (*D*), который рассчитывается как сумма отдельных временных рядов нормированных на свои максимальные значения (рис. 3). На рисунке также приведена последовательность энергетических классов землетрясений К, ближайших по времени к моменту появления гидрогеохимических аномалий.

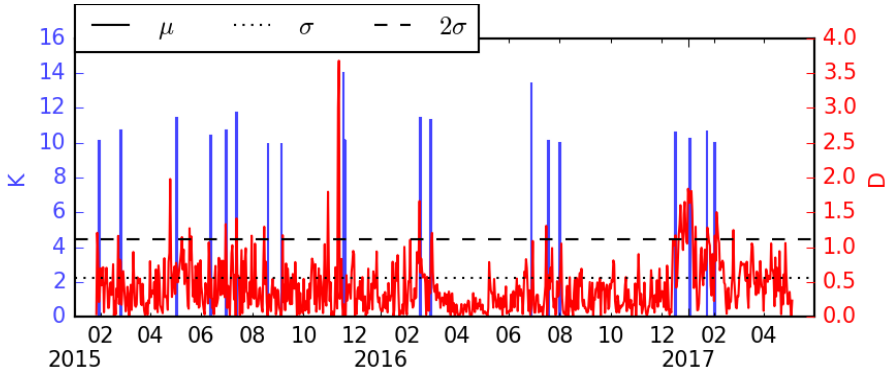
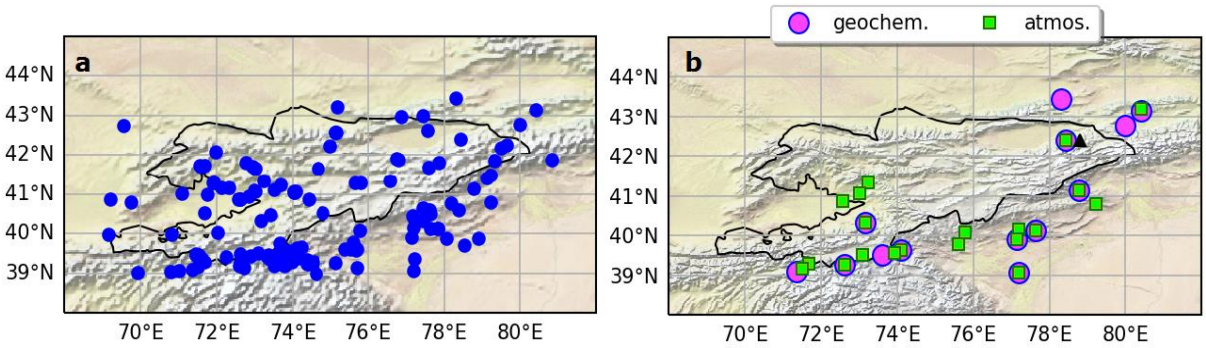


Рис. 3. Интегральный временной ряд вариаций физико-химических параметров проб воды после устранения тренда и периодических составляющих (сплошная линия – среднее значение μ, пунктирная – σ (СКО) и штриховая – 2σ) и энергетический класс землетрясений

Сопоставление пространственного распределения эпицентров всех сейсмических событий, произошедших за рассматриваемый период (рис. 4, *а*), с землетрясениями, выделенными на основе использования интегрированного эффекта аномалий физико-химических параметров ТМВ «Джеты-Огуз» (рис. 4, *б*), можно предположить, что имеет место влияние не только локальных, но и региональных событий. При этом очевидна корреляция аномалий геохимических данных с сейсмическими событиями, эпицентры которых сгруппированы вдоль южной границы Кыргызстана, где простирается активная зона повышенных деформаций, западная часть которой протянулась вдоль границы сочленения Памира с Тянь-Шанем [7]. Таким образом, динамика изменчивости физико-химических параметров ТМВ находится, вероятно, в сильной зависимости от особенностей сложного геологического и деформационного полей в регионе.

Подобное распределение эпицентров было получено при анализе временной динамики аномалий температуры атмосферы (рис. 4, *б*), основанном на выборе из множества региональных сейсмических событий энергетического класса К ≥10 наиболее сильных и близких к месту и времени проявления аномалий.



а *б*

Рис. 4. Сейсмическая активность в период с 01.01.2015 по 31.05.2017. Распределение эпицентров: *а* – всех землетрясений за рассматриваемый период; *б* – землетрясений, ближайших по времени после момента появления аномалий физико-химических параметров проб воды и температуры атмосферы

Заключение. Приведенные результаты анализа геохимических и динамических параметров проб воды в скважинах, температуры атмосферы и сейсмических данных в период с января 2015 по май 2017 г. показали, что использование предложенного алгоритма и технологий обработки позволяют выявить аномалии в высокочастотных вариациях, которые могут служить индикатором подготовки землетрясений энергетического класса К ≥10.

Авторы выражают благодарность сотрудникам NASA GES-DISC за обеспечение свободного доступа к данным спутниковых измерений. Отдельная благодарность заведующей лабораторией Института сейсмологии НАН КР Д.Ж. Кендирбаевой за предоставленные временные ряды физико-химических параметров проб подземных вод.

Список литературы

1. Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М. Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ // Вестн. КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2009. № 13. С. 107–122.

2. The NASA GES-DISC. URL: http://giovanni.gsfc.nasa.gov/.

3. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности. Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 4. С. 9–14.

4. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности // Вестн. Кыргыз.-Рос. славян. ун-та. 2016. Т. 16, № 5. С. 170–174.

5. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности // Журн Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10, № 6. С. 783–793.

6. Gadre V.M., Dimri V.M., Chandrasekhar E. Wavelets and fractals in earth system sciences. Boca Raton. FL: Taylor & Francis Inc., 2014. 286 p.

7. Атлас землетрясений Кыргызстана / З.А. Кальметьева, А.В. Миколайчук, Б.Д. Молдобеков [и др.]. Бишкек: ЦАИИЗ, 2009. 73 с.

УДК 519.688+004.42

О.Э. Якубайлик, А.А. Кадочников, Е.А. Павличенко, В.Ю. Ромасько, А.В. Токарев

ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия
e-mail: oleg@icm.krasn.ru

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПРИЕМА, ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ФИЦ КНЦ СО РАН

Рассматриваются основные проблемы и тенденции в развитии современных систем приема, хранения и оперативной обработки спутниковых данных. Приводятся сведения по техническим характеристикам и возможностям оборудования нового спутникового приемного комплекса ФИЦ КНЦ СО РАН. Представлены результаты выполненных работ по созданию специализированного программного обеспечения для систем оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: спутниковые данные ДДЗ, ДЗЗ, оперативный мониторинг, геопортал, TERRA, MODIS, VIIRS, УниСкан, картографический веб-сервис, веб-картография.

Географические особенности Красноярского края (протяженная территория с разнообразным рельефом и климатом, высокая доля слабо освоенных и труднодоступных зон, большие запасы природных ресурсов и другие факторы) объективно приводят к необходимости использования систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и различных тематических информационных продуктов на их основе. Интеграция получаемых данных ДЗЗ с реальными процессами обеспечения жизнедеятельности органов государственной власти и населения приобретает значение стратегического фактора для дальнейшего ускорения социально-экономического развития Красноярского края.

Одним из этапов решения актуальных задач по обеспечению эффективного использования результатов космической деятельности в Красноярском крае стало приобретение и запуск в эксплуатацию в 2017 г. нового спутникового приемного комплекса ФИЦ КНЦ СО РАН на базе станции УниСкан-36 компании СКАНЭКС, который обеспечивает возможность приема данных ДЗЗ со всех актуальных низкоорбитальных метеорологических спутников среднего пространственного разрешения (TERRA/ AQUA, Suomi NPP/NOAA-20, FengYun-3).

Особенности современных систем дистанционного зондирования Земли. Можно считать, что общая схема организации процессов обработки данных ДЗЗ уже достаточно устоялась; основные блоки включают прием и архивацию, первичную и тематическую обработку [1]. Если на первых этапах развития систем мониторинга при построении конкретной системы в ней приходилось реализовывать все этапы обработки данных ДЗЗ и полностью создавать для этого специальную инфраструктуру, то в настоящее время более эффективным и целесообразным с разных точек зрения считается использования специализированных центров хранения, обработки и анализа данных [2].

Стоит отметить, что в области, связанной с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при решении различных научных и прикладных задач, в настоящее время происходят существенные изменения:

- Резко возросли возможностях спутниковых систем ДЗЗ; за счет увеличения числа космических аппаратов ДЗЗ стало возможно организовывать мониторинг

© Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Павличенко Е.А., Ромасько В.Ю., Токарев А.В., 2018

быстро протекающих процессов. За последние 4 года число спутников увеличилось на порядок, возросла доступность данных высокого разрешения (до 3 м/пиксел).

- Возросло число спутниковых систем ДЗЗ, обладающих «измерительными» свойствами, т.е. обеспечивающих получение не только качественной, но и хорошо калиброванной количественной информации о различных объектах, процессах и явлениях.
- Повысился уровень доступности информации. Данные многих спутниковых систем стали свободно распространяться – как через сеть Интернет, так и непосредственно со спутников, в незашифрованном виде.
- Значительный рост объемов спутниковой информации и развитие требований и стоимости систем их приема и первичной обработки привели к усилению тенденции перехода от использования персональных систем обработки ДЗЗ к сервис-ориентированным решениям на основе региональных специализированных центров ДЗЗ.

Наряду с экстенсивным развитием спутниковых систем ДЗЗ в последнее десятилетие наблюдается и достаточно резкий рост объемов спутниковых данных, получаемых с отдельных космических аппаратов, а также номенклатуры и суммарных объемов информационных продуктов, формируемых на основе обработки этих данных, т.е. скорость роста объемов информации превышает скорость роста числа систем ДЗЗ. Так, например, объемы архивов данных ДЗЗ в NASA и NOAA, накапливаемые за год, увеличились более чем на порядок: от почти 1 Петабайта в 2000 г. до более 10 Петабайт в 2011 г., хотя число спутников ДЗЗ увеличилось за это время не более чем в 6 раз. Ввод новых данных ДЗЗ в систему архивации в 2018 г. по планам NOAA составит 20 петабайт/год, а общий их объем – более 100 Петабайт. При этом объем данных из расчета на один спутник вырастет в 100 раз. Аналогичные планы по наращиванию группировки ДЗЗ и быстрому росту объемов информации ДЗЗ приняты к реализации и в России (Федеральная космическая программа России на 2016–2025 гг.).

Источники данных современных систем дистанционного зондирования Земли. Оборудование современных систем ДЗЗ традиционно строится вокруг главных источников данных ДЗЗ. Получать данные ДЗЗ можно 1) по заказу у официальных поставщиков данных ДЗЗ (как правило, это данные высокого пространственного разрешения), 2) по Интернету из бесплатных источников и, наконец, 3) непосредственным приемом данных со спутников, работающих в режиме вещания. Бесплатная информация низкого и среднего разрешения, а иногда, в последнее время, и высокого, большей частью доступна для скачивания с официальных ресурсов, например, таких как сервис USGS Earth Explorer Геологической службы США. Этот способ получения данных в нашей стране постепенно принимает все большее значение, по мере роста скорости и удешевления доступа в Интернет. Однако через подобные сервисы не все спутниковые данные доступны, особенно это касается новых и развивающихся систем. Другой проблемой являются задержки в обработке данных – они не всегда обрабатываются достаточно оперативно. Этот фактор может стать принципиальным для задач типа оперативного мониторинга паводков или пожаров. Неприятной, теоретически возможной перспективой таких сервисов является введение платы за использование, пусть и небольшой, но которая полностью может поменять принципы финансового обеспечения работ по обработке данных ДЗЗ.

Проведенный анализ показал, что самым оперативным и надежным вариантом получения данных среднего и низкого разрешения, является собственная (или доступная партнерская) станция приема космической информации. Из существующих стандартов передачи данных в диапазонах 137 МГц, 1,7 и 8 ГГц последний позволяет передавать максимальный объем информации за сеанс. В зависимости от диаметра антенны, числа частот приема (приемников) и типа фазовой модуляции такая станция способна принимать до 320 Мбит/с [2]. С учетом высоты орбиты полярно-орбитальных спутни-

ков порядка 800 км и полосы захвата 2–3 тыс. км зона обзора такой станции представляет из себя приблизительно эллипс размером 5 на 8 тыс. км, вытянутый по долготе. Для станции, расположенной вблизи географического центра России – в Красноярске, обеспечивается обзор приблизительно 80 % территории России дважды в сутки с каждого принимаемого аппарата. Именно такая станция диапазона 8 ГГц и составляет основу спутникового приемного комплекса ФИЦ КНЦ СО РАН.

Организация обработки и визуализации спутниковых данных. Схема сформированной программно-аппаратной структуры обработки данных ДЗЗ состоит из трех логических групп серверов – приемных, предварительной обработки и тематической обработки, а также автоматизированных рабочих мест интерактивной тематической обработки данных ДЗЗ (рис. 1). Системы хранения данных ДЗЗ, которые характеризуются большими суточными и сеансовыми объемами, интегрированы в сервера этих логических групп. Разделение серверов и процессов на эти три группы логически вытекает из особенностей каждой группы процессов приема и обработки.

Группа серверов приема данных выделена по причине работы в режиме реального времени в моменты приема данных по радиоканалу и поэтому не нагружается никакими дополнительными нагрузками по обработке. Задача серверов этой группы: принять и записать без потерь на дисковую память весь поток данных со всех сеансов.

Группа серверов предварительной обработки включает процессы географической привязки и радиометрической калибровки принятых данных. Она логически обособлена т.к. процессы предварительной обработки обязательны для всех космических систем ДЗЗ и выполняются в первую очередь, а также в связи с тем, что они реализуются на программном обеспечении, специфичном для каждой системы ДЗЗ, которое предоставляется разработчиками этой системы.

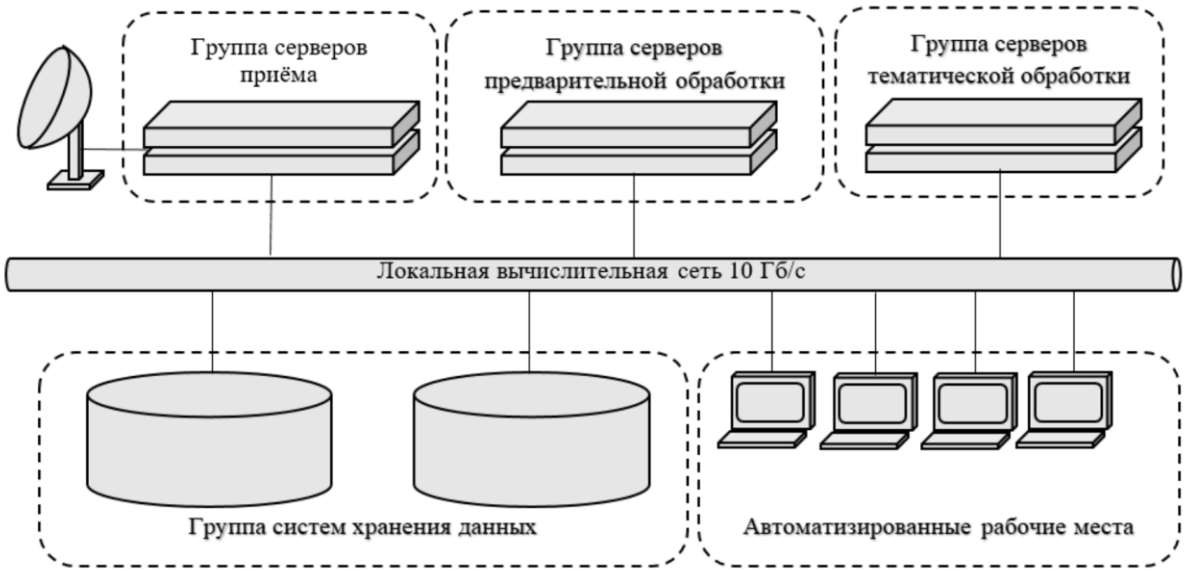


Рис. 1. Схема аппаратно-программного обеспечения спутникового приемного комплекса

Третья группа серверов тематической обработки, собственно, и производит целевую обработку данных с получением конечной полезной информации для потребителей. В эту группу попадает, в том числе, тематическое программное обеспечение собственной разработки ФИЦ КНЦ СО РАН. Процессы обработки здесь более однородны и согласованы, а также наиболее часто меняются вследствие разработки новых версий или приложений. В состав этой группы включен в том числе веб-интерфейс, построенный на основе геопортальных технологий, как главная точка доступа потребителей к информации ДЗЗ.

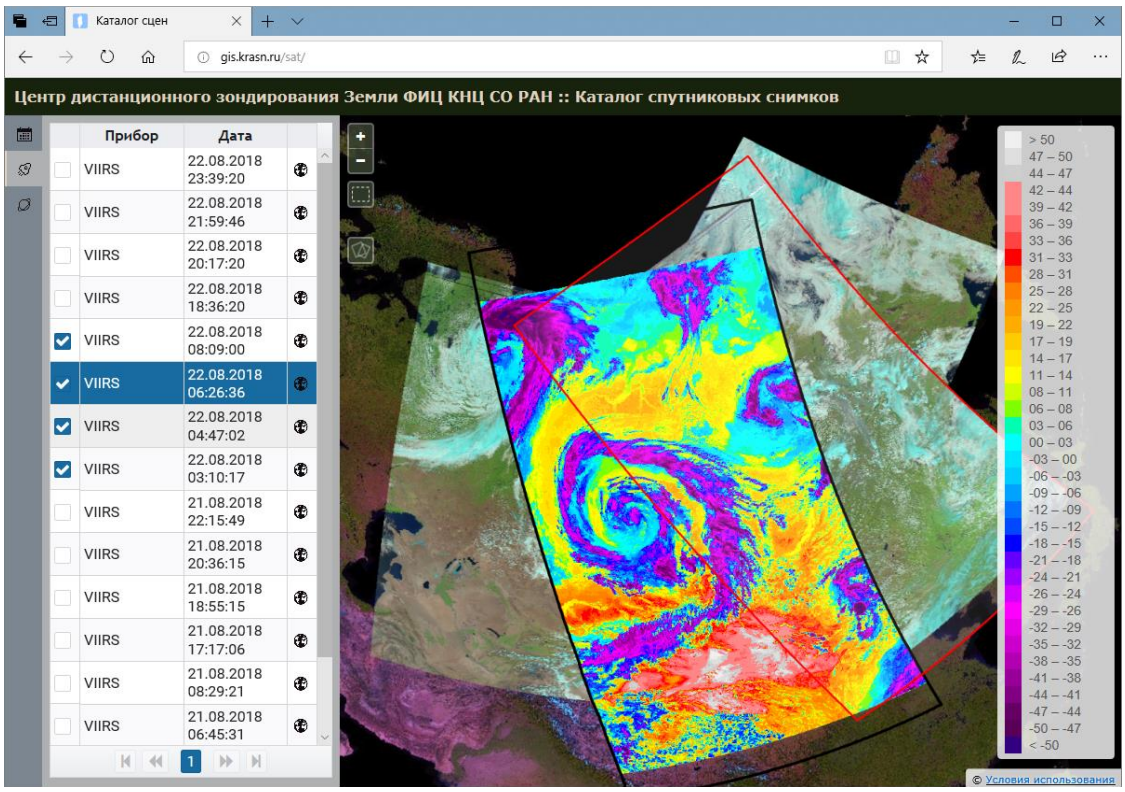


Рис. 2. Данные радиометра VIIRS NOAA-20 за 22.08.2018 г. (4 дневных витка);
на выбранной сцене показана температура, построенная по каналу ИК-диапазона, ºС

Система веб-визуализации данных ДЗЗ, принимаемых спутниковым приемным комплексом ФИЦ КНЦ СО РАН (Каталог спутниковых снимков) разработана на основе набора тесно взаимосвязанных программных компонент, в том числе – база данных PostgreSQL с модулем расширения PostGIS; веб-сервер Apache; геоинформационная платформа Mapserver/Mapscript, обеспечивающая растеризацию геоданных и картографические веб-сервисы; подсистема кэширования пространственной информации на основе GeoWebCache; клиентское программное обеспечение для картографической веб-визуализации, разработанное на основе библиотеки OpenLayers и ряда других компонент [3-5]. Создан ряд вспомогательных ресурсов – базовая карта (подложка) на основе открытых данных Landsat и Sentinel, слой меток/населенных пунктов/границ для отображения «поверх» снимков. Для каждой принятого спутникового снимка TERRA/AQUA, Suomi NPP/NOAA-20 генерируется набор мультимасштабных многоканальных «квик-луков» («популярные» комбинации каналов, температура, NDVI) для практически мгновенного отображения информации на веб-странице. Картографический веб-интерфейс предоставляет пользователю большой набор возможностей по визуализации данных ДЗЗ (рис. 2).

Заключение. Наблюдаемый в настоящее время значительный рост объема спутниковых данных приводит к необходимости развития методов и технологий построения систем приема, хранения и обработки спутниковой информации. Анализ существующих решений и собственный опыт исследований и разработок показывает, что одним из наиболее перспективных подходов в создании систем указанного типа является реализация комплекса взаимосвязанных автономных функционально-ограниченных компонент, взаимодействующих между собой в сервис-ориентированной архитектуре, с интерфейсом пользователя, построенном на основе технологий геоинформационных веб-систем.

Список литературы

1. Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives / A.V. Kashnitskii, E.A. Lupyan, I.V. Balashov, A.M. Konstantinova // Atmospheric and Oceanic Optics. 2017. Vol. 30, № 1. P. 84–88.

2. Digital Earth 2020: Towards the vision for the next decade / M. de Bie Craglia, K.D. Jackson, M Pesaresi, [et al.] // Int. Journal of Digital Earth. 2012. Vol. 5, № 1. P. 4–21.

3. Yakubailik O.E., A. Kadochnikov A.A., Tokarev A.V. Applied software tools and services for rapid web GIS development // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2015 Conference Proceedings. 2015. Book 2. Vol. 1. P. 487–494.

4. Кадочников А.А., Якубайлик О.Э. Сервис-ориентированные веб-системы для обработки геопространственных данных // Вестн. НГУ. Серия «Информационные технологии». 2015. № 1. С. 37–45.

5. Якубайлик О.Э. Технологии формирования интерактивных тематических карт на геопортале // Вестн. компбютерных и информационных технологий. 2017. № 4 (154). С. 23–28.

УДК 528

Wenjian Ni

The Instiute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences
e-mail: niwj@rad.ac.cn

BRIDING SCALE GAPS BETWEEN FIELD SAMPLING AND REGIONAL MAPPING OF FOREST ABOVEGROUND BIOMASS

The accurate regional maps of forest aboveground biomass (AGB) is needed to meet requirements of researches on global climate changes. Several large-scale maps of forest AGB have been released. One of the biggest challenges to the credibility of these maps comes from the scale gaps between the size of field sampling plots used to develop estimation models and the pixel size of these maps and the availability of field sampling plots with sufficient size for the verification of these products. In this study, the forest AGB map of northeast China were produced using ALOS/PALSAR data taking TanDEM-X data as a bridges.

Keywords: forest aboveground biomass, regional mapping, SAR, InSAR.

Introduction. The accurate regional or even global maps of forest aboveground biomass (AGB) are needed to meet requirements of researches on global climate changes. Several large-scale maps of forest AGB have been released [1–3]. However, these existing global or regional datasets were only approximations based on combining land cover type and representative values instead of measurements of actual forest aboveground biomass or forest heights [5]. Rodríguez-Veiga *et al* [6] reported obvious discrepancies of existing forest biomass stock maps with in-situ observations in Mexico.

One of the biggest challenges to the credibility of these maps comes from the scale gaps between the size of field sampling plots used to develop estimation models and the pixel size of these maps and the availability of field sampling plots with sufficient size for the verification of these products [4]. It is time-consuming and labor-intensive to collect sufficient number of field sampling data over the plot size the same as resolutions of regional maps. The smaller field sampling plots cannot fully represent the spatial heterogeneity of forest stands as shown in Fig. 1. What measured in field sampling is trees other than forest. What observed by remote sensing with coarse spatial resolution is forest other than trees. The measurements of small field sampling plots cannot be directly used for Regional/Global mapping.

© Wenjian Ni, 2018

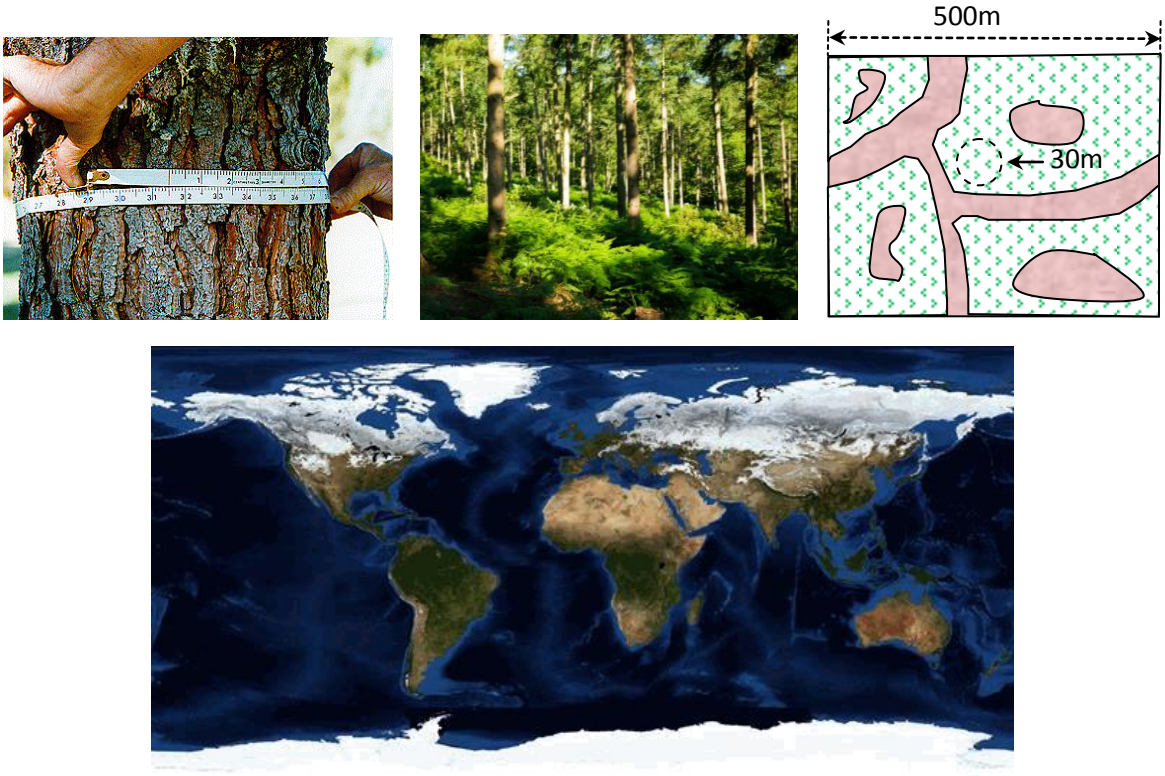


Fig. 1. Scale gaps between the size of field sampling plots
and resolutions of regional forest AGB maps

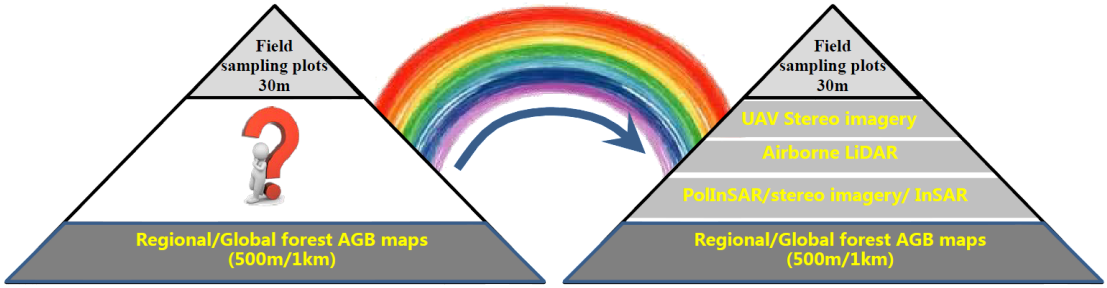
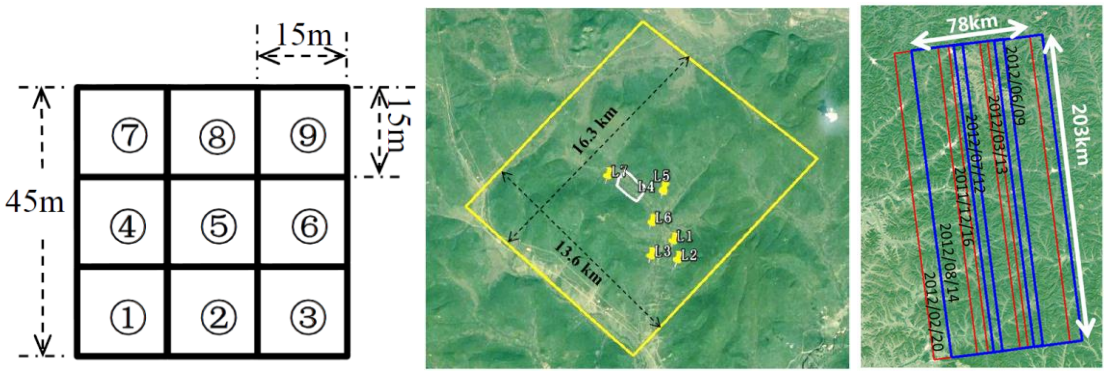


Fig. 2. Possible datasets could be used as a ladder to bridge scale gaps

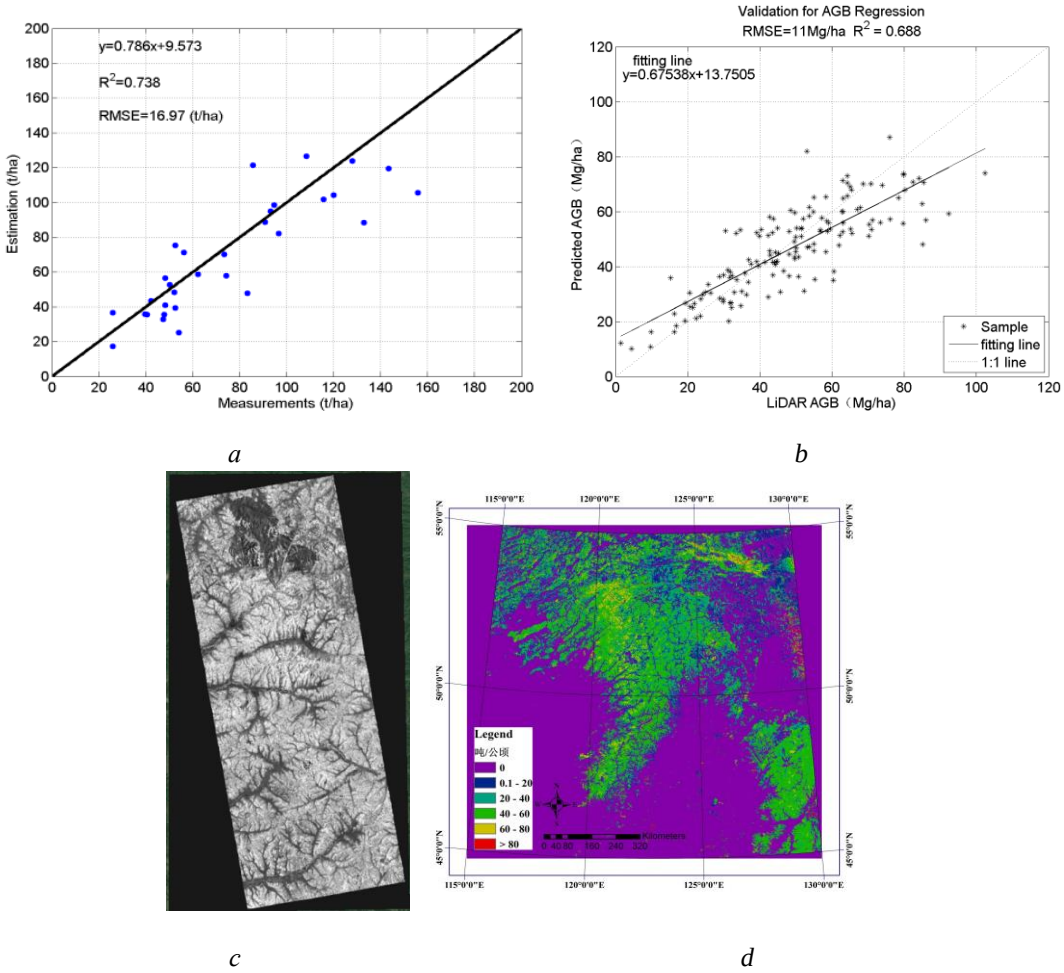


a *b* *c*

Fig. 3. Size of field sampling plots (*a*); positions of field sampling plots within the coverage
of airborne LiDAR data (*b*); Spatial and temporal coverage of Tandem-X data,
the white rectangle indicates of coverage of LiDAR data (*c*)

Method. Theoretically, forest AGB is directly determined by forest heights, diameter at breast height (DBH) of each tree, forest density and tree species. What measured in the field sampling are also the geometrical characteristics of forest stands including the DBH, tree heights and forest densities. Therefore, the remotely sensed dataset, which is capable of direct measurements of forest spatial structures, may serve as a ladder to bridge the scale gaps between the pixel size of regional maps of forest AGB and field sampling plots.

The LiDAR data is considered as the best dataset for the estimation of forest AGB which can directly capture geometrical features of forest stands by its range detection capabilities. Besides, UAV stereo imagery, spaceborne stereo imagery, PolInSAR and InSAR also could be used to measure forest spatial structures as shown in Fig. 2. This study assessed the feasibility to use airborne LiDAR and multi-temporal Tandem-X data as a ladder to make regional maps of forest AGB using field measurement of sampling plots.



a *b*

c *d*

Fig. 4. Regional mapping of forest AGB using ALOS/PALSAR data taking LiDAR data and multi-temporal Tandem-X data as a ladder: *a* – assessment of estimation model of forest AGB using LiDAR data; *b* – assessment of estimation model of forest AGB using Tandem-X data; *c* – forest AGB map of Tandem-X; *d* – Regional forest AGB map of ALOS/PALSAR

The field sampling was carried out between August 10th and August 15th, 2013 over plots with size of 45×45 m each plot was divided into subplots with a size of 15×15 m and subplots were numbered serially as shown in Fig. 3, *a*.

There were totally 63 subplots from 7 sampling plots. All subplots were numbered from 1 to 63 according to their serial number within each plot and the serial number of each plot. The 32 subplots with odder numbers were used to develop estimation model of forest AGB and the rest 31 subplots were used for model validation.

The LiDAR system onboard Yun-5 aircraft was the Leica ALS60 system working at 1064 nm and 186 kHz pulse rate at 1800 m above ground level. The LiDAR data used in this study was collected from August 30th to September 14th, 2012 with a point density of about 2~4 points/m^2.

Results. The forest AGB is firstly mapped with a resolution of 15m using the CHM from airborne LiDAR data based on the field measurements. The estimation model is assessed as shown in Fig. 4, *a*. The difference between Tandem-X DSM acquired in summer and those in winter is extracted based on the accurate co-registration. Then sampling plots with a size of 50m are selected from LiDAR AGB map to develop the estimation model of forest AGB using the difference of Tandem-X DSM. Fig. 4, *b* shows the model assessment. It is clear that the difference of Tandem-X DSMs is highly correlated with LiDAR AGB. Fig. 4, *c* is the forest AGB map generated by the difference of Tandem-X DSM.

Sampling plots with a size of 500m are further selected from forest AGB map of Tandem-X to develop estimation model of forest AGB using ALOS/PALSAR backscattering image acquired in 2010. Fig. 4, *d* is the regional forest AGB map generated using ALOS/PALSAR backscattering image.

Conclusion. Results showed that the difference of multi-temporal Tandem-x DSM could be used as a kind measurement of forest spatial structures. Therefore, it could be used a ladder to bridge the scale gaps between field sampling plots and pixel size of regional forest AGB maps.

This work was supported in part by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB733401, 2013CB733404) and in part by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41471311, 41371357, 41301395).

Список литературы

1. Mapping US forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information / J.A. Blackard, M.V. Finco, E.H. Helmer [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. P. 1658-1677.

2. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps / A. Baccini, S.J. Goetz, W.S. Walker [et al.] // Nature Climate Change. 2012. Vol. 2. P. 182–185.

3. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents / S.S. Saatchi, N.L. Harris [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2011. Vol. 108. P. 9899–9904.

4. Mapping and spatial uncertainty analysis of forest vegetation carbon by combining national forest inventory data and satellite images / G.X. Wang, T. Oyana, M.Z. Zhang [et al.] // Forest Ecology and Management. 20009. Vol. 258. P. 1275–1283.

5. Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements / F.G. Hall, K. Bergen, J.B. Blair [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. P. 2753–2775.

6. Magnitude, spatial distribution and uncertainty of forest biomass stocks in Mexico / P. Rodríguez-Veiga, S. Saatchi, K. Tansey, H. Balzter // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 183. P. 265–281.

Секция

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 711.1

Д.М. Астанин

Череповецкий государственный университет, Череповец, Россия
e-mail: montenegro.astanin@mail.ru

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ НА ПРИМЕРЕ КОНЦЕПЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Экспоцентр «Заповедники России» по поручению Президента РФ разработает интернет-портал, посвященный экотуризму в России (Красноярский экономический форум 2018, информационное агентство России ТАСС, 14 апреля 2018 г.).

Главным недостатком российского туризма (и туризма развивающихся стран) является низкий уровень экологического просвещения и технической оснащенности. Решить данную проблему можно с помощью междисциплинарного подхода, основанного на пространственно-временной оценке туристско-рекреационных ресурсов с последующим выделением узловых структур туристического каркаса территории. На их основе рекомендуется размещать станции сбора и обработки данных дистанционного зондирования для снабжения потребителей (туристов, особо охраняемых природных территорий (ООПТ), природоохранных организаций) достоверной информацией о наиболее изменчивых компонентах климата. Данное условие особенно актуально для территории России, которая характерна огромными неосвоенными пространствами и большими перепадами температур воздуха.

Ключевые слова: метапоисковая система, каркасная система, ООПТ, БПЛА, пространственно-временная оценка туристско-рекреационного потенциала, иерархия туристско-рекреационных ресурсов, дистанционное зондирование, региональное управление, экологический мониторинг, оптимальный маршрут.

Туризм – как международный, так и внутренний – сфера растущего применения информационных технологий. На сегодняшний день туристическая индустрия все больше и больше подвергается полной компьютеризации. Большинство систем бронирования поддерживают существующий спрос на мировые гостиничные сети, но не формируют новый спрос. Возможности рынка бронирования, как и мозг человека, не использованы и на 10 %. Объекты в туристских системах бронирования представлены хаотично, на основе рекламных контрактов. Существующая застройка туристских комплексов очень часто не имеет генеральных планов, наносит существенный вред состоянию окружающей среды. Необходима система перераспределения туристских потоков; система, позволяющая использовать в полной мере огромный эколого-культурный потенциал России. Решить подобную сверхзадачу могла бы Концепция глобального ин-

© Астанин Д.М., 2018

формационного обеспечения туристско-рекреационной деятельности, основанная на сборе и обработке данных дистанционного зондирования.

Объект исследования. Концепция предполагает создание интернет-портала (телеканала, метапоисковой системы), оказывающего комплексные услуги по обеспечению информацией об отдыхе потребителей. Характеристиками туристической услуги являются: непостоянство качества, неосязаемость, несохраняемость. Портал направлен на уменьшение неопределенности, связанной с данными характеристиками. Улучшение качества (т.е. степени удовлетворенности потребителей) может произойти за счет более полной информированности о предстоящем туре, достигаемой за счет покомпонентной оценки туристско-рекреационных ресурсов, определения пространственно-временных характеристик климатических условий.

Материалы и методы. Для успешной реализации стратегии необходима координация всех участников природоохранного и туристско-рекреационных процессов, поэтому актуальность и задачи следует дифференцировать по управленческим уровням:

Актуальность 1-го уровня (экспертное сообщество): слабый (по состоянию на 2018-й и все предыдущие годы после распада СССР) уровень взаимодействия (во множестве научных дисциплин) экспертного сообщества с исполнительной и законодательной властью.

Актуальность 2-го уровня (государственное регулирование, дистанционное зондирование): система продаж национальных товаров, повышение технологического уровня отрасли, формирование спроса на внутренний туризм, привлечения трудовых ресурсов в сельскую местность.

Актуальность 3-го уровня (бизнес-сообщество): незанятые ниши, завершение автоматизации бронирования, инновационные технологии.

Актуальность 4-го уровня (конечный потребитель): вариативность системы бронирования, экотуристическое, культурно-историческое просвещение, охрана и мониторинг ООПТ.

Задачи 1-го уровня (экспертное сообщество):

1) определить особенности функционально-планировочной организации туризма, основанного на принципах экологической устойчивости [1];

2) произвести покомпонентную оценку природного и культурно-исторического потенциала исследуемых регионов на основе каркасных систем [2; 3];

3) определить экотуристическое районирование исследуемых регионов [1; 2];

4) определить теоретические принципы построения тематической метапоисковой системы экологического туризма;

5) провести философский анализ проекта. Применение концепции информационной системы «ноосфера: природа – человек», основанной на исследованиях В.И. Вернадского.

Задачи 2-го уровня (государственное регулирование).

1. Применение данных дистанционного зондирования:

- 1-й уровень. Регион. Масштаб № 1. БПЛА самого широкого ареала действия: в пределах нескольких сотен км;
- 2-й уровень. Рекреационная зона. Масштаб № 2. Применение БПЛА 2-го ареала действия: диаметр зоны полетов – до 100 км;
- 3-й уровень. Агломерация. Масштаб № 3. БПЛА 3-го радиуса действия: диаметр зоны полетов – до 50 км;
- 4-й уровень. Туристско-рекреационный район. Масштаб № 4. БПЛА 4-го радиуса действия: диаметр зоны полетов – до 20 км.

Различие в характере расположения ресурсов должно отражаться и в характере движения БПЛА с целью увеличения качества видео-трансляции и фотосъемки.

2. Определение благоприятности зон для различных видов туризма (балльное и относительное), определение туристических связей, особенно актуально в зимних условиях слабозаселенных туристических местностей, способствует технической модернизации самодеятельного туризма, территория которой характеризуется огромными перепадами температур (автоматический выбор альтернатив туристических маршрутов).

3. Каркасное распределение туристических зон [2] увеличивает вариативность и информативность услуг бронирования, учитывает психофизический характер личности туриста.

4. Мультипликативный эффект от реализации концепции:

1) многократное увеличение базы туристических ресурсов благодаря определению узловых структур территориальных каркасов и иерархии экопросветительских учреждений. Использование туристического потенциала сельских, слабозаселенный местностей;

2) выполнение функций телеканала методом трансляции труднодоступных туристических объектов и ООПТ с помощью БПЛА и видеорегистраторов; применение данных дистанционного зондирования для представления информации потребителю о туристско-рекреационных ресурсах.

Таблица 1

Технологическая схема конечного продукта: интернет-портал
(телеканал, метапоисковая система) объектов экологического и сельского туризма

Меню 1-го уровня

Бронирование	Геололокация	Каркасы	Дистанционное зондирование	Дроны

Меню 2-го уровня

Гостиницы	РФ	Туристско-рекреационный	Памятники природы
Базы отдыха		Экологический	Национальные парки
Кафе		Экокультурный	Автомагистрали
Авиатранспорт		Транспортный	
Автотранспорт			
ЖД-транспорт			
Водный транспорт			

Меню 3-го уровня

Предприятия туристического сектора	Туристические районы и зоны	Предприятия туристического сектора	Id-номер дрона/ видеорегистратора

Меню 4-го уровня

Id-номер бронирования	Id-номер туристического маршрута	Id-номер бронирования	Id-номер фотографии/ видеофайла

Меню 5-го уровня

Закрытый каталог сайтов экотуристической тематики

Меню 6-го уровня

Метапоисковая система экологического и сельского туризма

Меню 7-го уровня

Глобальная информационная сеть «Природа – Человек» (практическое воплощение теоретических изысканий В.И. Вернадского)

Многие транснациональные корпорации (такие как Google и Facebook) активно ведут исследования потенциальных возможностей применения данных дистанционного зондирования с БПЛА. Однако в проектных решениях отсутствуют задачи приспособления к характеру местности, БПЛА размещаются по квадратной сетке координат, следовательно, потенциал земной поверхности используется крайне неэффективно.

Таблица 2

SWOT-анализ существующих проектных решений

ТЭП проектного решения	Google Project Loon	Facebook. Titan-Aerospace	Концепция глобального информационного обеспечения туристско-рекреационной деятельности
1. Размещение БПЛА согласно ландшафтным характеристикам поверхности			+
2. Учет психофизических особенностей пользователей			+
3. Учет погодных условий	+	+	+
4. Автоматический выбор тура с учетом состояния атмосферы			+
5. Определение благоприятности зон туризма			+
6. Бронирование			+
7. Предоставление справочной информации	+	+	+
8. Просветительские функции	+	+	+

Заключение. В результате реализации Концепции глобального информационного обеспечения туристско-рекреационной деятельности будут достигнуты следующие результаты:

1) повышение качества предоставляемых туристических услуг на рынке Российской Федерации и вне ее путем предоставления более качественной и своевременной информации, касающейся туризма;

2) привлечение туристического потока со всего мира на территорию РФ;

3) техническая модернизация туристической отрасли РФ;

4) поддержание концепции организации системы продаж национальных товаров;

5) формирование нового спроса на внутренний туризм, увеличение существующих объемов спроса.

Список литературы

1. Астанин Д.М. Планировочная структура экологического туризма Красноярского края. Архитектон // Изв. вузов. Екатеринбург. 2013. № 43. URL: http://archvuz.ru/2013_3/10.

2. Астанин Д.М. Использование каркасного метода в планировании и функциональном зонировании территорий, благоприятных для организации экотуризма (на примере Центральной части Восточного Саяна) // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 2017. № 3. С. 51–60.

3. Астанин Д.М. Пространственная структура познавательного туризма Красноярского края // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия «Техника и технологии». Т. 6, № 6. Красноярск. 2013. С. 721–736.

УДК 528.8.04, 528.88

Б.И. Борде

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: bborde@sfu-kras.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КАМПУСА

Традиционной является отраслевая подготовка бакалавров по направлениям со специализацией в узких предметных областях и использованием специализированных систем автоматизированного проектирования (САПР). Развитие информационных технологий привело к появлению комплексных САПР и сетевых сервисов для создания объектов и целых кампусов.

Ключевые слова: программный комплекс автоматизации проектирования, информационные модели кампусов, производительность труда инженера.

Появление комплексных систем автоматизированного проектирования (САПР) для проектирования неподвижных и мобильных объектов, и стандартов их представления привело к созданию новых инструментальных средств [1; 2; 4–6]. Проектирование здания начинается с анализа участка и возможных внешних воздействий. В соответствии с основной функцией и критериями эффективности выбирается площадь и этажность здания. Проектируется конструкция здания с учетом энергоэффективности. Размещается основное оборудование здания в соответствии с нормами. Затем производится трассировка соединений для всей системы и ее моделирование.

Вычислительная сеть может находиться в здании или на открытом пространстве. Для неподвижных объектов, например зданий, подходит среда Autodesk REVIT [6] и отечественная АСКОН RENGA с возможностью автоматического размещения в помещениях сетевых рабочих мест в соответствии с нормами. Управление климатом в компьютерных классах может выполняться стандартными устройствами или разработанными студентами ИКИТ СФУ системами на базе однокристальных микроконтроллеров INTEL QUARK D2000.

Кампус университета состоит из множества зданий, дорог и подземных коммуникаций и является объектом более высокого уровня со средой Autodesk INFRAWORKS. Кампус университета является частью объекта город. Процесс проектирования моделей начинается с нижнего уровня и заканчивается верхним, но является итерационным до удовлетворения требований задания.

Проектирование в среде САПР может выполняться инженерами с помощью команд. В САПР REVIT могут работать различные специалисты: архитекторы, конструкторы и системотехники – специалисты по инженерным системам. Инженеры являются творческими личностями и при проектировании с помощью команд трудно достичь повторяемости результатов. Повышение производительности труда инженеров и повторяемости результатов можно достичь при автоматическом выполнении проектных процедур. Для создания проектных процедур в комплексных САПР появились унифицированные языки типа NetScriptCAD [3–6], а в INFRAWORKS встроен язык Java Script (JS). Для конкретного объекта можно создать модуль проектирования с координатами в системе LL84. Для многократного использования процедур координаты объекта нужно вынести в отдельные текстовые файлы, именуемые в соответствии с типом объекта и вариантом размещения. Многовариантное проектирование позволяет проводить оптимизацию. Примеры имен процедур для INFRAWORKS приведены в табл. 1 и 2.

© Борде Б.И., 2018

Таблица 1

Процедуры проектирования ИМ университетских кампусов

Наименование процедуры	Назначение	Параметры
Main.js	Главная процедура	Тип объкта
Build.js	Размещение объектов из подкаталога RVT	Имя, типы координат центра и размеры
Road.js	Чтение и размещение центров концов участков дорог в соответствии с их стилями.	
Pipe.js	Чтение и размещение центров концов участков трубопроводов в соответствии с их стилями.	

Таблица 2

Координаты проектирования ИМ университетских кампусов

Наименование файла	Назначение	Примечание
SFU2Main.txt	Координаты границ кампуса	
SFU2Build.txt	Координаты центров объектов из RVT	
SFU2Road.txt	Координаты центров концов участков дорог в соответствии с их стилями.	
SFU2pipe.txt	Координаты центров концов участков трубопроводов и их стили	

Процедуру Pipe.js можно использовать для чтения файлов координат концов участков трубопроводов горячей и холодной воды, канализации, а также для размещения других линейных объектов. Такими объектами являются сильноточные и слаботочные кабельные системы, проводные компьютерные сети.

Результаты проектирования в INFRAWORKS сохраняются в двух файлах с расширениями sqllite и files, последний из которых занимает значительный объем. Проектирование производится из клиентской части и серверной системы, установленной в Autodesk [6]. В ряде случаев нет смысла хранить результат, а лучше выполнить процедуры заново. Сервис доступен после регистрации на Autodesk.

Таблица 3

Основные объекты ИМ университетского кампуса СФУ

Наименование файла	Назначение	Примечание
SFU2G2017.rvt	Главный корпус политехнического института	
SFU2B2014.rvt	Корпус института инженерной физики и радиоэлектроники СФУ	ул. Киренского, 28, корпус № 12Б
SFU2D2017.rvt	Корпус факультета энергетики ПИ СФУ	ул. Киренского, 26а, корпус № 15Д
SFU2J2017.rvt	Корпус института космических и информационных технологий СФУ	ул. Киренского, 26б, корпус № 17Ж
SFU2V2017.rvt	Корпус факультета транспорта ПИ СФУ	ул. Борисова, 20, корпус № 13В
SFU2H52017.rvt	Общежитие 5	ул. Борисова, 24
SFU2H82017.rvt	Общежитие 8	ул. Борисова, 6
SFU2H112017.rvt	Общежитие 11	ул. Борисова, 22

Сначала создается каталог проекта информационной модели (ИМ) [6] кампуса. Для основных объектов формируется подкаталог RVT, в который загружаютя ИМ зданий и других объектов. Вся информация должна находиться внутри каталога кампуса для возможности относительной адресации. Имя информационные модели образуется из имени объекта и года использованного программного комплекса для создания ИМ.

Для быстрой проверки достоверности координат объектов можно воспользоваться коробочными моделями и только после проверки переходить к полноценным моделям в Revit с точками примыкания коммуникаций. Многовариантное проектирование достигается за счет управления текстовыми файлами координат объектов.

Важным и трудоемким является проектирование зеленых зон. Для этого сформирована универсальная процедура Park.js. Задаются координаты точек излома периметра парка, координаты границ пешеходных зон со скамейками для отдыха и мусорницами. Для этого создано дополнение библиотеки компонент, включая деревья и кустарники, размещение которых производится по определенным правилам и нормам. Необходима современная система автоматического полива.

Заключение. Развитие информационных технологий и комплексных САПР позволило создать комплексные информационные модели объектов (ИМ). Информационные модели должны сопровождать объекты на всех стадиях жизненного цикла. Необходимо перейти от узкоспециализированной подготовки инженеров к подготовке специалистов по инженерным системам. Предложены методы автоматизации создания ИМ объектов и повышения производительности труда инженеров.

Список литературы

1. Основы автоматизированного проектирования: учебник / под ред. А.П. Карпенко. М.: ИНФРА-М, 2015. 329 с.

2. Артамонов Е.И. Структурное проектирование систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 2. С. 3–10.

3. Борде Б.И. Основы САПР неоднородных вычислительных устройств и систем. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. 352 с.

4. Борде Б.И. Основы САПР неоднородных вычислительных устройств и систем: программно-метод. комплекс. Красноярск: КГТУ, 2008.

5. Борде Б. И. Сетевые сервисы проектирования неоднородных вычислительных систем // Тр. междунар. конф. CAD/CAM/PDM – 2012. М.: ИПУ РАН, 2012 С. 242–244.

6. Autodesk: офиц. сайт. URL: http://www.autodesk.ru.

УДК 004.42, 004.51

Р.В. Брежнев, А.А. Перевалова

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,
e-mail: brejnev.ruslan@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрена проблема построения алгоритмических последовательностей этапов работы с разнородными пространственными данными в распределенной программно-аппаратной среде. Предлагается технология гибкого создания и настройки информационно-вычислительных процессов, включающих распределенные функциональные компоненты, предназначенные для получения, хранения, обработки, анализа и визуализации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и производных картографических продуктов. Технология ориентирована на уровень использования оператора и не предполагает внедрения в программный код при построении процесса. Объектом исследования выступает программно-аппаратный комплекс геоинформационной системы агромониторинга Сибирского федерального университета (ГИС СФУ). Предметом исследования являются методы функционального проектирования и описания бизнес-процессов, применяемые в концепции Workflow.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, информационно-вычислительный процесс, рабочий процесс, workflow, методология функционального моделирования, оператор, геоинформационная система, веб-ГИС.

Введение. Потребность в формализации описания рабочих процессов в разных областях деятельности вызвана рядом факторов: высокой сложностью работ, требующих оптимизации кадровых, производственных или вычислительных ресурсов, рациональным планированием и распределением ресурсов между параллельными процессами и т.д. Поэтому задача функционального моделирования процессов вызывает интерес в научных и деловых кругах во всем мире.

В области построения программных комплексов ДЗЗ, отличающихся значительной сложностью и вариативностью информационно-вычислительных процессов (ИВП) над большими объемами геопространственных данных, сосредоточенных в территориально распределенных центрах обработки, научными коллективами [1–4] ведутся активные исследования, направленные на создание интерактивных средств контроля и управления существующими ИВП. Однако авторами уделяется незначительное внимание задачам проектирования ИВП с применением соответствующих интерактивных диалоговых инструментов, предназначенных для оператора.

Проектирование ИВП можно рассматривать как графическое представление потока взаимосвязанных работ в процессе (*workflow*), что позволяет использовать существующие методологии функционального, событийного, логического моделирования и управления потоками работ, используемые в *workflow*. Примерами служат концепция процессного управления BPM (*Business Process Management*), рассматривающая рабочие процессы как особые ресурсы; графическая нотация BPMN (*Business Process Model and Notation*), позволяющая моделировать и документировать процессы; событийное моделирование EPC (*Event-driven Process Chain*), представляющая собой нотацию, основанную на блок-схеме, для создания и настройки планирования ресурсов предприятия и улучшения рабочих процессов.

© Брежнев Р.В., Перевалова А.А., 2018

Разработаны языки, предназначенные для конструирования и инициализации процессов. Утверждены международные стандарты описания и реализации процессов. Ярким примером стандарта является язык XPDL (*Process Definition Language*), который предоставляет языковые конструкции, основанные на стандарте XML, для обмена всеми аспектами рабочих процессов построенных в нотации BPMN. Отечественной разработкой в данной области является визуальный алгоритмический язык программирования и моделирования ДРАКОН (дружелюбный русский алгоритмический язык, который обеспечивает наглядность). Язык предоставляет нотацию, основанную на блок-схемах алгоритмов, описанных в ГОСТ 19.701–90 и ISO 5807–85. Язык позволяет моделировать процессы, а также разрабатывать программы реального времени.

В настоящей работе в качестве системы условных обозначений для визуального графического построения процессов обработки и анализа данных ДЗЗ взята нотация методологии функционального моделирования IDEF0. Выбор данной нотации обусловлен относительной простотой и наглядностью диаграмм, ориентированных на логические отношения между блоками функций без учета временной последовательности.

Описание технологии. Поясним элементы графической нотации в специфике использования в работе комплекса.

Диаграмма IDEF0 включает ряд графических элементов и набор синтаксических правил, позволяющих воспринимать семантику модели. Графические элементы в контексте использования в ДЗЗ обозначают следующее.

1. Блок характеризует программный модуль комплекса. Блок агрегирует содержание модуля и не раскрывает его функциональные детали и, таким образом, для оператора блок представляет «черный ящик», имеющий заданное количество входов и выходов. Некоторые примеры блоков, реализованных в комплексе ГИС СФУ [5], приведены в таблице.

Таблица

Примеры блоков в соответствии с программными модулями

Название модуля	Наименование блока	Назначение
CROP_TO_CUTLINE	«Обрезать изображение по векторной маске»	Получение фрагмента изображения по заданному векторному контуру
INDEX	«Создать канал NDVI»	Расчет и создание индексных изображений, в частности NDVI.
FILE_MANAGER	«Очистить временную директорию»	Удаление временных файлов процесса из заданной директории
ZONALSTAT	«Рассчитать среднее значение NDVI» ($\overline{NDVI}$)	Расчет заданных параметров в границах заданного полигона.
	«Рассчитать среднеквадратическое отклонение» (σ)	
GEOJSON	«Создать geojson слой»	Создание geojson объектов

Кроме того, разработаны модули атмосферной коррекции, геопривязки и др.

2. Входные дуги характеризуют данные. Входными данными, например, для блока «Обрезать изображение по векторной маске» будет указание следующих параметров:

- директория, содержащая исходные каналы изображения;
- файл векторной маски в формате SHP ESRI;
- директория, в которую будут выгружен фрагмент изображения.

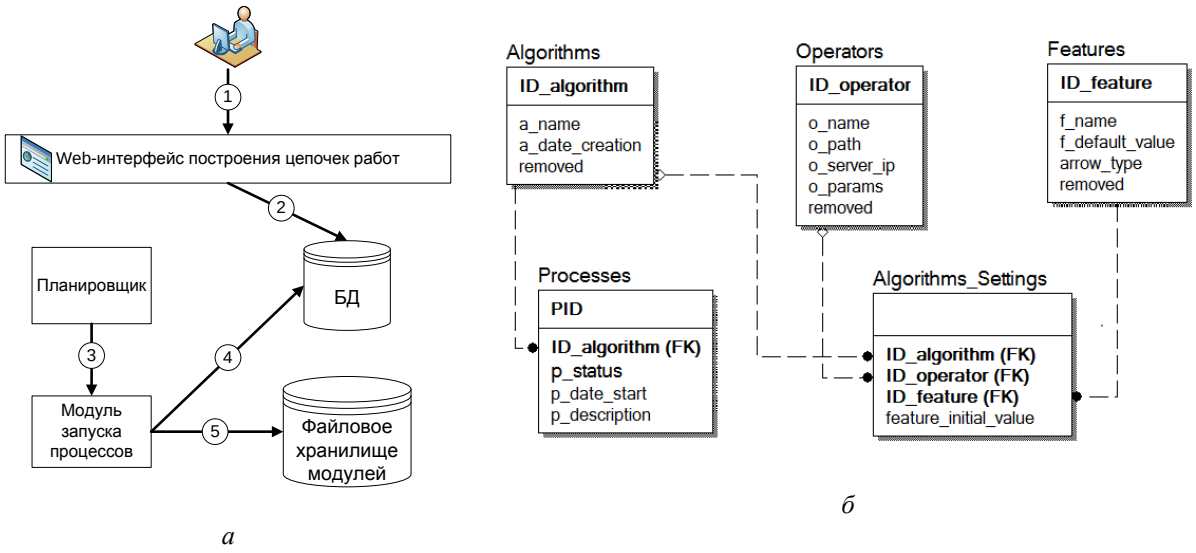
3. Дуги механизмов показывают наименование программного модуля, выполняющего работу. В соответствии с таблицей для блока «Обрезать изображение по векторной маске» механизмом является модуль `CROP_TO_CUTLINE`.

4. Дуги управления показывают элементы комплекса, ограничивающие или задающие правила функционирования одного или нескольких программных модулей. Так,

например, для модуля ZONALSTAT управлением является априори заданная таблица БД для хранения статистики $\overline{NDVI}$ исследуемого объекта.

5. Выходные дуги показывают результаты преобразования входных данных, которые обобщенно можно назвать производными продуктами. Результатом работы модуля CROP_TO_CUTLINE, например, является фрагмент изображения исследуемого объекта.

Практическая апробация. Представленный выше подход реализован как подсистема управления процессами (рис. 1) в рамках комплекса ГИС СФУ.



а *б*

Рис. 1. Подсистема управления процессами: *а* – структура; *б* – схема данных

Структура подсистемы (рис. 1, *а*) включает следующие компоненты.

1. Web-интерфейс, предоставляющий оператору диалоговые средства для визуального построения модели процесса и его инициализации и запуска (рис. 2).

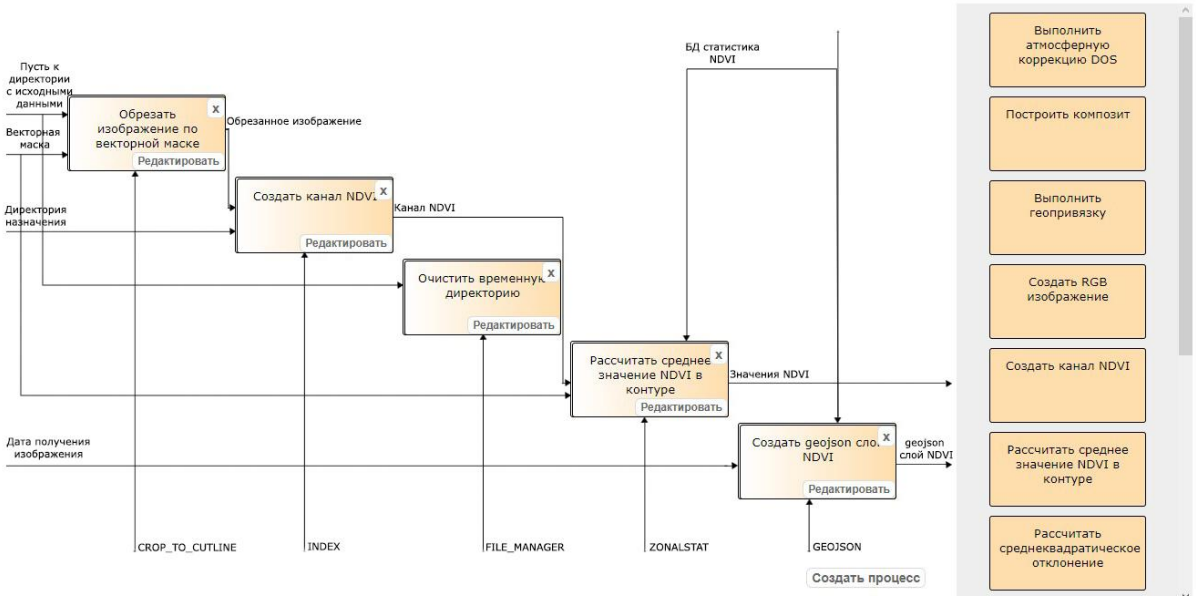


Рис. 2. Web-интерфейс оператора

2. База данных (рис. 1, *б*) представляет собой тематическую область данных, позволяющую хранить справочник операторов (*Operators*), созданные последовательности операторов (*Algorithms*), так же параметры настроек (*Features*) и статусы процессов выполнения задач (*Processes*).

3. Планировщик выполняет функцию автоматического запуска процесса.

4. Файловое хранилище программных модулей представляет собой набор директорий для структурированного хранения модулей, реализованных преимущественно на языке Python.

5. Модуль запуска процессов выполняет последовательный запуск операторов процесса с настройками, заданными в БД.

Заключение. Представленное технологическое решение графического интерактивного построения процессов обработки и анализа данных ДЗЗ разработано и адаптировано под действующий распределенный программно-аппаратный комплекс ГИС агромониторинга СФУ как подсистема управления процессами и проходит этапы практической апробации и отладки. На текущем этапе испытаний подсистема позволяет моделировать линейные последовательности операторов обработки данных, инициализировать входы программных модулей, хранить построенные последовательности и запускать их на исполнение.

Список литературы

1. Организация контроля над функционированием распределенной системы ИСДМ Рослесхоз / А.А. Матвеев, А.С. Мамаев, А.А. Прошин, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М., 2009. Т. 6, № 2. С. 535–541.

2. Маглинец Ю.А., Брежнев Р.В. Развитие средств автоматизации приема и обработки спутниковой информации региональной системы ДЗЗ СФУ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М., 2011. Т. 8, № 3. С. 120–128.

3. Особенности организации контроля и управления распределенных систем дистанционного мониторинга / И.В. Балашов, В.Ю. Ефремов, А.А. Мазуров-мл. [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М., 2011. Т. 8, № 3. С. 161–166.

4. Развитие ЕТРИС ДЗЗ с применением облачных технологий / П.А. Лошкарев, О.О. Тохиян, А.М. Курлыков [и др.] // ГЕОМАТИКА. 2013. № 4.С. 22–26.

5. Brezhnev R.V., Maltsev E.A. An Ontological Spatial Monitoring System for Agricultural Land Monitoring // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25, № 2. P. 201–208.

УДК 517.938 : 621-83 : 621.313.323

С.А. Бронов[1, 2], Н.А. Никулин[1], П.В. Авласко[1], Р.М. Никитин[1], Д.Е. Алфимов[1]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
e-mail: nulsapr@mail.ru

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрены новые принципы управления электроприводами с индукторными двигателями двойного питания, в том числе применительно к использованию в космических аппаратах для дистанционного зондирования Земли.

Космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, индукторный двигатель двойного питания, электропривод, теория управления.

Исполнительные электроприводы (ИЭП) применяются в космических аппаратах (КА) для приведения в движение механических и электронных устройств различного назначения, в частности антенных установок и солнечных батарей. Свойства любого ЭП в значительной степени определяются свойствами используемого электродвигателя. В последние 10–15 лет начали широко применяться индукторные двигатели (ИД) различного исполнения. Определенный интерес представляют пока недостаточно изученные индукторные двигатели двойного питания (ИДДП) [1–3].

Особенности управления ИДДП вытекают из его математической модели:

$$\frac{d\overline{\psi}_1}{dt} = \mathrm{f}_1(\overline{\psi}_1, \overline{\psi}_2) + \mathrm{f}_u(U_{1m}, \varepsilon_1);$$

$$\frac{d\overline{\psi}_2}{dt} = \mathrm{f}_2(\overline{\psi}_1, \overline{\psi}_2) + \mathrm{f}_u(U_{2m}, \varepsilon_2, \theta_1, \theta_2, \theta_r);$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \mathrm{f}_\omega(\overline{\psi}_1, \overline{\psi}_2) + \mathrm{f}_M(t);$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r; \quad \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1; \quad \frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2;$$

$$\theta_M = \theta_r + (\theta_2 - \theta_1) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1).$$

где $\overline{\psi}_1$, $\overline{\psi}_2$ – векторы потокосцеплений первой и второй обмоток; U_{1m}, U_{2m} – амплитуды первого и второго синусоидальных питающих напряжений; ω_r, θ_r – угловая скорость и угол поворота ротора; θ_1, θ_2 – текущие фазы первого и второго питающих напряжений; ε_1, ε_2 – управляющие фазовые сдвиги первого и второго питающих напряжений; ω_1, ω_2 – угловые частоты первого и второго питающих напряжений; f_M – функция изменения статического момента нагрузки; t – время; θ_M – угол нагрузки.

Основная задача САУ в данном случае – регулирование угла поворота θ_r. Но одновременно меняется угол нагрузки θ_M. Как у всех синхронных электродвигателей,

© Бронов С.А., Никулин Н.А., Авласко П.В., Никитин Р.М., Алфимов Д.Е., 2018

угол нагрузки должен оставаться в диапазоне $-90° < \theta_M < 90°$, иначе двигатель теряет устойчивость и возникают неконтролируемые колебания угла поворота.

Предлагается при создании САУ ЭП использовать фазный способ управления [2]. В соответствии с ним в исходном состоянии $\omega_1 = \omega_2$, чем обеспечивается неподвижность ротора ИДДП. При изменении управляющих фазовых сдвигов ε_1 и ε_2 происходит соответствующее изменение угла θ_r, что аналогично работе шагового двигателя.

При этом возможны различные варианты построения САУ и соответствующие законы управления.

Прежде всего необходимо решить задачу раздельного регулирования угла поворота и угла нагрузки, для чего можно использовать известные принципы проектирования многосвязных систем с разделением каналов регулирования. Это возможно благодаря тому, что в ИДДП имеется 6 управляющих воздействий: амплитуды, частоты и управляющие фазы двух питающих напряжений. В результате оказывается, что одни и те же значения угла поворота (или угловой скорости) можно получить с помощью различных комбинаций управляющих величин за счёт их избыточности. Поэтому наряду с задачей обеспечения заданных значений регулируемых величин (угла поворота и скорости) можно решать дополнительные задачи, связанные с разделением каналов регулирования и оптимизацией.

Вторая задача – минимизировать аппаратную часть ЭП для уменьшения его сложности и повышения за счёт этого надежности, поэтому предлагается второй принцип построения САУ – с использованием математической модели в контуре управления. Обычно в САУ с моделью возникает проблема, связанная с тем, что в модели можно рассчитать реакцию объекта управления на управляющее воздействие (так как оно известно), но невозможно учесть возмущающие воздействия (так как их обычно нельзя измерить). В случае с ИДДП его конструкция и принцип работы позволяют в некоторой степени решить эту проблему. В ИДДП можно измерить (или хотя бы оценить с приемлемой погрешностью) возмущающее воздействие от статического момента, измеряя угол нагрузки. Для его измерения достаточно знать точное положение ротора и фазовые сдвиги питающих напряжений:

$$\theta_M = \theta_r + (\theta_2 - \theta_1) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1).$$

Это позволяет затем определить статический момент нагрузки по соответствующим формулам. Получению достаточной точности вычислений способствует то, что в большинстве режимов работы скорость изменяется медленно.

Заключение. Предложенные принципы построения СУА ЭП позволяют обеспечить высокие требования к ЭП КА для дистанционного зондирования Земли за счет учета специфики ИДДП и режимов работы.

Список литературы

1. Электромеханические системы космических аппаратов и автоматизация их проектирования / С.А. Бронов, Е.М. Курбатов, П.В. Авласко, В.А. Поваляев // Журнал СФУ. Серия «Техника и технологии». 2012. № 2 (5). С. 191–204.

2. Бронов С.А. Электропривод для приборов с индукторным двигателем двойного питания в квазишаговом режиме // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 4. С. 61–65.

3. Программно-аппаратный комплекс для исследования индукторных электроприводов двойного питания / С.А. Бронов, П.В. Авласко, В.А. Поваляев [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. 2013. № 4. С. 3–9.

УДК 004.942

И.А. Буслов[1], Г.А. Доррер[1], С.В. Яровой[1], А.Е. Гордеев[1], А.В. Антонов[2]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия, e-mail: vt244@mail.ru, g_a_dorrer@mail.ru, ach_bask@mail.ru, sinclair55@yandex.ru
[2]Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, e-mail: sanches12@mail.ru

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЖАРНОЙ ОБСТАНОВКИ В ПРИРОДНОЙ СРЕДЕ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Рассмотрены основные параметры проекта, посвященного разработке многофункциональной информационно-управляющей системы, предназначенной для мониторинга и оперативного управления борьбой с пожарами как в природной среде (лесах, степях, торфяниках), так и в населенных пунктах, на основе данных, полученных со спутников и беспилотных воздушных судов (БВС). Проект выполняется в рамках реализации Национальной технологической инициативы по направлению «АэроНет».

Ключевые слова: природные пожары, математическое моделирование, мониторинг пространственных процессов, БВС, АэроНет.

Введение. Природные пожары являются мощным природным и антропогенным фактором, влияющим различные сферы деятельности, такие как экономика, экология и др. Страны, большие территории которых заняты лесными зонами (США, Канада, страны Южной Европы, РФ и др.), испытывают наибольшее влияние данного природного явления [1–4].

Своевременное обнаружение, локализация и ликвидация природного (лесного, торфяного, степного и т.п.) пожара достигается эффективным планированием и работой на всех уровнях принятия решений, достаточным материально-техническим обеспечением, использованием современных научно-технических разработок в области мониторинга, моделирования и тушения пожаров и многими другими факторами [4–10]. В настоящее время действуют системы мониторинга природных пожаров, основанные на использовании спутниковой информации: «ИСДМ-Рослесхоз» (Минприроды РФ) и «Каскад» (МЧС). Однако точность и оперативность поступления информации от этих систем недостаточны для использования ее в режиме реального времени при тушении конкретных пожаров. Поэтому все большее значение приобретает использование беспилотных авиационных систем (БАС), способных с высокой точностью в реальном времени оценивать пожарную обстановку.

В представленной работе рассматриваются основные параметры проекта, посвященного разработке многофункциональной информационно-управляющей системы, предназначенной для разведки, мониторинга и оперативного управления борьбой с пожарами как в природной среде, так и в населенных пунктах, на основе данных, полученных с беспилотных воздушных судов. Система также может быть использована для обучения оперативного персонала противопожарных служб. Проект выполняется в рамках реализации Национальной технологической инициативы по направлению «АэроНет» (http://asi.ru/nti/).

© Буслов И.А., Доррер Г.А., Яровой С.В., Гордеев А.Е., Антонов А.В., 2018

Структура системы. Система содержит следующие элементы.

1. Программно-аппаратный комплекс, включающий:

- беспилотное воздушное судно вертолетного типа марки Zala 421-21;
- средства связи и телекоммуникации (модуль SIM900, FM-трансивер);
- систему датчиков, состоящую из блока позиционирования, необходимого для определения положения аппарата в пространстве, и блока сенсорики, нужного для непосредственного получения характеристик пожара и среды (ИК бесконтактный узконаправленный датчик температуры CJMCU-MLX90614ESF-DCI, GPS датчик NEO-6M, многофункциональный модуль GY-91).

2. Математические модели динамики природных пожаров и процессов их обнаружения, идентификации и ликвидации, предназначенные для поддержки принятия решений по борьбе с пожаром и реализованные в виде агентно-ориентированной программно-информационной системы [4; 5; 10].

3. Компьютерная имитационная система для обучения персонала основам тактики борьбы с природными пожарами и работе с БВС [11].

Структура системы представлена на рисунке.

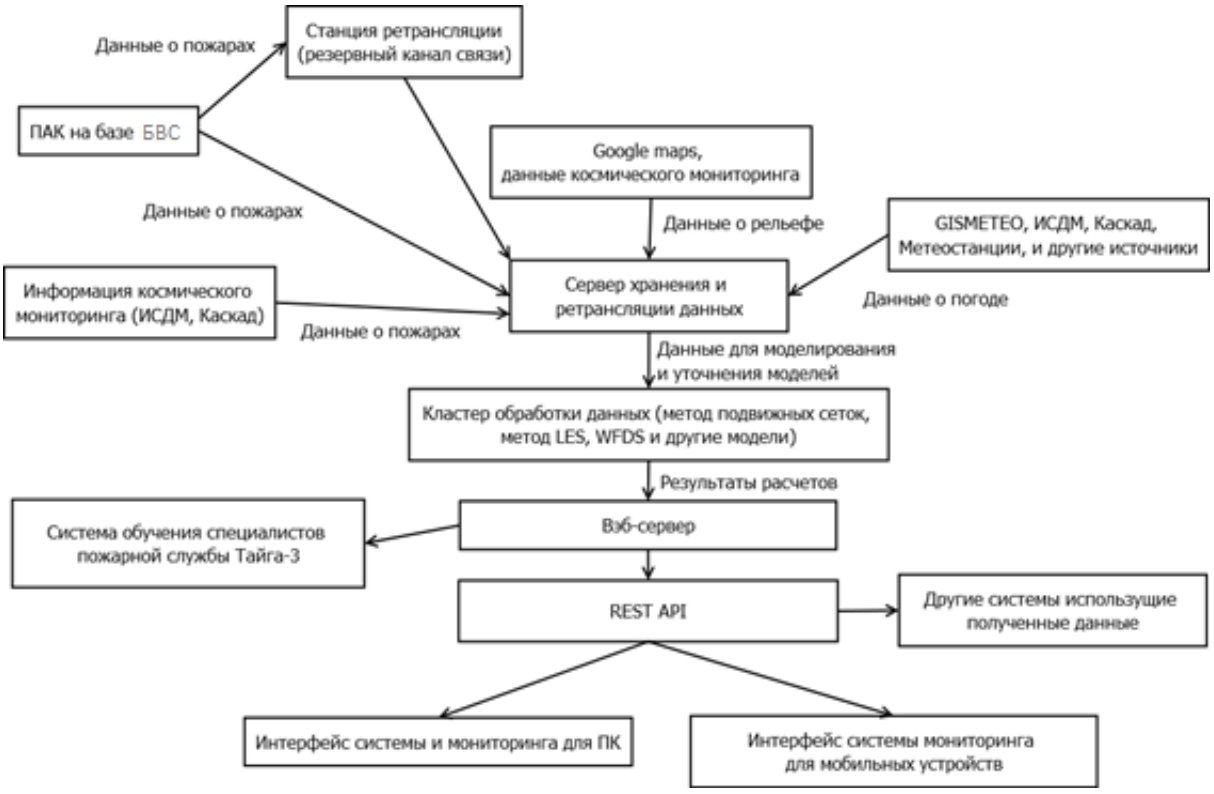


Рисунок. Структура комплекса на базе БВС

Информационная система выполняет последовательно следующие этапы обработки данных.

На этапе сбора данных используются следующие источники.

1. Данные о действующих природных пожарах и о погоде, получаемые из информационных систем космического мониторинга природных объектов «ИСДМ Рослесхоз» и «Каскад». Эти данные позволяют оценить пожарную ситуацию в регионе, целесообразность использования БВС и составить план работы по ликвидации пожара. Кроме того, с интернет-сайта Google Maps система получает данные о рельефе местности – наиболее точные данные, имеющиеся в открытом доступе, а также удобное API. Должны быть известны также предварительные данные о горючих материалах в данном регионе, а также метеоданные (температура и влажность воздуха, скорость

и направление ветра, класс пожарной опасности по условиям погоды), полученные из ближайших гидрометеостанций.

2. Данные, полученные непосредственно с места действующего пожара. Ключевым моментом сбора данных является разведка и картирование контуров пожара с помощью аппаратуры, установленной на БВС. При этом нужно иметь в виду, что горящая кромка природного пожара часто имеет сложную конфигурацию, разрывы, она может быть скрыта кронами деревьев и дымным шлейфом. Поэтому район пожара следует тщательно обследовать путем периодического сканирования территории галсами БВС и с помощью датчика температуры выявлять горячие точки. Кроме того, при сканировании территории с помощью других датчиков могут быть уточнены данные о растительности и метеорологической обстановке. Данные передаются на сервер для хранения и ретрансляции по основному (GPRS) каналу и резервному (радио) каналу через станцию ретрансляции. Данные из разных источников, поступившие на сервер, анализируются и сравниваются и после первичной обработки заносятся в базу данных для дальнейшего использования.

Данные могут быть переданы различными интерфейсами (мобильным, веб и др.) через REST-API и могут использоваться для оперативного принятия решений специалистами противопожарной службы, а также могут быть переданы сторонним информационным системам.

На этапе обработки данных производится оценка конфигурации и параметров действующего пожара на основе обработки координат горячих точек, переданных с борта БВС, прогнозирование процесса распространения пожара по одному или нескольким алгоритмам, а также оценка необходимых сил и средств для его ликвидации. В последнем случае может быть использована разработанная авторами информационная система «Тайга-3» [10–11].

На этапе передачи данных пользователям вся информация, полученная в системе, хранится на сервере, откуда отправляется заинтересованным пользователям. Используется типичный сервер баз данных (в прототипе использована СУБД PgSQL) под управлением ОС GNU/Linux Debian. Обмен данными с БВС осуществляется по протоколу HTTP через REST API (реализованном на веб-сервере Apache и проксирующем сервере Nginx).

Заключение. Рассмотрены структура и основные параметры проекта, посвященного разработке многофункциональной информационно-управляющей системы, предназначенной для разведки, мониторинга и оперативного управления борьбой с природными пожарами с использованием данных, полученных с беспилотных воздушных судов (БВС).

В настоящее время создан и испытан на экспериментальных пожарах в условиях полигона и лесной территории прототип системы. Дальнейшая работа по данному проекту планируется в следующих направлениях:

- совершенствование математических моделей и ПО;
- разработка рабочего проекта системы;
- продолжение испытаний системы в условиях полигона и реальных пожаров;
- расширение функций системы при использовании нескольких БВС;
- подготовка коммерческого проекта по использованию системы в рамках;
- реализации Национальной технологической инициативы по направлению «АэроНет».

Список литературы

1. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. М., 1985. 96 с.

2. Андреев Ю.А., Брюханов А.В. Профилактика, мониторинг и борьба с природными пожарами (на примере Алтае-Саянского экорегиона): справ. пособие. Красноярск: Изд-во СО РАН. 2011. 272 с.

3. Волокитина А.В. Защита населенных пунктов от чрезвычайных ситуаций, связанных с природными пожарами: практ. рекомендации. Красноярск: Изд-во СО РАН. 2002. 63 с.

4. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.

5. Доррер Г.А. Система управления борьбой с природными пожарами // Информатизация и связь. 2016. № 3. С. 66–72.

6. Andrews P.L., Bevins R.C. BehavePlus fire modeling system, version 2.0: User's Guide // C.D. USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. RMRS-GTR-106WWW. Ogden, 2003. 45 p.

7. Finney M.A. FARSITE: Fire simulator model, development and evaluation // USDA Forest Service, Res. Paper RMRSRP-4. Ogden, 1998. 47 p.

8. Mell W.A., Jenkins J. Gould Ph. A physics-based approach to modeling grassland fires // International Journal of Wildland Fire. 2007. Vol. 16. P. 1–22.

9. Shatalov P.S. Dorrer G.A. Parallel computation of forest fire and its interaction with infrastructure objects // Fourth Fire Behave and Fuels Conference: conference abstracts. St. Petersburg. 2013. P. 3.

10. Яровой С.В. Применение агентных моделей для имитации процесса локализации природных пожаров // Программные продукты, системы и алгоритмы: электрон. науч. журн. 2016. Вып. 2.

11. Буслов И.А., Яровой С.В., Доррер Г.А. Платформа для учебно-тренажерной системы по основам тактики борьбы с лесными пожарами // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015662521, зарегистрировано 26.11.2015.

УДК 004.5+528.9

А.С. Гаченко[1], А.Е. Хмельнов[1], Р.К. Федоров[2], Е.С. Фереферов[1], В.В. Минаев[1]

[2]Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail:gachenko@icc.ru

РАЗРАБОТКА ГИС-МОНИТОРИНГА АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИБРЕЖНУЮ АКВАТОРИЮ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Установление причин экологического кризиса акватории озера Байкал возможно в результате комплексных исследований побережья и прибрежной акватории. Разработка единых методических подходов в оценке воздействия от загрязненных подземных вод на экосистему является основой комплексных исследований. Для решения данной задачи обобщения и обработки большого набора данных разрабатывается комплексная геоинформационная система мониторинга экологической направленности.

Ключевые слова: экологический кризис, загрязнение, тематические базы данных, ГИС, геопортал, рельеф.

Введение. В настоящее время побережье озера Байкал становится все более привлекательным местом развития туристической деятельности и одновременно с этим остается одним из наиболееактуальных мест с точки зрения экологических требований и ограничений, так как непосредственно касается уникального природного объекта – озера Байкал.

© Гаченко А.С., Хмельнов А.Е., Федоров Р.К., Фереферов Е.С., Минаев В.В., 2018

Серьезную угрозу экологической безопасности озера Байкал представляет сопутствующая хозяйственная деятельность, особенно при отсутствии инженерных сооружений (канализации). Это объясняется тем фактом, что на побережье озера Байкал располагается большое количество локальных участков массового туризма и отдыха, характеризующихся постоянно растущим потокомтуристов, что в конечном итоге приводит к ухудшению состояния уникальной экологической системы озера Байкал, поэтому требуется принятие неотложных мер по анализу и оценке современного состояния, прогнозу динамики геосистем на ключевых участках, подверженных наиболее сильным антропогенным нагрузкам: п. Листвянка, побережье Малого Моря, прибрежнаязона возле Северобайкальска и Байкальска.

Проведение любых комплексных исследований сопряжено с обработкой больших объемов накопленных в рамках исследований распределенных данных. Из-за пространственного характера информации подходящим инструментом поддержки исследований антропогенного воздействия на экологию какой-либо территории являются геоинформационные системы (ГИС). Реализация такой ГИС с открытой архитектурой обеспечивает возможность расширения функциональности за счет добавления новых сервисов, находящихся как локально на сервере геопортала, так и удаленно на других серверах.

Разработка системы для оценки и мониторинга антропогенного воздействия в виде геопортала имеет ряд преимуществ:

- высокая надежность хранения данных;
- отсутствие потребности пользователям самостоятельно устанавливать и обслуживать программное обеспечение;
- свободный доступ к методам, моделям и алгоритмам геообработки данных, возможность расширения перечня геоалгоритмов.

В данной работе предложен подход по информационной поддержке исследований антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал. Геопортал, разрабатываемый на протяжении ряда лет, позволяет исследователям формировать общую базу тематических данных (табличные данные) и картографических данных (информационные слои), а также осуществлять запуск интернет-сервисов для решения задач геообработки и комплексного анализа различных показателей. Одной из отличительных особенностей геопортала является возможность пользователям самостоятельно создавать структуру своих баз данных (добавлять, удалять и модифицировать структуру таблиц), а также настраивать запуск сервисов геообработки. Данная платформа позволяет вести проекты по тематике различной направленностибольшому количеству пользователей одновременно.

Геопортал. Основным компонентом разрабатываемой сервисно-ориентированной ИАС (информационно-аналитической системы) является геопортал, предоставляющий пользователям обмен пространственными и тематическими данными и сервисами их обработки на основе стандартов OGC (рисунок). По определению геопортал является общей точкой доступа к информационным ресурсам (данным) и технологиям их обработки.

Архитектура геопортала «клиент-сервер» включает в себя компоненты:

- система управления контентом Calipsoреализует функции работы с пользователями, верстки веб-страниц и т.д.;
- БД PostgreSQL (с расширением для обработки пространственных данных PostGIS) предназначена для хранения пользовательских данных;
- система хранения данных (СХД) программно-аппаратное обеспечение хранения пользовательских данных;
- сервисы ввода и редактирования реляционных данных позволяют создавать пользователям собственные таблицы с пространственными атрибутами, просматривать и редактировать данные в виде таблиц, карт;

- подсистема запуска и учета состояния выполнения сервисов WPS осуществляет управление WPS сервисами;
- WPS-сервисы содержат алгоритмы обработки и анализа данных, могут находиться локально и удаленно в Internet.

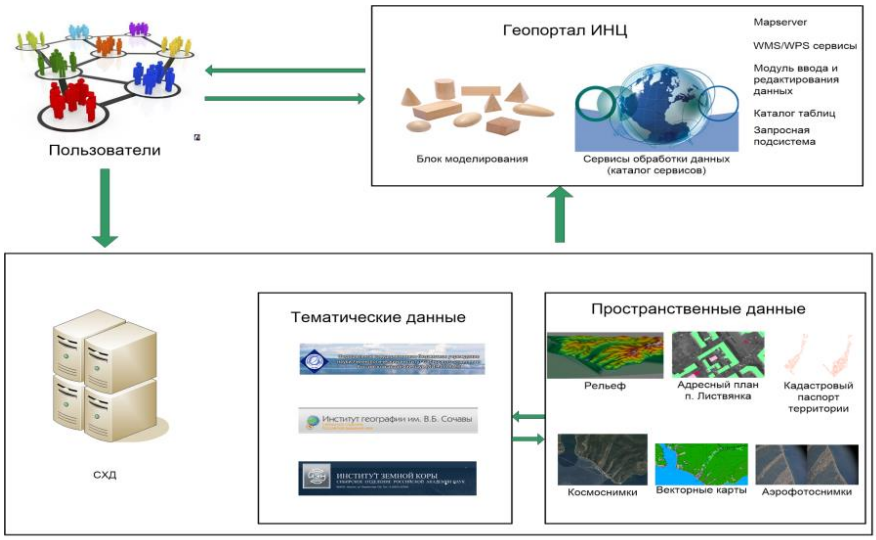


Рисунок. Архитектура ГИС антропогенного развития

Отображение данных таблиц на серверной стороне осуществляется с помощью Mapserver по стандарту WMS, а на клиентской с помощью библиотеки leaflet. Mapserver проводит отображение данных, используя специальный файл настроек (MAP), в котором прописываются настройки доступа к данным, используемые проекции, стили отображения данных и т.д. В MAP файле сохраняется запрос к PostgreSQL на получение данных из таблиц базовых пространственных данных и пользовательской таблицы. Для каждого слоя экземпляра окна браузера, содержащего карту, динамически создается новый MAP файл с уникальным именем. Это позволяет пользователям одновременно просматривать слой с различными настройками фильтров и стилей отображения. Изменения фильтров или стилей отображения приводит к автоматическому изменению файла с настройками.

Выполненные работы. В данный момент по результатам работ получен набор материалов, на основании которых можно проводить анализ существующей экологической ситуации и делать различные выводы.

Цифровая топооснова на исследуемую территорию (п. Листвянка) масштаба 1 : 25 000. На основе цифровой топоосновы сформирована 3D-модель исследуемой области с использованием оригинального программного обеспечения, разработанного в ИДСТУ СО РАН. Для построения цифровой карты объектов адресации недвижимости на территории п. Листвянка, являющихся потенциальными источниками загрязнения бытовыми стоками, с публичной кадастровой карты получен кадастровый паспорт территории данные об участках, находящихся в собственности. На основе этой информации построена цифровая карта – тематический слой «Участки, находящиеся в собственности» (источники потенциального загрязнения бытовыми стоками).

Для построения цифровой модели рельефа местности на территорию п. Листвянка получены снимки радарной топографической съемки – SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission).Получены космоснимки исследуемой территории для комплексного анализа территории. На основе данных SRTM построена цифровая модель наземного рельефа местности.

Разработана база данных (БД) антропогенного загрязнения поселка. Созданная БД содержит информацию о пробах снега, почвы и воды, взятых в 52 точках на территории и окрестностях п. Листвянка в различные периоды. По каждой пробе в БД содержится количественные показатели по 11 загрязнителям. Для визуального представления и проведения моделирования на основе показателей из БД о потенциальных источниках антропогенного загрязнения построены соответствующие тематические слои на геопортале. Для оценки вклада коммерческих организаций в формирование бытовых загрязнителей создана БД гостиниц, расположенных на территории п. Листвянка. Проведен сбор метеоданных по исследуемой территории, реализован механизм отображения этой информации на геопортале.

В 2016–2017 гг. были проведены комплексные исследования урезовой зоны п. Листвянка, в частности были проведены: геофизические исследования, аналитическая оценка влияния поверхностных и грунтовых вод территории п. Листвянка на экологическое состояние прилегающей мелководной зоны оз. Байкал, водолазное обследование акватории п. Листвянка на предмет определения подводных зон наиболее подверженных антропогенному воздействию и определению развития в на субаквальных склонах нехарактерной водной растительности, исследование элементного состава воды рек, интерстициальных и подземных вод береговой зоны озера Байкал и его прибрежной акватории в районе п. Листвянка, работы по определению химического микробиологического загрязнения поверхностных и придонных вод в районе п. Листвянка, работы по определению химического загрязнения поверхностности территории в районе п. Листвянка по данным снегосъемки, работы по оценке современного ландшафтного состояния территории п. Листвянка, состояния лесов и растительности в его окружении для возможного определения по их состоянию влияния признаков воздействия данных территорий на прибрежную часть озера Байкал, изучение подземных вод в пади Крестовой по оценке влияния подземного стока потоков с данной территории на озера Байкал с подготовкой первичной информации об объектах, потенциальных источниках антропогенного загрязнения.

Все полученные данные размещены на геопортале. Это позволяет проводить комплексный анализ большого объема данных.

Полученные результаты комплексных исследований по установлению причин экологического кризиса развивающегося в озере Байкал (побережья и прибрежной акватории и территории самого поселка Листвянка), для разработки единых методических и методологических подходов выявления антропогенно загрязненных подземных вод имеющих субаквальную разгрузку в водоеме дают определенные основания для вывода о фактически прямой причинно-следственной связи между увеличением объемов подземного стока антропогенно загрязненных вод (имеющих субаквальную разгрузку в литоральной части озера Байкал) с развитием экологического кризиса фиксируемого в водоеме. В тоже время основные и решающие факторы его развития пока устанавливаются. По итогам выполнения работ можно утверждать, что на сегодняшний день в качестве наиболее вероятных причин развития кризиса выступает микробиологическое загрязнение.

Заключение. В статье рассмотрен инфраструктурный подход создания информационно-аналитических систем управления крупными интеграционными междисциплинарными проектами, основанный на использовании сервисно-ориентированной парадигмы, стандартов OGC, Web-технологий и сервисов. В результате проведенных работ была разработана архитектура и создана ГИС-мониторинга для поддержки исследований антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал. Система обеспечивает для всех исследователей централизованное формирование тематических и картографических БД результатов исследований, проведение мониторинга экологической ситуации, комплексного анализа влияния антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал. Разработаны структура БД и проведено наполнение данными результатами исследований.

Список литературы

1. Информационно-аналитическая система мониторинга и оценки антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал / А.С. Гаченко, В.В. Минаев, А.А. Михайлов [и др.] // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 174–178.
2. Инфраструктура информационных ресурсов и технологий и создания информационно-аналитических систем территориального управления: монография / И.В. Бычков, Г.М. Ружников, А.Е. Хмельнов [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 242 с.
3. URL: http://atlas.isc.irk.ru/.

УДК 528.88

С.В. Иванов, О.В. Кушнырь

Научный центр оперативного мониторинга Земли
АО «Российские космические системы», Москва, Россия
e-mail: contact@spacecorp.ru

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА РЕГИОНАЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Предоставление удобного доступа к российским данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) как к важному инструменту для решения практических задач является одной из ключевых моментов при обеспечении пользователей космической информацией. Модернизация существующих геосервисов и реализация новых современных технологических решений позволит повысить востребованность российских продуктов ДЗЗ и эффективность их использования.

Ключевые слова: российские данные ДЗЗ, ЕТРИС ДЗЗ, геосервисы, геоинформационная платформа, проект «Цифровая Земля».

Информационные ресурсы современной российской орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) позволяют решать широкий круг социально-экономических задач, включая картографию, рациональное природопользование, экологический мониторинг, мониторинг окружающей среды, объектов инфраструктуры, чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера.

В настоящее время основными заказчиками российских данных ДЗЗ являются органы исполнительной власти, из которых подавляющее большинство составляют федеральные (83 % от всех заявок). Наиболее активные потребители информации ДЗЗ из Центрального, Сибирского и Приволжского федеральный округов (рис. 1).

Для эффективного обеспечения целевого применения данных ДЗЗ и непосредственного обеспечения пользователей российскими данными ДЗЗ и продуктами их обработки для решения прикладных задач создана Единая территориально-распределенная информационная система ДЗЗ (ЕТРИС ДЗЗ), которая позволяет решать основные задачи:

- планирование комплексного применения орбитальной группировки КА ДЗЗ;
- обеспечение приема и обработки полученных данных ДЗЗ;
- предоставление данных соответствующим потребителям.

© Иванов С.В., Кушнырь О.В., 2018

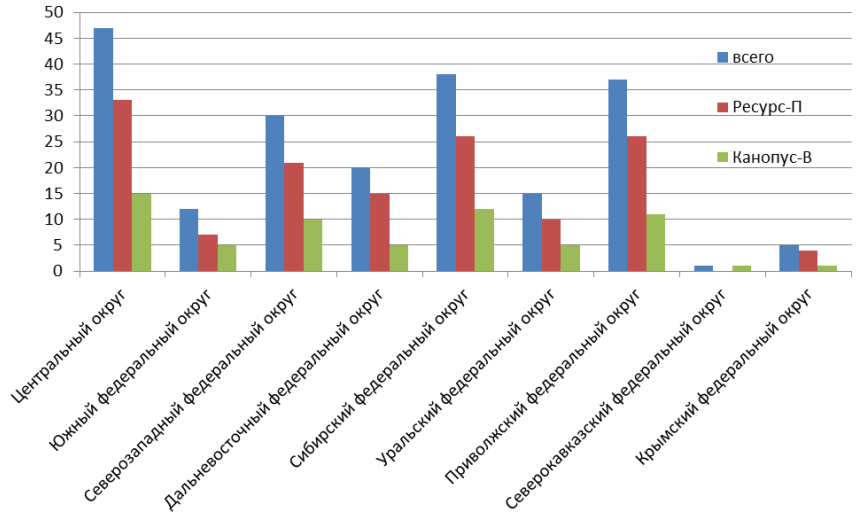


Рис. 1. Распределение заявок по федеральным округам

Предоставление доступа к данным ДЗЗ как к важному инструменту для решения практических задач федерального, регионального и местного управления является одной из ключевых задач функционирования ЕТРИС ДЗЗ. Обеспечение государственных потребителей стандартными и базовыми продуктами ДЗЗ осуществляется посредством существующих геоинформационных сервисов оператора – геопортала госкорпорации «Роскосмос», портала открытых данных и банка базовых продуктов межведомственного использования.

Геопортал госкорпорации «Роскосмос» обеспечивает оперативный поиск стандартных продуктов ДЗЗ по набору параметров, просмотр данных и характеристик, заказ архивных данных ДЗЗ и новой съемки, а также возможность отслеживания выполнения заявок.

Портал открытых данных позволяет осуществлять поиск, выбор и свободное скачивание стандартных продуктов ДЗЗ, предназначенных для свободного распространения (пространственное разрешение хуже 50 м).

Банк базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования обеспечивает потоковое создание, хранение и предоставление потребителям базовых продуктов ДЗЗ на основе российских и зарубежных спутниковых данных. Базовые продукты формируются в результате потоковой автоматической обработки стандартных продуктов и занимают промежуточное положение между первичными данными ДЗЗ и тематическим продуктом обработки глубокого уровня, проводимой экспертами предметной области применения космической информации.

Первичные базовые продукты представляют собой наборы данных, содержащие обобщенные физические характеристики наблюдаемых территорий, явлений и/или объектов и выражены в значениях энергетической яркости на зрачке сенсора.

Вторичные базовые продукты представляют собой специализированные продукты, рассчитанные с использованием первичных базовых продуктов и объединенные по типам и целевому назначению в соответствии с номенклатурой.

Типы вторичных базовых продуктов:

- индексные изображения, получаемые на основе измерений в различных спектральных каналах;
- композитные изображения, получаемые на основе разновременных наблюдений.

Одним из ключевых путей повышения эффективности целевого использования российских средств ДЗЗ является информационная интеграция геосервисов оператора с ведомственными и региональными информационными системами, источниками открытых и коммерческих пространственных данных и данных ДЗЗ.

Интенсификация развития территорий вызывает необходимость поиска и внедрения новых технологических решений, обеспечивающих объективный контроль различных объектов, территорий и явлений с целью своевременного принятия управленческих решений. Современные вызовы тотальной информатизации, текущее состояние рынка ДЗЗ и геоинформационных систем требуют ускоренного развития отечественных геопространственных технологий и создания технических решений, отвечающих потребностям пользователей. Оперативный доступ к данным и результатам их обработки позволит повысить объективность и оперативность решения контрольных и надзорных государственных задач.

С целью обеспечения потребителей стандартными и базовыми продуктами ДЗЗ с учетом максимальной автоматизации процессов получения и обработки данных, а также создания доступной и удобной технологической среды для работы с российскими продуктами ДЗЗ и интеграции информационных ресурсов в области ДЗЗ госкорпорацией «Роскосмос» реализуется проект «Цифровая Земля».

«Цифровая Земля» – масштабный проект, целью которого является создание комплексного геоинформационного решения для повышения эффективности использования государственными и частными пользователями российских данных ДЗЗ и выхода отечественной отрасли ДЗЗ на международный уровень (рис. 2).

Проект предполагает создание динамического покрытия территории Российской Федерации российскими данными ДЗЗ (в первую очередь высокого пространственного разрешения), а в дальнейшем – территории других государств.

Реализация проекта включается в себя три основных компонента:

1) формирование информационной основы и динамического покрытия территории Российской Федерации на основе отечественных данных ДЗЗ различного пространственного разрешения;

2) создание гибкой геоинформационной платформы для интерактивного формирования динамических покрытий, публикации, обеспечения доступа и реализации базовых инструментов работы с мультивременными наборами данных;

3) создание аппаратно-программных решений автоматической потоковой обработки данных ДЗЗ, формирования стандартных и базовых продуктов.

Рис. 2. Технологический облик проекта «Цифровая Земля»

Заключение. Реализованные в настоящее время технологии формирования информационных продуктов на основе российских данных ДЗЗ и получения доступа к ним в настоящее время не в полной мере соответствуют сегодняшним требованиям.

С целью повышения востребованности российских продуктов ДЗЗ и стимулирования создания конечных прикладных решений на их основе необходимо формирование облачной инфраструктуры Оператора с целью обеспечения оперативного доступа он-лайн ко всему объему архивной информации ДЗЗ и сервисам их обработки.

С целью обеспечения конкурентоспособности российских информационных продуктов ДЗЗ и повышения их доступности в настоящее время проект «Цифровая Земля». В рамках проекта создается динамическое покрытие на основе российских данных ДЗЗ. Технологическую основу проекта составляет геоинтеграционная платформа – интегрированный комплекс информационных ресурсов и сервисов, позволяющих визуализировать и анализировать геопространственную информацию из различных источников.

УДК 528.8

А.М. Константинова, И.В. Балашов

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
e-mail: konstantinova.anouk@gmail.com

ИНСТРУМЕНТЫ АНАЛИЗА БЫСТРОРАЗВИВАЮЩИХСЯ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Представлен один из инструментов анализа быстроразвивающихся природных процессов, таких как природные пожары, извержения вулканов и т.п., представляющий собой построение анимированных изображений на основе серии наблюдений спутниковых систем с возможностью включения в данные изображения тематических слоев и результатов моделирования.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, информационные системы дистанционного мониторинга, спутниковые системы наблюдения Земли, инструменты анализа спутниковых данных, природные процессы, мониторинг природных пожаров, мониторинг активности вулканов, система построения анимированных изображений.

В институте космических исследований РАН разработаны десятки научных и прикладных информационных систем дистанционного мониторинга Земли [1]. Данные системы ориентированы на исследование и наблюдение за различными природными явлениями и процессами: природными пожарами, состоянием сельскохозяйственной растительности, лесным хозяйством, Мировым океаном, активностью вулканов и т.д. Наличие ежедневно пополняемых распределенных архивов спутниковых данных и реализованные в информационных системах инструменты анализа и обработки этих данных позволяют в режиме, близком к реальному времени, исследовать быстроразвивающиеся природные процессы. Настоящий доклад посвящен одному из таких инструментов анализа – построению анимированного изображения на основе спутниковых данных и результатов их обработки.

В ходе проделанной работы была реализована возможность простого построения анимированного изображения с помощью серии наблюдений спутниковых систем. Данные для анимации подбираются автоматически в соответствии с граничными условиями и параметрами, заданными специалистом, работающим с информационной системой, либо из набора снимков, подобранных самим специалистом. Кроме спутниковых, данных система создания анимаций позволяет включать любые тематические слои и картографию, в том числе меняющуюся во времени, такую как метеорологические данные, результаты различ-

© Константинова А.М., Балашов И.В., 2018

ного моделирования, полигоны пожаров. Этот функционал может быть полезен для оценки точности результатов, полученных в ходе анализа спутниковых данных.

В докладе приводятся примеры использования созданного инструмента. Среди них – построение анимированных изображений на основе серий снимков спутника Himawari-8 с наложением результатов численного моделирования для анализа динамики распространения пепловых облаков от вулканов Камчатки и Курил [2] и лесных пожаров.

Список литературы

1. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, И.В. Балашов, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 53–75.

2. Спутниковые и наземные наблюдения эксплозивных извержений вулкана Жупановский (Камчатка, Россия) в 2013 и 2014–2016 гг. / О.А. Гирина, Е.А. Лупян, А.А. Сорокин [и др.] // Вулканология и сейсмология. 2018. № 1. С. 3–17. DOI: 10.7868/S0203030618010017.

УДК 528.8

А.В. Кашницкий, Е.А. Лупян, М.А. Бурцев, А.А. Прошин, Д.А. Кобец

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
e-mail: ak@d902.iki.rssi.ru

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Представлен анализ изменений подходов к построению и развитию информационных систем дистанционного мониторинга, которые происходили в последние десятилетия. Такие изменения вызваны непрерывным совершенствованием систем дистанционного зондирования Земли и технологий работы с получаемой от них информацией. Детальное изложение взгляда авторов на данную проблему было приведено в статье [1].

Ключевые слова: информационные системы дистанционного мониторинга, спутниковые системы наблюдения Земли, данные дистанционного зондирования, распределенные информационные системы, большие архивы данных.

Информационные системы дистанционного мониторинга (СДМ) решают различные задачи наблюдения, анализа и прогнозирования динамики процессов и явлений на земной поверхности, поверхности океана и в атмосфере. В статье обсуждаются СДМ, которые в значительной мере используют данные, получаемые от различных спутниковых систем. Приведены основные стадии эволюции таких СДМ и обобщенная схема организации работы в них со спутниковыми данными.

Основным фактором, влияющим в последнее время на развитие СДМ, является рост количественных и качественных характеристик систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Как следствие наблюдается взрывной рост количества информации ДЗЗ, получаемой, обрабатываемой и используемой в СДМ. Например, на рисунке приведены относительные темпы роста архивов ESA, EOS и Центра коллективного пользо-

© Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Кобец Д.А., 2018

вания «ИКИ-Мониторинг» (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»), нормированные на объем архивов в 2017 г. [1]). На рисунке можно отметить почти экспоненциальный рост объемов архивов спутниковых данных, причем в результате анализа планов по запуску космических аппаратов становится ясно, что темпы роста в ближайшие десятилетия будут аналогичными. Под влиянием этого фактора создание любой новой СДМ и ее развитие становится все более трудоемкой и затратной задачей.

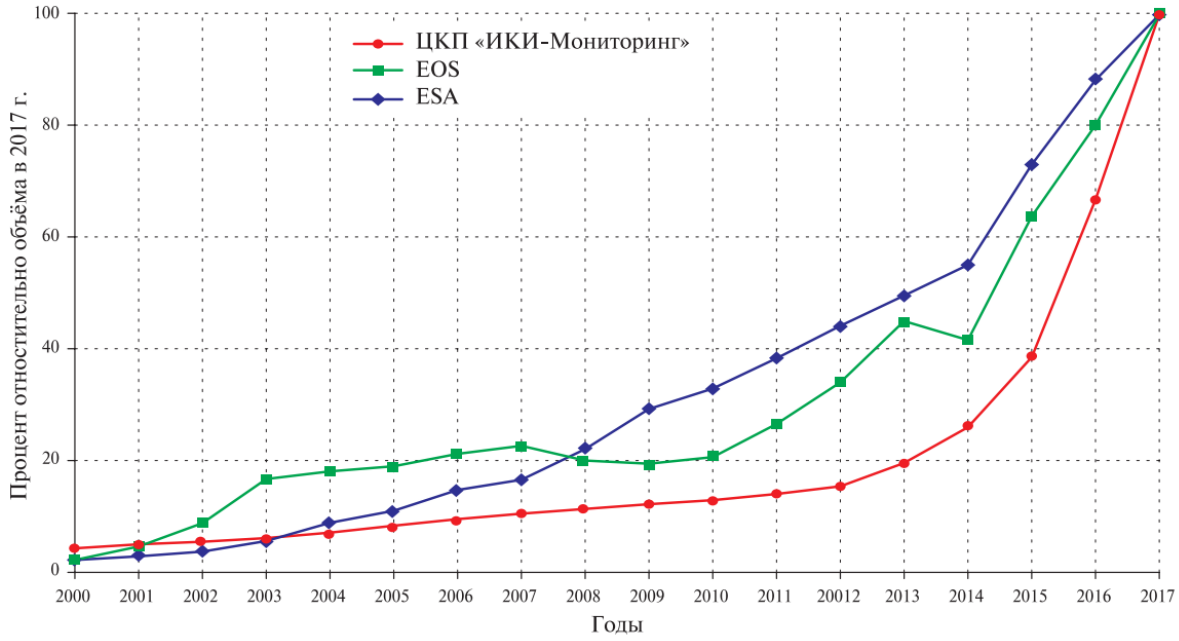


Рисунок. Относительные темпы роста архивов ESA, EOS
и Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг»

При этом на сегодня созданы, активно развиваются и используются различные многофункциональные центры приема, архивации, обработки и распространения данных ДЗЗ, например ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [2]. При создании этих центров значительная часть необходимых при построении СДМ задач, связанных с работой со спутниковыми данными, уже была решена. В результате наблюдается постепенный переход от ситуации, когда при построении СДМ создавалась практически с нуля вся программно-аппаратная инфраструктура, которая необходима для работы со спутниковой информацией, используемой конкретной системой, к ситуации, когда при построении конкретной СДМ максимально используются возможности многофункциональных центров приема, архивации, обработки и распространения данных ДЗЗ.

В докладе рассказано об основных преимуществах, которые появляются при таком переходе и приводятся примеры систем, которые были созданы по такому принципу с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Приводятся примеры анализа данных в этих системах и обсуждаются пути их развития. В частности, рассмотрена информационная система мониторинга активности вулканов Камчатки и Курил VolSatView [3], приведенная на сайте http://volcanoes.smislab.ru. Обсуждается развитие возможностей обработки и анализа данных, предоставляемых ЦКП «ИКИ-Мониторинг», на примере решения различных задач в данной системе.

Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Развитие возможностей информационной системы мониторинга активности вулканов Камчатки и Курил VolSatView ведется при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00042).

Список литературы

1. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, М.А. Бурцев, А.А. Прошин, Д.А. Кобец // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 3. С. 53–66.

2. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, №. 5. С. 263.

3. Информационная система VOLSATVIEW для решения задач мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил / Е.И. Гордеев, О.А. Гирина, Е.А. Лупян [и др.] // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 1–16. DOI: 10.7868/S0203030616060043.

УДК 528.851

Н.А. Леонтьев, И.А. Сукач

Школа космонавтики, Железногорск, Россия,
e-mail: kol_leon@mail.ru, ivanandy35@gmail.com
Научный руководитель – инженер-конструктор 2К **А.А. Герус,** АО «ИСС»

РАЗРАБОТКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГЕ

Рассмотрена возможность нового эффективного способа доставки научного оборудования для проведения атмосферных исследований за счет использования высокоскоростного средства доставки на электрической тяге. Также в работе кратко описаны конструктивные особенности, принцип действия и состав данного средства доставки.

Ключевые слова: турболет, телеметрия, бортовая обработка, радиоуправление, импеллер; атмосферные исследования, узел стабилизации.

Для проведения атмосферных исследований требуется подъем научного оборудования на определенную высоту (до 5 000 м). Одним из традиционных средств для запуска научно-исследовательского оборудования являются твердотопливные модели ракет, требующие определенных погодных условий и оснащающиеся достаточно дорогостоящими двигателями одноразового использования. Чтобы сократить расходы на запуск, как при проведении исследований, так и в процессе изготовления и отработки научного оборудования требуется разработать летательный аппарат, такой как турболет ракетного типа (далее «Ракета Т»).

Цель: разработка и изготовление турболета ракетного типа для доставки измерительного оборудования на необходимую высоту.

Задачи:

1) выбрать конструкционную схему ракеты;
2) произвести необходимые расчеты;
3) разработать конструкцию ракеты;
4) разработать электрическую схему ракеты;
5) изготовить прототип;
6) провести летные испытания.
7) проанализировать результаты испытаний

Конструкция изделия «Ракета Т». Ракета представляет собой оболочку из композиционных материалов с промежуточными силовыми элементами, конструктивных эле-

© Леонтьев Н.А., Сукач И.А., 2018

ментов изготавливаемых посредством 3D-печати. Габаритные размеры ракеты представлены на рис. 1. В качестве силовой установки используется импеллер Mercury II 90 с двигателем мощностью 2 660 Вт и тягой 4,3 кгс. Двигатель приводится в действие посредством подключения к двум аккумуляторам LiPo 3S 3300 mAh 60-120C через регулятор оборотов YEP 150A. Стабилизация ракеты в полете осуществляется за счет трех AVCS гироскопов управляющих газодинамическими рулями с помощью цифровых сервоприводов установленных внутри стабилизаторов изготавливаемых посредством 3D-печати. Управление креном ракеты осуществляется за счет механизма разворота рулей представленного на рисунке 2 (также возможно управление креном за счет микширования сигналов, но этот способ представляется менее надежным). Система спасения представляет собой парашют размещенный в обтекателе и выбрасываемый за счет энергии пороховых газов или пружины удерживаемой шнуром пережигаемым нихромовой нитью. Обтекатель, изготавливаемый посредством 3D-печати, отделяется за счет энергии газов при срабатывании вышибного заряда (другие способы отделения полезной нагрузки не обеспечивают достаточного быстродействия и надежности, и нежелательны к применению).

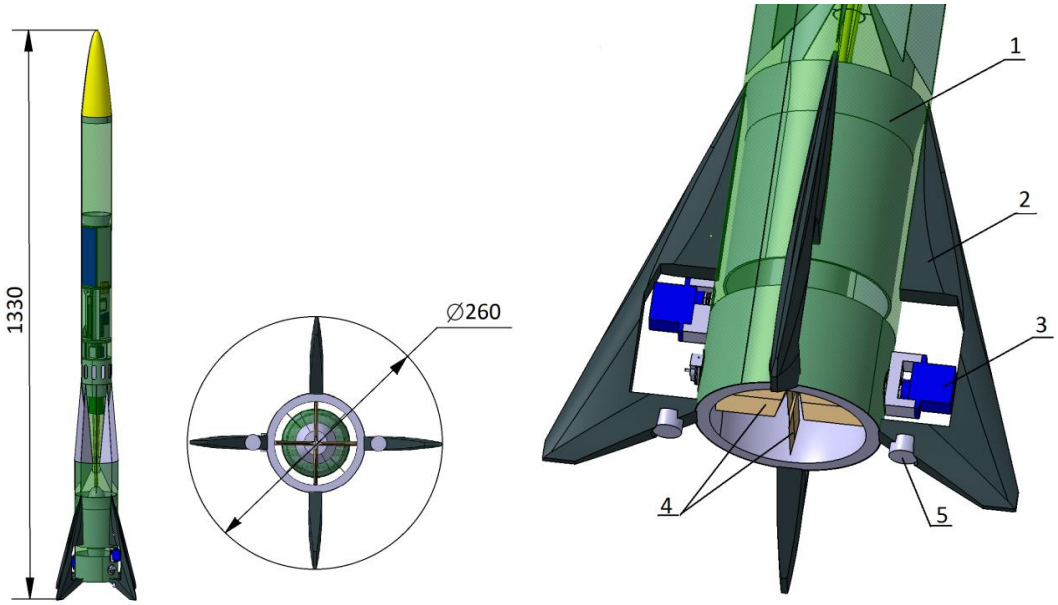


Рис. 1. Габариты турболета и устройство газодинамического руля

Управление полетом осуществляется за счет микроконтроллера (Arduino Mega 2560), набора датчиков и модуля радиосвязи, устанавливаемых в приборном отсеке и в стабилизаторах.

Для фиксации и извлечения батарейного бокса с аккумуляторами предусмотрен узел фиксации *24* на рис. 2, представляющий собой зубчатую рейку, входящую в зацепление с подпружиненной шестерней перемещающейся линейно и входящую в зацепление со шлицами корпуса. Для фиксации/извлечения батарейного бокса в шестерню вставляется шестигранный ключ. К ключу прикладывается необходимая осевая нагрузка, после чего ключ поворачивается в нужном направлении.

Расчеты и основные характеристики

1. Время полета составляет 96 с (с двумя аккумуляторами LiPo 3300mAh 3Sч).

2. Для расчета ускорения в зависимости от времени нами было выведено выражение

$$a(t) = \frac{-m+\sqrt{m^2+2SC_x t^2 p(f-mg)}}{pC_x S t^2}\quad , \qquad (1)$$

благодаря которому мы смогли определить ускорение в момент старта, равное a = 28,7.

В наших расчетах мы использовали следующие данные: сопротивления воздуху коэффициент C_x = 0,66; плотность воздуха P = 1,2745 кг/м^3; площадь обтекателя S = 0,03 м²; тяга двигателя F = 43 Н; масса ракеты m = 2,671 кг.

3. С помощью выражения (2) найдем максимальную скорость (96-я секунда полета):

$$v(t) = \int_0^{96} a(t)\,dt\,, \tag{2}$$

$V(t)$ = 94,85.

4. Затем найдем максимальную дальность полета полета (за 96 с при плотности воздуха не менее 1,2489 кг/м^3):

$$s = \int_0^{96} v(t)\,dt + \frac{\iint_0^{96} a(t)dt}{2} \tag{3}$$

S = 6 520 м.

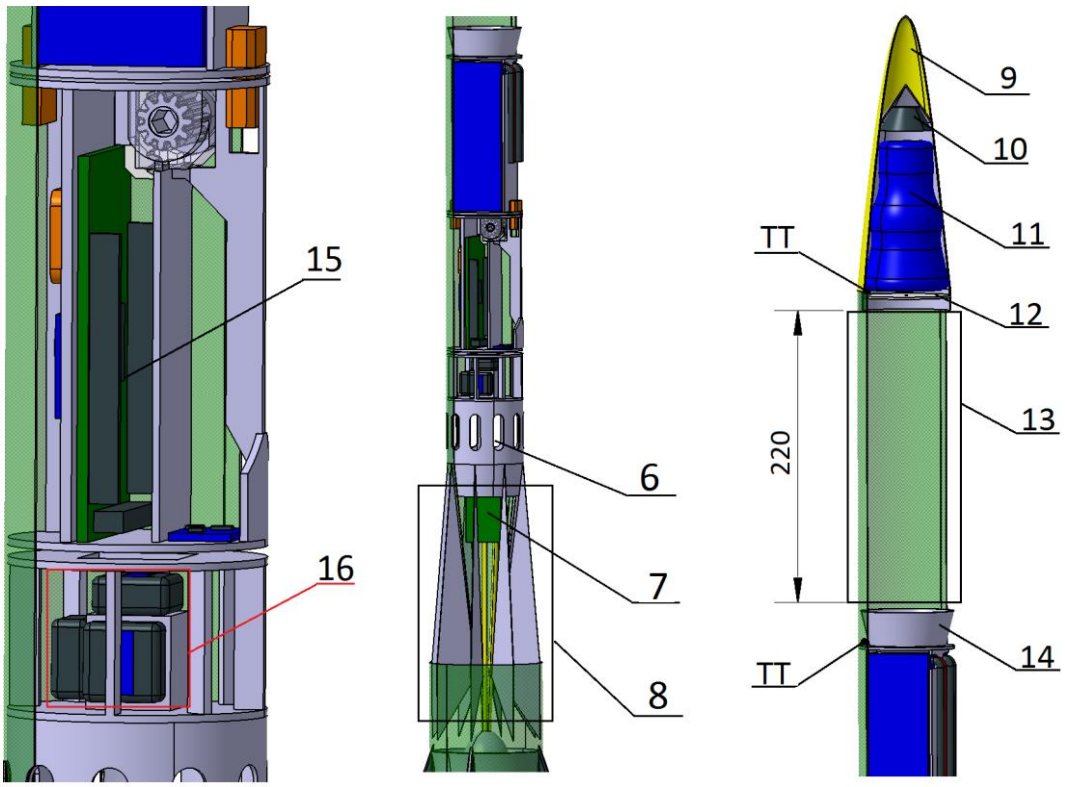


Рис. 2. 3D модель ключевых узлов

Технические характеристики твердотопливной ракеты и ракеты на электрической тяге представлены в таблице.

Таблица

Технические характеристики твердотопливной ракеты
и ракеты на электрической тяге

Параметр	Ракета	
	твердотопливная	электрическая
Дальность полета, м	300	6 522,9
Скорость, м/с	–	94,8
Ускорение, м/с^2	97,7	28,7
Время работы двигателя, с	2 + 2	96 (ограниченно емкостью аккумуляторов)
Масса, г	1 433	2,671
Стоимость запуска, руб.	1 400	6, 65

При сравнении характеристик можно выделить ряд преимуществ электрической ракеты, таких как высота полета, низкое значение перегрузки и стоимость запуска.

Экспериментальная отработка. При разработке и изготовлении ракеты будет проводиться наземная отработка устройства в целом, а также автономная отработка отдельных агрегатов и узлов.

На первом этапе будет проверена работоспособность рулевого механизма под действием воздушного потока двигателя. На втором этапе будет выполнена проверка функционирования ракеты с использованием специализированного дистанционного управления, на небольших высотах с вертикальной посадкой без парашюта; на третьем этапе – отработка контроллера, программного кода и измерительного оборудования. Проверяется функционирование дальномера, альтиметра, проверяется система спасения, связь с пультом, управление двигательной установкой. На четвертом этапе будут проводится летные испытания ракеты на высотах до 300 м.

В работе также представлены подбор компонентов, схема электрическая, расчет запаса статической устойчивости и площади парашюта, расчет энергобаланса.

Секция

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 528.85

А.И. Алексанин, М.А. Морозов, Е.В. Фомин

Дальневосточное отделение РАН, Владивосток, Россия
e-mail: aleks@iacp.dvo.ru

ТОЧНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Проведено исследование возможностей нового алгоритма совмещения произвольных изображений высокого пространственного разрешения с расчетом точности совмещения в каждой точке на примере изображений спутников «Ресурс-П», «прибор Геотон». Показана возможность совмещения с пиксельной точностью изображений холмистой местности, не прошедших процедуру построения ортофотоплана и снятых под углами, различающимися более чем на 30°.

Ключевые слова: Ресурс-П Геотон, SURF, реперные точки, геометрическая коррекция, совмещение изображений.

Одной из востребованных задач является совмещение спутниковых изображений – точного сопоставления пикселей двух изображений, соответствующих одним и тем же точкам земной поверхности. Часто необходимо только минимизировать пространственные рассогласования двух изображений, а не гарантировать высокую точность географической привязки каждого из них. Одним из подходов к решению задачи является построения пар реперных точек, соответствующих идентичным особенностям на двух изображениях, и построение на их основе взаимно однозначного отображения. В практике обработки изображений распространенным подходом к построению отображения относится использование алгоритма SURF [1], строящего соответствующие аффинные преобразования. Спутниковые изображения часто не совмещаются таким преобразованием из-за неточностей рельефа, особенностей работы аппаратуры, ошибок геометрической коррекции и географической привязки изображений. Для решения проблемы создан новый алгоритм, позволяющий учесть особенности формирования изображений [2]. Алгоритм имеет ряд настраиваемых параметров, которые подбираются индивидуально к конкретной паре изображений. В данной работе представлена модификация алгоритма, которая позволяет организовать автоматическую обработку по совмещению изображений и давать оценки точности совмещения в каждой точке.

Алгоритм

1. Автоматическое определение положения реперных точек при помощи детектора углов Харриса [3].

2. Построение дескрипторов реперных точек методом SURF [1]. В основном использовались нормализованные на единицу вектора-дескрипторы размерностью 64, иногда размерностью 128.

© Алексанин А.И., Морозов М.А., Фомин Е.В., 2018

3. Сопоставление реперов по их дескрипторам. Дескрипторы сопоставляются путем вычисления евклидова расстояния между ними. Сопоставление считается удачным, если для дескриптора с номером i в заданной окрестности находится на втором изображении его образ с номером j, обеспечивающий минимальное расстояние d_{ij}, удовлетворяющее заданному порогу $d_{ij} \leq d_{threshold}$.

4. Автоматическое нахождение образа первого изображения на втором.

5. Разбиение изображений на фрагменты минимально допустимого размера (не менее 200 векторов на фрагмент). Построение двумерного аффинного преобразования для каждого фрагмента с наилучшей точностью. Фильтрация сопоставленных пар реперов в каждом фрагменте: при помощи аффинного преобразования; по плотности отобранных реперов на единицу площади и по однородности величин и направлений векторов.

6. Построение смещений каждого пикселя корректируемого изображения. Коррекция одного изображения относительно другого.

7. Построение карты точности совмещения каждого пикселя: $\varepsilon = \sigma / \sqrt{N}$, где N – число векторов окрестности, в которой считается смещение.

Следует отметить, что точность оценивается для окрестности пикселя, по которой рассчитывается его смещение при процедуре совмещения изображений.

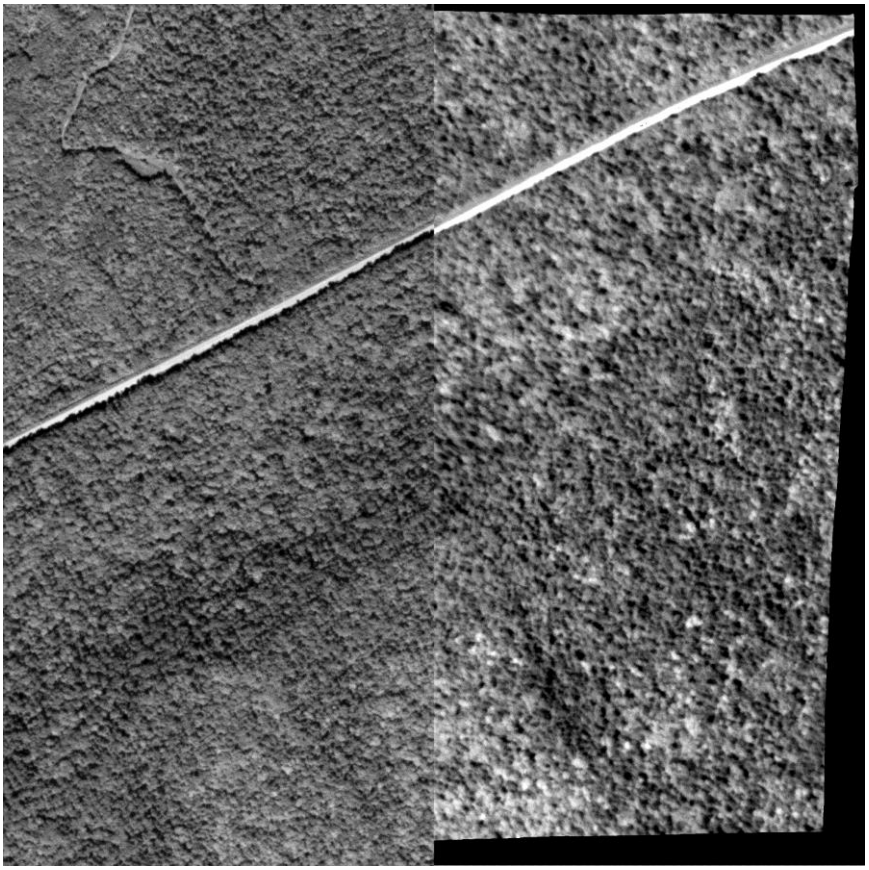


Рис. 1. Фрагменты двух изображений, состыкованных по произвольной линии разреза. Фрагмент первого изображения (слева) – это ортофотоплан, фрагмент второго (справа) – исходное изображение, скорректированное алгоритмом

Алгоритм тестировался: в частности, в следующем примере использовалось два изображений гористой местности в Приморском крае, покрытой почти сплошь лесом (рис. 1). Первым было приведенное к ортофотоплану снятое почти в надир изображение за 14.09.2015, прибор «Геотон» спутника «Ресурс-П № 1» (пространственное раз-

решение 0,7 м); вторым – изображение того же спутника за 10.08.2015, не прошедшего географическую привязку, и построение ортофотоплана, но скорректированное алгоритмом. Изображение снято под углом более 30º от надира. Рельеф характеризовался перепадом высот до 250 м. На рис. 2 представлены результаты расчетов, проведенных алгоритмом. Векторы смещений показывают значительную нелинейность трансформации изображения и достигают величин в 150 пикселей. Векторы автоматически отфильтровываются не только на облачности, но и на дороге, что имеет естественное объяснение. Совмещение осуществляется по пологу леса, который почти сплошной на данном фрагменте. Дорога лежит ниже полога на среднюю высоту деревьев, поэтому совмещение дороги с пиксельной точностью при имеющихся углах наблюдения невозможно (векторы смещений для дороги были отфильтрованы, так как относились к другому уровню поверхности и их оказалось недостаточно для организации совмещения дороги). Расчеты показывают, что на большей части изображений точность не превышает 1 пиксель. Ошибки в 1–2 пикселя наблюдаются в районе сильной изменчивости рельефа. Визуальный анализ показал, что вершины деревьев, которые значительно превышают уровень полога, так же и по той же причине не совмещаются с пиксельной точностью. Следует заметить, что при точной географической привязке наших изображений точного совмещение пологов не было бы вообще (разница могла достигать величины порядка 10 пикселей при средней высоте деревьев около 20 м). Для задачи автоматического определение вырубок одиночных деревьев, например, такая точность была бы неприемлема.

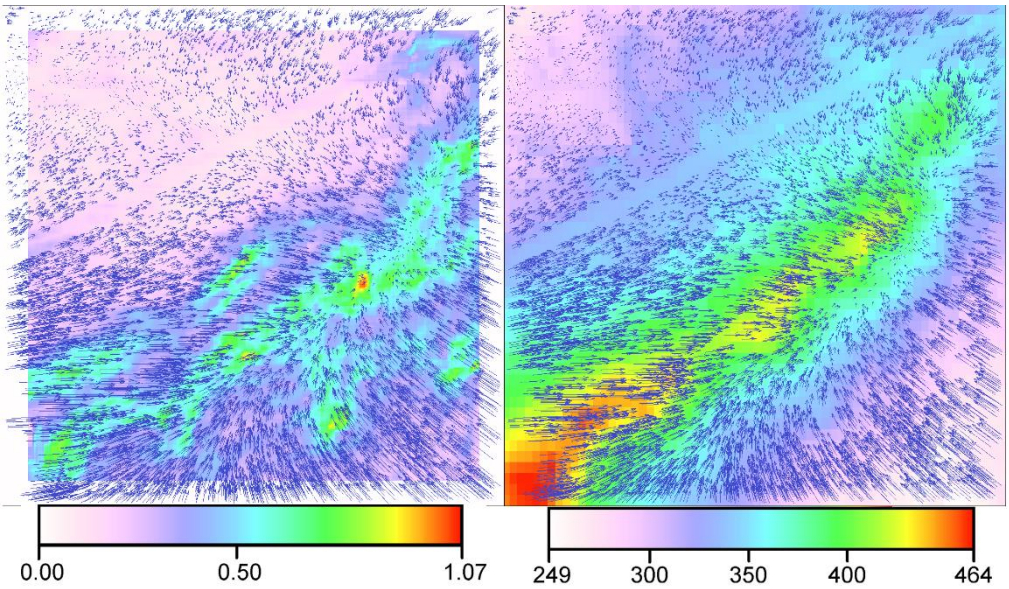


Рис. 2. Слева – векторы смещений после фильтрации на карте точности расчета векторов смещений в пикселях; справа – те же векторы на карте рельефа местности, м

Заключение. Автоматическое совмещение изображений с пиксельной точностью на основе векторов, отобранных аффинным преобразованием, возможно даже при значительной изменчивости изображений местности и ее рельефа на таких сложных объектах, как лес. С получающейся точностью совмещаются не конкретные пиксели, а их окрестности, размер которых оптимально выбирается при осреднении векторов. В пределах этого размера заданная точность совмещения не гарантируется из-за возможности резких перепадов рельефа на небольших расстояниях. Поскольку метод автоматически находит значительное количество пар реперных точек фактически для произвольной местности,

то на практике часто возможно разбиение изображений на участки, которые совмещаются посредством аффинного преобразования с пиксельной точностью. Аффинное преобразование является избыточным по количеству определяемых параметров. Эту избыточность можно использовать для контроля и улучшения точности получаемого отображения. Наилучшее аффинное преобразование с заданной точностью не гарантирует отбор наилучших векторов для заданного фрагмента изображения. Расчет согласованности векторов соседних участков позволяет скорректировать аффинные преобразования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-41152).

Список литературы

1. SURF: Speeded Up Robust Features / H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L.V. Gool // Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110, № 3. P. 346–359.

2. Совмещение изображений с российских спутников Ресурс-П / А.И. Алексанин, С.М. Краснопеев, М.А. Морозов, Е.В. Фомин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 1. С. 18–28

3. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. 1988. P. 147–151.

УДК 631.4

А.С. Баторов, Т.Н. Демьяненко

Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
e-mail: batorov.aleksei@mail.ru, t-demyanen@mail.ru

СОЗДАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПОЧВЕННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

Продемонстрирован опыт создания крупномасштабной цифровой модели рельефа на территорию сельскохозяйственных угодий учхоза «Миндерлинское» в Красноярской лесостепи. Выявлены тесные связи между геоморфологическими и почвенными границами. Показаны возможности использования модели для крупномасштабного почвенного картографирования.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, почвенное картографирование, метод триангуляции нерегулярных сетей, Красноярская лесостепь.

Рациональное землепользование строится на основании учета всех условий, лимитирующих производство сельскохозяйственной продукции. Одним из главных факторов, обусловливающих направленность и интенсивность потоков вещества и энергии в агроэкосистеме, является рельеф. Он чаще всего влияет на дифференциацию почвенного покрова и, таким образом, устанавливает степень неоднородности почвенного плодородия внутри отдельного хозяйства.

Базовым документом для планирования и ведения хозяйственной деятельности была и остается крупномасштабная почвенная карта, содержащая фундаментальную информацию о важнейшем компоненте ландшафта. Однако специфика почвы как объекта картографирования определяет неизбежную условность типологических границ между почвенными контурами. Решение данной проблемы или корректировка почвенных карт возможно при использовании цифровых моделей рельефа (ЦМР) и данных

© Баторов А.С., Демьяненко Т.Н., 2018

дистанционного зондирования по независимым переменным методом дискриминантного анализа [1]. Подобный опыт имел положительные результаты на обширных территориях, где для анализа использовались цифровые модели рельефа SRTM. Для территории отдельных хозяйств подобные изыскания не представляются возможными по причине отсутствия крупномасштабных моделей рельефа.

В настоящей статье мы демонстрируем опыт построения цифровой модели рельефа и возможности ее использования для геоморфологической оценки территории и почвенного картографирования.

Объектом исследования является территория учебно-опытного хозяйства «Миндерлинское», расположенного в Сухобузимском районе Красноярского края, вблизи поселка Борска в 50 км к северу от Красноярска. Координаты учебного хозяйства – 92º54' с. ш., 56º26' в. д. Площадь исследуемой территории составляет примерно 9 300 га.

Для анализа рельефа была создана цифровая модель методом триангуляции нерегулярных сетей (Triangulated Irregular Network – TIN) [2] на основе топографических карт ВИСХАГИ масштаба 1 : 25 000. Модель рельефа создавалась средствами ГИС MapInfo версии 12.2. Координатное пространство задано с помощью навигационной программы Sas.Planet. Для построения модели на карту было нанесено 6 805 точек, лежащих в основном на изолиниях высот. Каждая из точек содержала информацию о высоте в месте ее расположения.

Характеристика почвенного покрова всей территории учхоза «Миндерлинское» проведена с помощью почвенной карты, составленной в 1989 г. институтом Востсибгипрозем, которая была оцифрована коллективом авторов [3].

Исследуемая площадь расположена в Красноярской лесостепи и входит в состав Чулымо-Енисейской пластовой денудационной наклонной пологоувалистой равнины, Западно-Сибирской низменности.

Амплитуда высот исследуемой территории значительна при минимальных отметках в 190 и максимальных в 330 (рисунок). Рельеф сформирован в основном экзогенными процессами. Заметно выражен микрорельеф.

На цифровой модели четко видно чередование положительных и отрицательных форм рельефа образующих неоднородный холмисто увалистый и грядообразный мезорельеф. Формирование макрорельефа в этой области происходит при постоянном взаимодействии древних тектонических структур и новейших тектонических движений, а также большого количества факторов экзогенного преобразования.

Красноярская лесостепь занимает предгорную, аллювиальную равнину или древнюю поверхность выравнивания, которая пересечена современной сетью левых притоков Енисея. Эта равнина представляет собой полузамкнутую впадину, у которой как бы отогнут северо-западный край. В направлении с юга на север и с запада на восток, а также от периферии к центру высотные отметки понижаются.

В целом следует отметить, что геоморфологические особенности лесостепи Красноярска благоприятны для использования этой территории в пашне. Неблагоприятной особенностью, уменьшающей интенсивность использования территории, является наличие холмистого рельефа в южной части лесостепи и большого количества склоновых земель, наиболее легко подвергающихся плоскостному смыву и ветровой эрозии. Эффективность использования в пашне несколько снижена также в местах распространения бугристо-западинного микрорельефа из-за вызываемой им пестроты почвенного и растительного покровов и трудностей обработки почвы.

На территории учхоза южные склоны занимают 33,06 % от общей склоновой площади, в то время как северные – 66,97 %. По густоте эрозионного расчленения – редко расчлененная. По вертикальному расчленению глубокорасчлененный, характеризующейся большим перепадом высот между водоразделом и тальвегом. В данной местности преобладают склоны 1–3°, что составляет 63,7 % от общей территории.

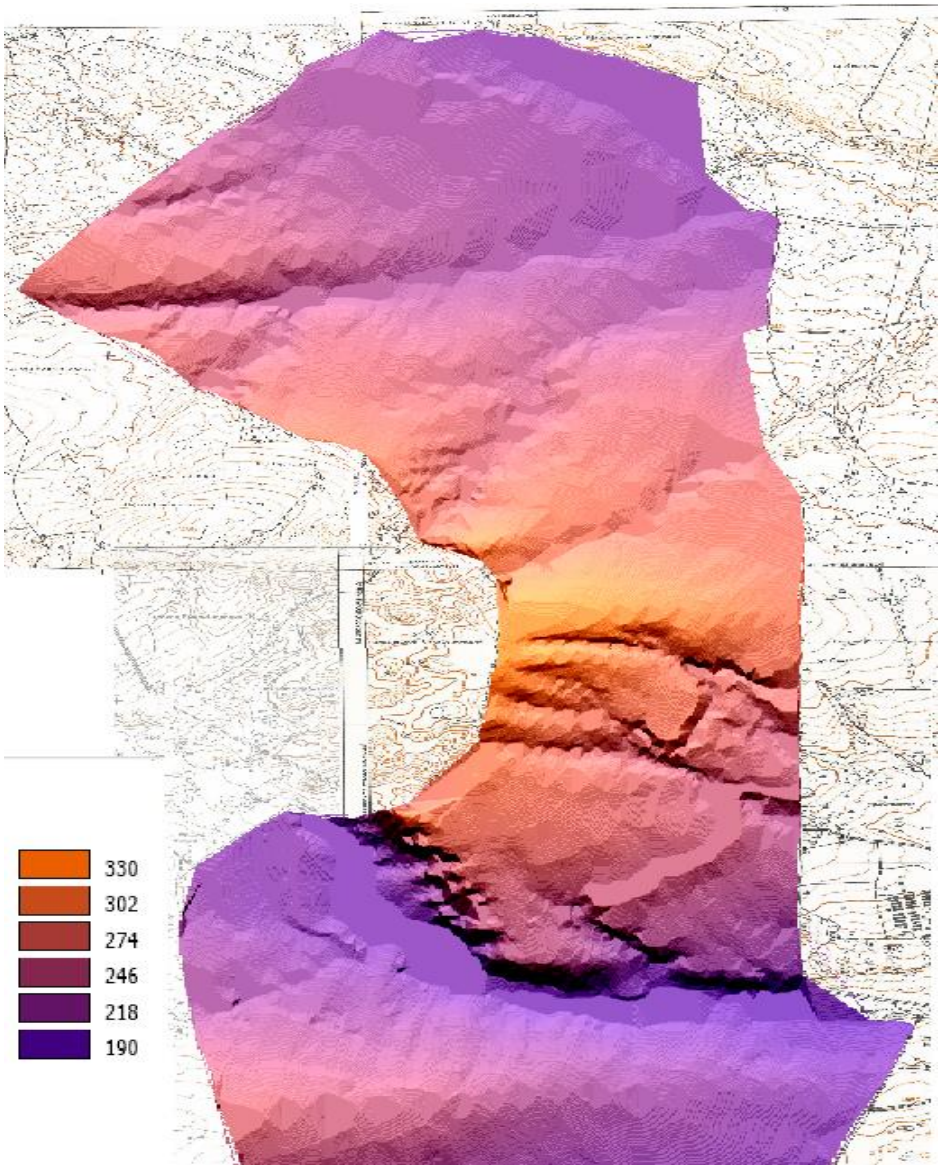


Рисунок. Цифровая модель рельефа территории учхоза «Миндерлинское»

По крутизне склоны относятся к очень отлогим, по длине склоны 1–3° относятся к длинным, а все остальные – к склонам средней длины. Данные склоны экзогенного происхождения образованы выносом материала и являются денудационными.

Река Миндерла является своеобразной границей разделяющей два разных участка, где формы рельефа были образованны разными экзогенными процессами [4].

В северной части учхоза на денудационной площади, созданной совместной деятельностью склоновых процессов и временных потоков, находится большое количество выпуклых длинных водособирающих склонов с направлением на восток. Эти склоны собирают и концентрируют жидкие атмосферные осадки, вследствие чего здесь образуются лугово-черноземные и лугово-черноземные оподзоленные почвы. Вместе со стоком воды происходит аккумуляция органического и минерального вещества, поэтому почвы в таких понижениях имеют повышенное содержание гумуса по сравнению с окружающими черноземами. Именно поэтому эти почвы высокоплодородны. Но собирающие склоны наиболее опасны в эрозионном отношении на участках с повышенной крутизной и обусловливают залегание в данных позициях почв разной степени смытости. На более дренированных возвышенностях, где влагозадержание уменьшено,

располагаются маломощные серые лесные почвы, в средней части склона – среднемощные серые лесные, а в нижней части склона, где увлажнение за счет стока воды увеличено, образовались темно-серые лесные мощные почвы с увеличенным гумусовым горизонтом и большим содержанием гумуса.

К югу от реки Миндерлы формы рельефа образованы русловой и внутридолинной аккумуляцией. Весь южный район учебного хозяйства занимает довольно большая водораздельная площадь, которая протянулась с запада на восток со средним уклоном в 1 %. Склон преимущественно восточный. Почвы, находящиеся на этой площади, – это в основном черноземы (выщелоченные и обыкновенные), располагаются они на более пологих склонах. Лугово-черноземные почвы распространены пятнами среди черноземов внутри ложбин.

Таким образом, в условиях лесостепи Красноярска рельеф является ведущим фактором дифференциации почвенного покрова, так как типологическая принадлежность почв определяется степенью увлажненности и смытости. В обоих случаях площади ареалов находятся внутри соответствующих геоморфологических границ.

Построенная цифровая модель рельефа при дополнительной обработке позволит оперативно корректировать границы имеющихся почвенных контуров и может быть картографической основой для создания новых почвенных карт. Для более детального картографирования с отображением структуры почвенных комбинаций наиболее перспективны ЦМР, построенные с использованием беспилотных летательных аппаратов

Список литературы

1. Кренке А.Н. Коррекция почвенных карт на основе данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почвенный ин-т им В.В. Докучаева, 2012. С. 284–301.

2. Руководство пользователя MapInfo Professional 12.0. 650 с.

3. Оценка плодородия почв и почвенных комбинаций пахотных земель Красноярской лесостепи / В.В. Чупрова, Т.Н., Демьяненко З.С. Жуков, Ю.В. Бабиченко // Почвоведение и агрохимия. Минск. 2015. № 2 (55). С. 47–56.

4. Геоморфологическая карта. Лист О-46-XXXIII. Масштаб 1 : 500 000. ГП «Красноярскгеолсъемка», 1999.

УДК 519.688; 551.594.21

М.Ю. Беликова, С.Ю. Каранина, А.В. Каранин, А.В. Глебова

Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия,
e-mail: belikovamy@yandex.ru

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ WWLLN НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА FRIS-TAX

Представлены результаты кластеризации с помощью алгоритма FRiS-Tax выборки молниевых разрядов, зарегистрированных сетью WWLLN на территории Республики Алтай. Оценка качества кластеризации проведена с помощью спутниковых данных по облачности, на которых выделены области возможного формирования грозовых ячеек. Области наличия грозовых ячеек определены по величине температуры верхней границы облаков (менее 220 К) и фазовому составу облаков (лед).

Ключевые слова: молниевые разряды, грозовые ячейки, WWLLN, кластеризация, функция конкурентного сходства, FRiS-Tax.

© Беликова М.Ю., Каранина С.Ю., Каранин А.В., Глебова А.В., 2018

Введение. Выявление закономерностей пространственно-временного распределения грозовых ячеек является важной задачей в исследовании атмосферного электричества [1; 2]. Изучение молниевой активности в настоящее время ведется с использованием активных и пассивных радаров [например, 2–5], а также с помощью спутниковых наблюдений [6–7]. Наибольшим территориальным охватом регистрации грозовых разрядов обладают глобальные грозопеленгационные сети Всемирная сеть локализации молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network, WWLLN), любительская сеть Blitzortung.org, глобальная сеть регистрации молниевых разрядов фирмы Vaisala (Global Lightning Dataset, GLD360). Мониторинг молниевой активности с помощью региональных систем грозопеленгации реализован на территории США, Канады, Бразилии, Австралии, Европы, Африки, России, Китая и в некоторых других странах. Россия обладает крупнейшей территорией и относительно невысокой плотностью населения, в силу чего остаются неохваченными региональными наземными системами грозопеленгации отдельные регионы юга Западной и Восточной Сибири. Одним из доступных источников результатов инструментальных наблюдений за грозами здесь являются данные всемирной сети локации молний (Word Wide Lighting Location Network, WWLLN) [1–4].

Для выделения групп молниевых разрядов, соответствующих грозам (грозовым облакам) или конвективным ячейкам в активном грозовом состоянии, широко применяются методы кластерного анализа. При этом используются известные алгоритмы с готовой программной реализацией, например: k-means, dbscan, сеточные алгоритмы и т.п. [8–11]. Алгоритмы кластеризации, как правило, имеют некоторый набор входных параметров, от которых могут зависеть результаты группировки объектов исследования. Для проверки качества полученной группировки молниевых разрядов проводится сопоставление характеристик выделенных кластеров (групп разрядов) с известными параметрами гроз (например, средняя продолжительность и площадь гроз) или со спутниковыми и радиолокационными изображениями грозовой облачности.

Отметим, что процедура группировки данных о молниевых разрядах усложняется, если ее целью является определение местоположения и траектории перемещения грозовых ячеек. В этом случае необходимо определять ячейки минимального возможного размера (с учетом точности регистрации разрядов), иерархическую структуру грозовых ячеек (одноячейковая, многоячейковая гроза) и изменение этой структуры во времени. Показано, что иерархические агломеративные алгоритмы кластеризации (методы ближайшего соседа, полной и средней связи и метод Уорда) не всегда позволяют получить хорошо интерпретируемые в этом случае результаты [1; 12].

Одним из достаточно новых алгоритмов кластеризации, позволяющих выделять кластеры произвольной формы и определять их иерархическую структуру, является алгоритм FRiS-Tax [13], основанный на использовании функции конкурентного сходства (Function of Rival Similarity, FRiS-функции) [14].

В данной работе представлены результаты автоматического выделения грозовых ячеек на основе выборки молниевых разрядов, зарегистрированных сетью WWLLN на территории Республики Алтай. Предложена модификация алгоритма FRiS-Tax для данных, имеющих временную и пространственную характеристики. Оценка качества кластеризации молниевых разрядов проводится с привлечением спутниковых данных по облачности, на которых экспертно выделены области возможного формирования грозовых ячеек. Экспертные области определены по величине температуры верхней границы облаков (менее 220 К) и фазовому составу облаков (лед).

Алгоритм FRiS-Tax для пространственно-временных данных. Алгоритм FRiS-Tax разбивает множество объектов исходной выборки на линейно разделимые кластеры и состоит из двух этапов [13]. На первом этапе, называемом FRiS-Cluster, отыскиваются центры локальных плотностей объектов по всей исследуемой выборке.

На втором этапе, называемом FRiS-Class, происходит процедура укрупнения таксонов и усложнения их формы.

Для выполнения кластерного анализа молниевых разрядов априорными пороговыми параметрами являются: r^* – линейные размеры грозовой конвективной ячейки; t^* – среднее время существования грозовой конвективной ячейки. Линейные размеры грозовой конвективной ячейки могут составлять от 25 до 100 км, время существования – от 20 до 60 мин. Модификация алгоритма FRiS-Tax для группировки объектов с известным пространственным положением и временем регистрации, в простом случае выглядит следующим образом:

1. Имеющаяся выборка объектов упорядочивается по времени.

2. Задаются значения априорных параметров r^* и t^*, определяющих максимальное расстояние и разницу во времени регистрации между объектами одного кластера соответственно.

3. Первому объекту присваивается номер кластера 1.

4. Вычисляются расстояние и разница во времени регистрации между первым и следующим объектом. Если вычисленные величины меньше r^* и t^*, соответственно, то второй объект принадлежит кластеру 1, в противном случае второй объект считается столпом нового кластера, которому присваиваем номер 2.

5. Если уже выделены два и более столпов (кластеров), то при «появлении» нового объекта среди существующих кластеров определяются кластеры ближайшие к новому объекту при условии, что расстояние и разница по времени регистрации не превышает заданных априорных значений. Если два столпа, удовлетворяющие указанным условиям найдены, то оценка принадлежности объекта кластеру происходит в ситуации конкуренции и проводится с помощью FRiS-функции [14]. Если условие по расстоянию и времени регистрации выполняется только для одного из столпов, то объект относится к кластеру, описываемому этим столпом. Если ни один столп, удовлетворяющий условиям, не найден, то объект становится столпом нового кластера.

Вычислительный эксперимент и результаты. Объектами вычислительного эксперимента служили данные о 34 грозовых разрядах, зарегистрированных WWLLN на территории Республики Алтай 7 августа 2017 г. в период с 07:15 по 08:15 ВСВ (14:15–15:15 по местному времени). Этот временной интервал соответствует спутниковым данным по облачности грануле продукта MYD06 (MODIS/Aqua) в 7:45 по ВСВ. На основе MYD06 для территории Республики Алтай были выделены облака с температурой верхней границы менее 220 К и фазовым составом «лед». Облака с такими параметрами имеют высокую вероятность формирования и развития молниевых разрядов.

Целью вычислительного эксперимента являлась оценка работоспособности описанной выше схемы группировки грозовых разрядов на основе FRiS-функции, а также определение степени влияния на результат кластеризации априорных параметров. Для построения группировочных решений для рассматриваемой выборки разрядов написан скрипт на языке R.

При кластеризации молниевых разрядов были использованы следующие значения априорных параметров: r^* = 50 км, 75 км, 100 км и t^* = 20 мин, 30 мин, 40 мин, 50 мин, 60 мин. Совпадение числа кластеров грозовых разрядов, выделенных с помощью рассматриваемого алгоритма, с экспертной оценкой было получено для нормировочных параметров: r^* = 50 км и t^* = 30 мин, 40 мин, 50 мин. На рисунке представлены выделенные кластеры для параметров r^* = 50 км и t^* = 30 мин и их соответствие облакам, имеющим высокую вероятность возникновения молниевых разрядов.

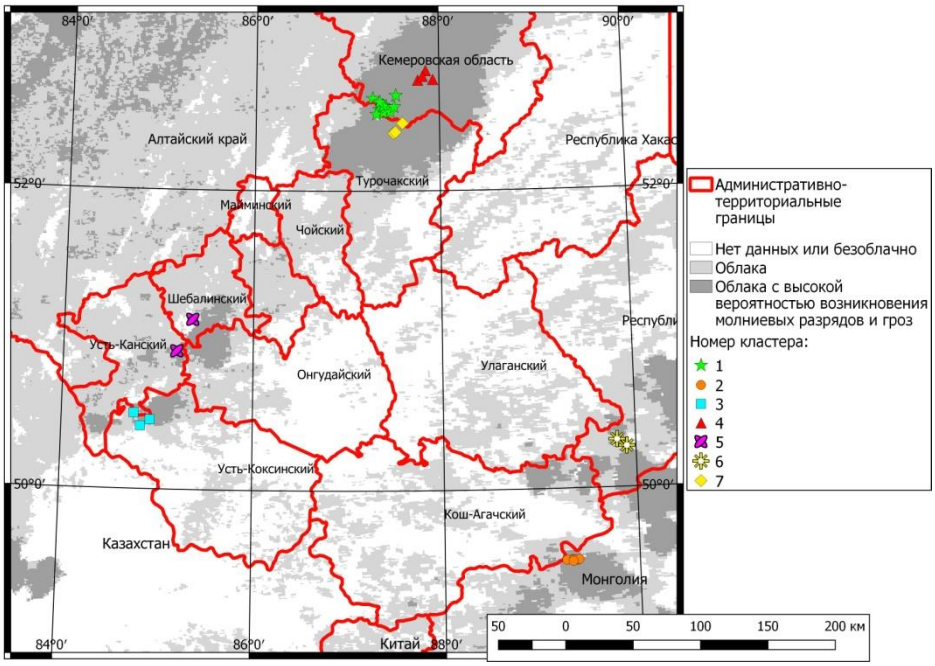


Рисунок. Кластеры молниевых разрядов (при $r^* = 50$ км и $t^* = 30$)
и их соответствие грозовым облакам

В северной части республики (участок между 52 и 53° с. ш. и 87 и 88° в. д.) наблюдается «сложный» кластер, который состоит из трех групп разрядов предположительно соответствующих многоячейковому грозовому облаку. В западной (участок между 50 и 52° с. ш. и 84 и 86° в. д.) и восточной (участок между 49 и 51° с. ш. и 89 и 90° в. д.) частях рассматриваемой территории имеется по два кластера молниевых разрядов, которые, на наш взгляд, принадлежат разным конвективным ячейкам, определяемым по параметрам облачности.

Отметим также, что при увеличении значений априорных параметров до «максимальных» значений, соответствующих линейным и временным размерам грозовой ячейки (100 км и один час), алгоритм FRiS-Tax позволяет выделять кластеры большего размера. Например, при указанных параметрах на рассматриваемой выборке выделяется три кластера: северный, восточный и западный. Подобную зависимость количества кластеров от увеличения значений априорных параметров, характеризующих линейные размеры грозовой ячейки, не удалось получить для алгоритмов DBSCAN и K-MEANS [12].

Заключение. В работе сформулирована модификация алгоритма FRiS-Tax, которая позволяет решать задачу кластеризации данных с учетом их близости только по пространственному положению и времени регистрации. В результате кластеризации были получены группы молниевых разрядов, которые хорошо согласуются с линейными размерами грозовых ячеек. В перспективе с помощью этого алгоритма, возможно, будет отследить изменение иерархический структуры кластеров во времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-47-040081).

Список литературы

1. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms //Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2014. Т. 119, №. 1. С. 620–629.

2. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг. / Е.А. Мареев, В.Н. Стасенко, А.А. Булатов [и др.] // Изв. Рос. академии наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 2. С. 175–186.

3. Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002. Т. 64, №. 7. С. 817–830.

4. Relative detection efficiency of the world wide lightning location network / M.L. Hutchins [et al.] // Radio Science. 2012. Т. 47, № 6.

5. Грозопеленгационная система Росгидромета: сайт. URL: http://lightnings.ru.

6. Lightning & Atmospheric Electricity Research. Space Research and Observations. URL: https://lightning.nsstc.nasa.gov/lis/overview_lis_instrument.html.

7. GHRC DAAC. Lightning Space Search and Observations. Geostationary Lightning Mapper (GLM). URL: https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/overview_glm.html.

8. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Кластерный анализ грозовой активности // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 3. С. 283–291.

9. Аджиева А.А, Шаповалов В.А. Кластерный анализ в автоматическом выявлении и сопровождении грозовых очагов по данным грозопеленгационной сети // Инженерный вестник Дона: электрон. науч. журн. 2016. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3559.

10. Mezuman K., Price C., Galanti E. On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells // Environmental Research Letters. 2014. Т. 9, № 12. С. 124023.

11. Характеристики грозовых ячеек по наблюдениям в Якутии / С.Н. Шабаганова, Р.Р. Каримов, В.И. Козлов, В.А. Муллаяров // Метеорология и гидрология. 2012. № 12. С. 35–43.

12. Беликова М.Ю., Каранина С.Ю., Глебова А.В. Экспериментальное сравнение алгоритмов кластеризации в задаче группировки данных о грозовых разрядах // Кибернетика и программирование. 2018. № 1. С. 15–26. URL: http://e-notabene.ru/kp/article_25261.html.

13. Борисова И.А. Алгоритм таксономии FRiS-Tax // Научный вестник НГТУ. 2007. № 3. С. 3–12.

14. Загоруйко Н.Г. Интеллектуальный анализ данных, основанный на функции конкурентного сходства // Автометрия. 2008. Т. 44, № 3. С. 30–40.

УДК 550.388

С.Ю. Белов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, e-mail: Belov_Sergej@mail.ru

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ КВАДРАТУРНЫХ КОМПОНЕНТ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ КОГЕРЕНТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН НА ТЕСТОВОМ ПОЛИГОНЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Представлена разработанная и сконструированная автором экспериментальная аппаратура наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн для оценки параметра сигнал/шум. Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум. Показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный.

Ключевые слова: рассеяние радиоволн поверхностью, методика измерения, дистанционное зондирование, КВ-диапазон, параметр рассеяния сигнал/шум, ионосфера.

В работе рассматривается задача дистанционной диагностики «шероховатой» земной поверхности и диэлектрических подповерхностных структур в коротковолно-

© Белов С.Ю., 2018

вом диапазоне радиоволн [1]. Выбор КВ-диапазона позволяет учитывать и подповерхностный слой (толщины порядка длины волны падающего излучения), поскольку параметр рассеяния формируется также и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур [3]. При этом в качестве параметра, характеризующего рассеивающую способность радиоволн земной поверхности, используется соотношение сигнал/шум β [5]. Данным методом при организации мониторингового зондирования, возможно выявлять области изменения этих сред, например, для оценки опасных природных явлений, изменения экосистем [4]. Также эти методики могут использоваться для развития системы мониторинга [3], контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также для оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций [6]. Идея метода определения этого параметра заключается в том, что, располагая синхронной информацией о волне, отраженной от ионосферы и о волне, отраженной от земли и ионосферы (или прошедшей ионосферу дважды при зондировании со спутника), возможно извлекать информацию о параметре рассеяния [6]. Интерпретация получаемых данных производится на основе статистической мультипликативной модели сигнала [4; 10]. Тестирование произведено на примере двукратного отражения от ионосферы при вертикальном зондировании [7–9; 12; 15–27]. В работе приведены графики поведения аналитических (относительных) погрешностей для рассматриваемых методик в диапазоне экспериментально наблюдаемых значений исследуемого параметра.

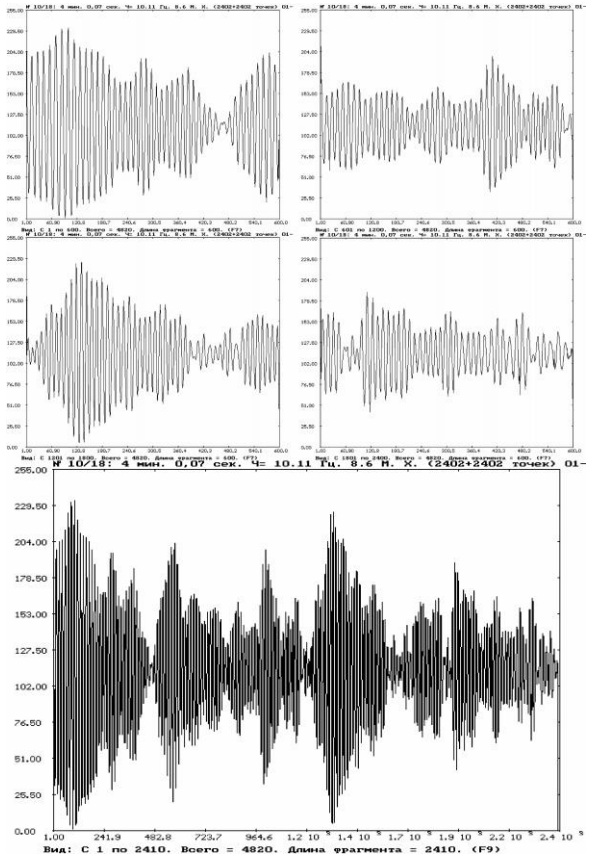


Рис. 1. Квадратурная компонента
однократно отраженного сигнала:
1я, 2-я, 3-я, 4-я минуты
и полный сеанс (слева направо сверху вниз)

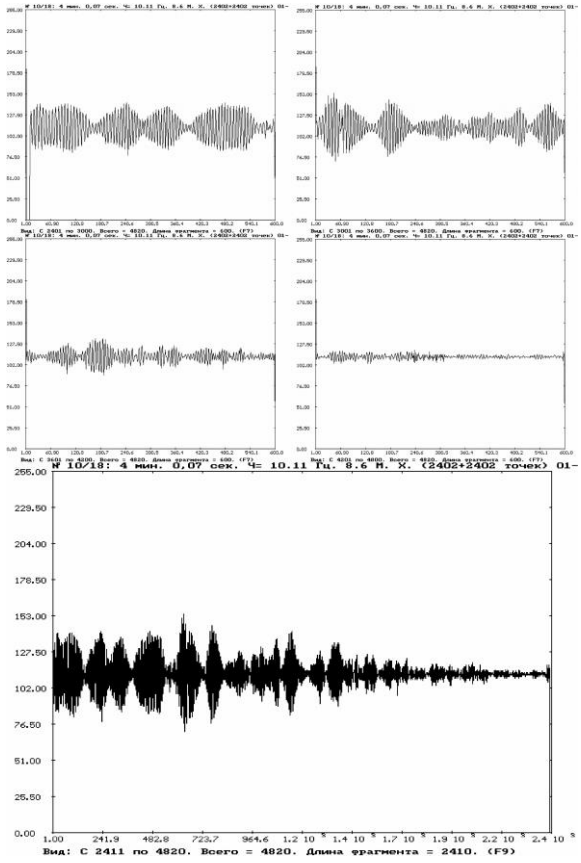


Рис. 2. Квадратурная компонента
двукратно отраженного сигнала:
1-я, 2-я, 3-я, 4-я минуты
и полный сеанс (слева направо сверху вниз)

Для получения необходимых экспериментальных данных используется импульсный метод когерентного приема [7]. Этот метод позволяет регистрировать низкочастотные квадратурные составляющие ионосферного сигнала Ec(t), Es(t). По ним возможно определение огибающей и фазы, т.е. функции модуляции сигнала.

Для того чтобы применить аппаратуру когерентного приема к исследованию кратных ионосферных отражений, необходимо было обеспечить возможность выделения и одновременной регистрации параметров, относящихся к сигналам разной кратности [20; 22]. В установке используется схема регистрации низкочастотных квадратурных компонент ионосферного сигнала. Модернизация обеспечила регистрацию на ЭВМ упомянутых параметров сигнала одновременно для сигналов различной кратности [20; 22]. Это достигнуто применением специальной многоканальной системы стробирования и регистрации [14]. На рис. 1, 2 представлены образцы регистрации квадратурных компонент сигнала с помощью наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн на тестовом полигоне МГУ для первого и второго отражений соответственно. В работе представлена структурная схема установки со схемой регистрации и стробирования. Установка позволяет осуществлять одновременную регистрацию параметров кратных ионосферных отражений, причем даже с использованием ЭВМ с не очень высоким быстродействием за счет применения оригинальных алгоритмов оптимизации: патент [2].

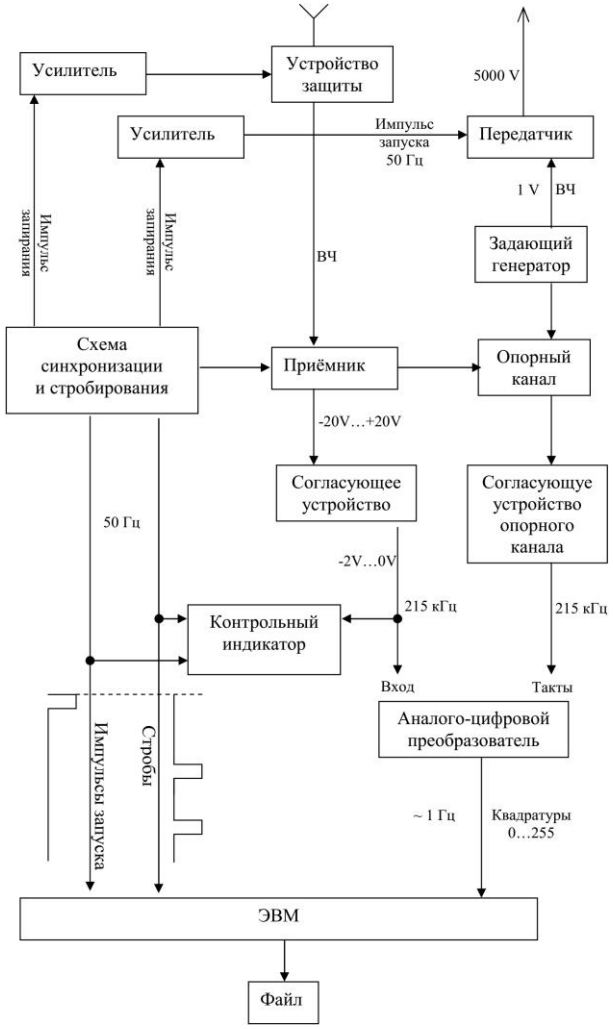


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки наземного измерительного комплекса

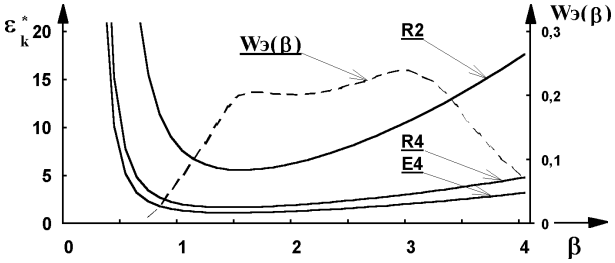


Рис. 4. Графики зависимостей ε_K^*, K = R2, R4, E4 аналитических погрешностей оценки параметра β (сплошные линии) и экспериментальное распределение WЭ(β) (пунктир)

Заключение. В работе представлена разработанная и сконструированная автором экспериментальная аппаратура наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн для оценки параметра сигнал/шум (рис. 3). Предложен новый некогерентный метод R4 оценки параметра сигнал/шум β. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод R4 на порядок превосходит широко используемый стандартный R2 [11] (рис. 4). Анализ аналитических погрешностей оценки этого параметра позволил рекомендовать новый метод R4 вместо стандартного R2.

При этом достаточно высокая аналитическая (относительная) точность оценки параметра β может быть достигнута с помощью некогерентной аппаратуры, используя метод R4. Разработано, успешно апробировано и запатентовано программное обеспечение для синхронной регистрации квадратурных компонент радиосигналов различной кратности в реальном режиме времени с формированием базы экспериментальных данных; одной из функций программного обеспечения является защита компьютерной системы от мощного излучающего импульса радиопередатчика.

Список литературы

1. Белов С.Ю. Известия ВУЗ. Физика. 2016. Т. 59, № 12–3. С. 121–124.
2. Белов С.Ю. Программа регистрации квадратурных компонент *n*-кратного, отраженного от земной поверхности радиосигнала // Свидетельство о регистрации права на программное обеспечение № RU.2016612172 от 19.02.2016.
3. Belov S.Yu., Belova I.N. SPIE. Bellingham, WA, United States. Vol. 10466. P. 104666V-1–9. DOI: 10.1117/12.2288609.
4. Belov S.Yu. Czech Polar Reports. CPR Special issue ASSW2017. The Arctic Science Summit Week ASSW2017. Prague, Czech Republic. 2017. Vol. 7, № 2. P. 216–231. DOI: 10.5817/CPR2017-2-21.
5. Белов С.Ю. Ученые записки физического факультетата Московского университета. 2017 № 44. С. 1740701-1–1740701-9.
6. Белов С.Ю. Вестник Краунц. Физ.-мат. науки. 2017. № 4 (20). С. 9–27. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-20-4-9-27.
7. Belov S.Yu., Belova I.N. Proceedings of UNESCO-IUGS–IGCP 610 and INQUA IFG POCAS Joint Plenary Conference. Palermo, Italy. University of Palermo. 2017. P. 39–44.
8. Belov S.Yu., Belova I.N. Methods of obtaining data on the characteristics of superficial and subsurface structures of the earth by remote sensing in the short-wave range of radio waves // IGCP 610 project «From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary» (2013–2017). GNAS Tbilisi. Georgia. 2016. P. 26–29.
9. Belov S.Yu. Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies, Geoinformatics research papers. 2016. Vol. 4, № 2. P. 50. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
10. Belov S.Yu., Belova I.N., Falomeev S.D. Managing Risks to Coastal Regions and Communities in a Changing World. St. Petersburg, 2016. DOI: 10.21610/conferencearticle_58b4316d2a67c.
11. Белов С.Ю., Белова И.Н. Математические методы определения характеристик рассеивающей способности отражающего экрана когерентным и некогерентным способами // Математика, физика, информатика и их приложения в науке и образовании. М.: МТУ (МИРЭА), 2016. С. 155–157.
12. Belov S.Yu., Belova I.N. The analysis of methods of determination the scattering parameter of the inhomogeneous fluctuating ionospheric screen // Atmosphere, Ionosphere, Safety. Kaliningrad. 2016. P. 435–440.
13. Распространение радиоволн. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 3. С. 94–97.
14. Белов С.Ю. Космический мониторинг характеристик прибрежных территорий для обеспечения экологической безопасности зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // Экология. Экономика. Информатика. Ростов н/Д: ЮФУ, 2016. С. 27–41.
15. Белов С.Ю. Технологии мониторинга природных объектов и экосистем дистанционным зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // Фундаментальные проблемы экологии России. Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2017. С. 25.
16. Белов С.Ю. Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. С. 17–21.
17. Белов С.Ю. Диагностика подповерхностных свойств земли дистанционным зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // БелкамНефть. Ижевск: Ин-т компьютерных исследований. 2017. С. 65–70.
18. Белов С.Ю. Инновационные методы мониторинга экосистем озер дистанционным зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2017. С. 29–34.

19. Белов С.Ю., Белова И.Н. Технологии и инструментальные методы экологического мониторинга земной поверхности и подповерхностных структур дистанционным зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // Экология и космос. СПб.: ВКА им.А.Ф.Можайского, 2017. С. 52–57.

20. Белов С.Ю. Комплексные исследования Мирового океана. М: ИО РАН. С. 41–44.

21. Белов С.Ю. Математические методы обработки результатов экспериментов по дистанционному зондированию атмосферы и «шероховатой» земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн для рационального природопользования // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.» Ч. 1. 2017. С. 118–127.

22. Белов С.Ю. Программно-аппаратный комплекс наземной измерительной установки когерентного приема по исследованию рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // «Ломоносов – 2017». М.: МГУ, 2017. С. 502–504.

23. Белов С.Ю. Физические процессы в космосе и околоземной среде. Иркутск, 2017. С. 240–242.

24. Belov S.Yu., Belova I.N. International Conference on Energy and Environmental Science ICEES-2017. Rangsit Campus. Thailand, 2017. P. 23.

25. Belov S.Yu. Global Challenges and Data Drive Science. Saint-Petersburg, 2017. P. 187.

26. Belov S.Yu. RSPSoc2017 Annual Conference Earth & Planets: making the most of our observations. Imperial College London, 2017. P. 46.

27. Belov S.Yu. The Arctic Science Summit Week 2017. Prague, 2017. P. 161.

УДК 528.885, 552.08

Т.А. Беляева, П.П. Бобров, Е.С. Крошка

Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия
e-mail: smallermoon@mail.ru

ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА КОМПЛЕКСНУЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОЧВ ПРИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Исследована комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) трех почвенных образцов с разным содержанием глины и гумуса в частотном диапазоне от 1 кГц до 8 ГГц при температурах от –15 до +25 °С. В этом частотном диапазоне проведено моделирование процессов диэлектрической релаксации, обусловленных поляризацией границ «вода – минерал» и «вода – воздух». Использована комбинированная рефракционно-релаксационная модель КДП. Найдены зависимости параметров модели от температуры и влажности образцов.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, процессы диэлектрической релаксации, почва, гумус, глина.

Введение. Информация о комплексной диэлектрической проницаемости почв (КДП) используется при определении влажности дистанционными микроволновыми методами при подповерхностном зондировании с помощью георадаров, диэлектрическом каротаже и т.п. Модели, описывающие зависимость КДП от температуры и влажности, охватывают сравнительно узкий частотный диапазон [1; 2]. Трудность моделирования в широком частотном диапазоне связана с тем, что на КДП влияют несколько

© Беляева Т.А., Бобров П.П., Крошка Е.С., 2018

релаксационных процессов, проявляющихся на разных частотах: ориентационная поляризация молекул связанной и свободной воды; эффект Максвелла – Вагнера, приводящий к значительному возрастанию действительной и мнимой частей КДП при уменьшении частоты. При частичной водонасыщенности возникает релаксационный процесс, в результате которого на частотах ниже 50–200 МГц действительная часть КДП может быть выше, чем при полной водонасыщеноти [3].

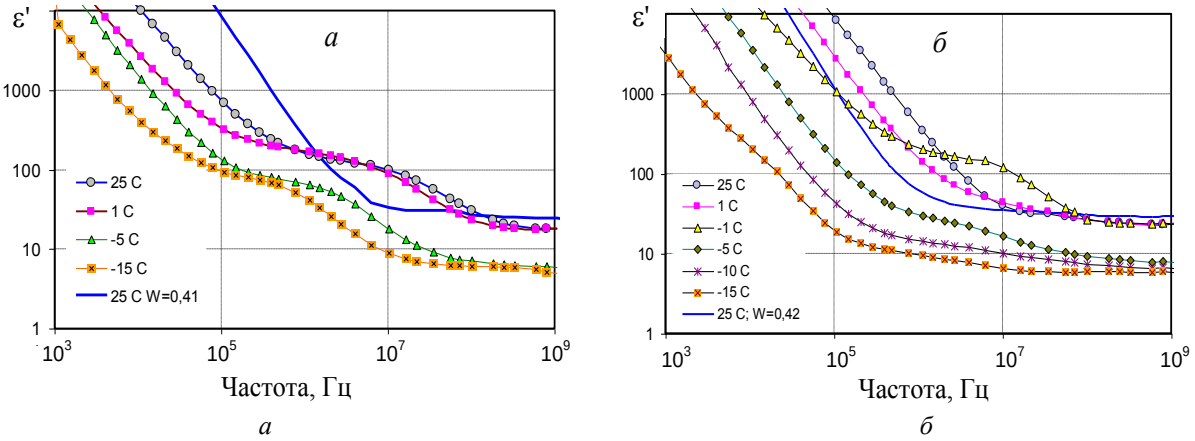
Целью работы является определение параметров моделей этих процессов в глинистых почвах при разных значениях влажности и температуры путем обработки экспериментально найденных спектров диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 1 кГц до 8 ГГц.

Объекты и методы. Были проведены экспериментальные измерения КДП трех образцов: порошка кварцевых гранул почти сферической формы со средним диаметром (по количеству) 5,9 мкм (образец 1); двух почвенных образцов чернозема обыкновенного, взятого из одного шурфа с глубин 0–10 и 60–70 см с содержанием физической глины (по массе) 56,9 % (образец 2) и 45,7 % (образец 3) и содержанием гумуса 6,5 и 0,9 %, соответственно. Размеры частиц определялись методом лазерной дифракции, содержание гумуса – методом Тюрина.

Измерение КДП образцов производилось по методике, изложенной в [4]. Особенностью методики является измерение одного и того же образца, помещаемого в коаксиальную ячейку, во всем частотном диапазоне. Для измерений использовались векторный анализатор цепей Rohde & Schwarz ZNB8 и анализатор импедансов Keysight Technologies E4990A. Погрешность измерений действительной и мнимой частей КДП составляла от 0,2 до 4 % в разных частотных диапазонах. Для установки температуры образца в диапазоне от –15 до + 25 °С применялась климатическая камера TH-ME-25 (Республика Корея) с точностью установки температуры 0,3 °С.

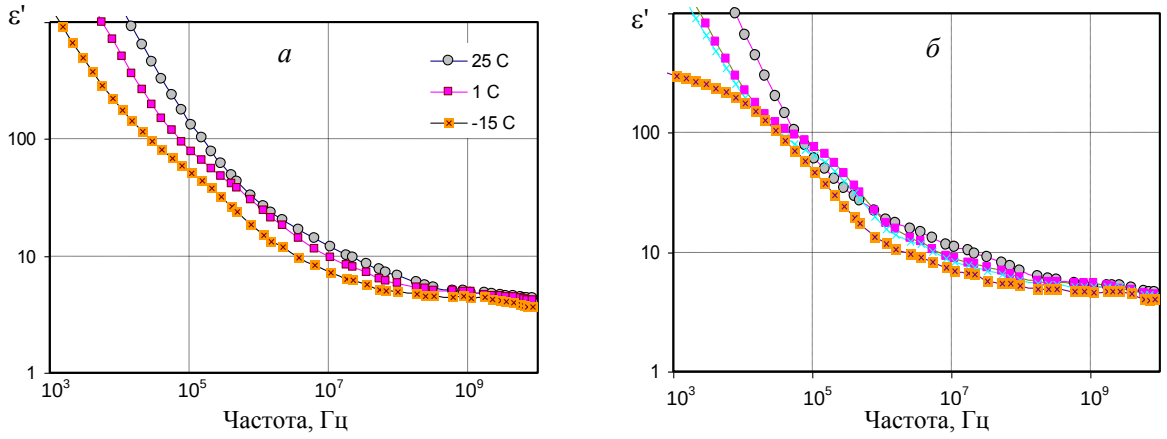
Образцы насыщались, как правило, дистиллированной водой. Влажность определялась термостатно-весовым способом с применением весов Госметр ВЛ-200 с точностью определения массы 0,07 мг.

Экспериментальные результаты. Ниже приведены некоторые результаты измерения действительной части КДП. Значительное возрастание ε' на частотах ниже 10^6–10^7 Гц обусловлено межслойной поляризацией Максвелла – Вагнера. При частичной водонасыщенности ниже порога перколяции возникают один или два релаксационных процесса, в результате чего может нарушаться монотонная зависимость ε' от влажности и температуры (рис. 1, 2).



а *б*

Рис. 1. Влияние поляризации границы вода-воздух на действительную часть КДП образца № 1 (кварцевого порошка), увлажненного дистиллированной водой до влажности 0,33 (*а*) и солевым раствором 4 г/л до влажности 0,30 (*б*), при разных температурах. Сплошными линиями показаны зависимости КДП при доле воды W = 0,41–0,42



а *б*

Рис. 2. Частотные зависимости ε' почвенных образцов 2 (*а*), 3 (*б*) при отсутствии свободной воды в почвах. Объемная доля воды в образце 1 равна 0,10, в образце 2 – 0,11

Комбинированная рефракционно-релаксационная модель КДП. Для описания зависимости КДП глинистых почв часто применяется рефракционная модель [1; 2], согласно которой комплексный показатель преломления влажной почвы равен

$$\dot{n} = \dot{n}_d + (\dot{n}_b - 1)W \qquad \text{если } W \le W_t \tag{1}$$

$$\dot{n} = \dot{n}_d + (\dot{n}_b - 1)W + (\dot{n}_u - 1)(W - W_t) \qquad \text{если } W > W_t\,. \tag{2}$$

Здесь W – объемная доля воды; W_t – максимальная доля связанной воды; подстрочные индексы *d*, *b*, и *u* у комплексных показателей преломления обозначают сухую почву, связанную и свободную воду соответственно.

Комплексный показатель преломления связан с КДП следующим соотношением:

$$\dot{n} = \sqrt{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{\varepsilon' - i\varepsilon''}\,.$$

Частотная зависимость связанной и свободной воды может быть выражена моделью с двумя процессами релаксации:

$$\dot{\varepsilon}_w = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{wS1} - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_{w1}} + \frac{\Delta\varepsilon_{wS2}}{1 + i\omega\tau_{w2}}\,,$$

где подстрочный индекс *w* означает форму воды (*b* или *u*). Индексы 1 и 2 обозначают релаксационные процессы, вызванные ориентационной поляризацией молекул воды и межслойной поляризацией, соответственно.

Уравнения (1), (2) на фиксированных частотах являются линейными функциями содержания воды. Однако на частотах ниже 50–100 МГц действительная часть может возрастать при уменьшении количества воды вследствие релаксационного процесса, вызванного поляризацией границы вода-воздух (см. рис. 1). Параметры модели этого процесса уже не являются монотонными функциями содержания воды и не могут быть описаны вышеприведенной моделью. Эту модель необходимо дополнить релаксационной функцией Коула-Коула и коэффициентом потерь, вызванных ионной проводимостью. Окончательное выражение для КДП почвы имеет вид

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon'' = (\dot{n})^2 + \frac{\Delta\varepsilon_{S3}}{1 + (i\omega\tau_3)^{1-\alpha}} - i\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\,,$$

где $\Delta\varepsilon_{S3}$, τ_3 и α – параметры третьего процесса релаксации (α – коэффициент распределения времен релаксации); σ – ионная проводимость почвы; ε_0 – диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8{,}854\cdot10^{-12}$ Ф/м.

Параметры модели подбирались путем минимизации различия между экспериментальными и вычисленными данными. Параметры модели, относящиеся к связанной

воде для разных значений температуры, подбирались в образцах, где свободная вода отсутствовала. На частотах выше 1 ГГц подбирались значения действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления сухой почвы. Параметры второго релаксационного процесса и ионная проводимость подбирались на частотах ниже 50 кГц, где отсутствовало влияние третьего процесса. На последнем этапе подбирались параметры третьего релаксационного процесса в частотном диапазоне 10 кГц – 8 ГГц. Эти параметры оказались разными в почвах с разным содержанием гумуса (см. рис. 3). Затем параметры первого и второго релаксационных процессов в связанной воде использовались в модели образцов, содержащих свободную воду или лед (при отрицательных температурах). Параметры ε_{S1} и τ_1 для свободной воды и льда определялись по модели Дебая [5]. Параметры $\Delta\varepsilon_{S2}$ и τ_2 для свободной воды и $\Delta\varepsilon_{S3}$, τ_3 и σ определялись путем подбора.

Результаты моделирования. Статическая проницаемость ε_{bS1} связанной воды при уменьшении температуры от 25 °С до 0 медленно возрастала от 33 до 35 в образце 2 и от 31 до 34 в образце 3, затем уменьшалась при –15 °С до 20, 24 ед. соответственно. Время релаксации τ_{b1} при уменьшении температуры от 25 до –15 °С почти монотонно возрастало от 12 до 49 пс в образце 2 и от 10 до 30 пс в образце 3. Результаты параметров модели третьего релаксационного процесса приведены на рис. 3. Время релаксации имеет тенденцию к возрастанию при уменьшении температуры. Статическая проницаемость при отрицательных температурах, как правило, выше, однако вблизи нуля одновременно с уменьшением времени релаксации уменьшается и статическая проницаемость.

При моделировании КДП почв, содержащих свободную воду, возникла необходимость учитывать еще один релаксационный процесс, возникающий при отрицательных температурах. Удалось определить, что в песчаных гранулах это влияние малого количества незамерзшей свободной воды. В почвах этот релаксационный процесс имеет время релаксации 12–20 пс. В работе [6] сделано предположение, что это влияние связанной воды на поверхности льда.

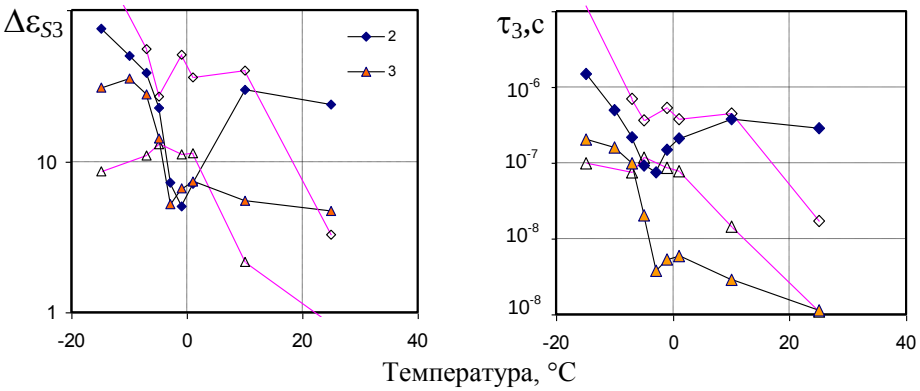


Рис. 3. Параметры третьего процесса релаксации в почвенных образцах 2 и 3. Светлые маркеры – объемная доля воды $W = 0{,}1$, темные маркеры $W = 0{,}21$

Заключение. Спектры КДП влажных и мерзлых почв подвержены влиянию многих релаксационных процессов, времена релаксации и интенсивность некоторых из них зависят от гранулометрического состава, наличия гумуса и солености почвенного раствора. Влияние этих процессов проявляется, в основном, на частотах ниже 100 МГц, однако их слабое влияние простирается и до частот порядка 1 ГГц, которое необходимо учитывать в диэлектрических моделях, применяемых при решении задач ДЗЗ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 5.9513.2017/8.9).

Список литературы

1. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils / V.L. Mironov, M.C. Dobson, V.H. Kaupp [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2004. Vol. 42, № 4. P. 773–785.

2. Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V. Multirelaxation generalized refractive mixing dielectric model of moist soils // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2013. Vol. 10, № 3. P. 603–606.

3. Bobrov P.P., Lapina A.S., Repin A.V. Effect of the Rock/Water/Air Interaction on the Complex Dielectric Permittivity and Electromagnetic Waves Attenuation in Water-saturated Sandstones // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings. Prague, July 6–9, 2015. P. 1877–1879.

4. Bobrov P.P., Repin A.V., Rodionova O.V. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. Vol. 53, № 5. P. 2366–2372.

5. Мосин О.В. Диэлектрические свойства воды и льда. URL: http://www.o8ode.ru/article/water/dielectric_water.htm.

6. Temperature- and texture-dependent dielectric model for frozen and thawed mineral soils at a frequency of 1.4 GHz / V.L. Mironov, L.G. Kosolapova, Y.I. Lukin [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 200. P. 240–249.

УДК 528.8

А.А. Беляков

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
Красноярский НИИСХ, Красноярск, Россия
e-mail: belyakov@ksc.krasn.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Исследована динамика основных метеорологических показателей, формирующих микроклимат в данной географической точке, и дано аналитическое представление конфигурационного пространства и движения гиперконуса обобщенных показателей потока атмосферного воздуха, влияющего на продуктивность агробиогеоценоза.

Ключевые слова: метеорологические показатели, обобщенный показатель динамики, аналитический мониторинг, микроклимат, агробиогеоценоз, географические координаты.

Введение. При исследовании микроклимата, отнесенного к данной географической точке и ее окрестности наряду со средними многолетними величинами температуры, давления, влажности и скорости потока атмосферного воздуха, большое значение имеют инварианты их внутригодовой динамики, а также неявные закономерности их пульсаций или колебаний [1–6]. Известные обобщенные показатели (функции) Миссенарда, Сайпла и др. определяются исходя из показателей температуры (T, °С), давления (P, мм. рт. ст.) влажности (R, %) и скорости (V, м/с) потока атмосферного воздуха и практически используются для биоклиматической оценки среды – различных биогеоценозов, но имеют существенные ограничения на области определения. Поэтому определенный интерес представляет поиск обобщенных показателей, более устойчивых по сравнению с исходными, но эквивалентных их системному действию. Степень устойчивости обобщенных

© Беляков А.А., 2018

показателей непосредственно влияет на эффективность прогностических функций в формируемом модельном представлении – пригодных для прогнозирования метеорологических элементов на будущий и прошлый временные периоды.

Цель исследований – босновать обобщенный показатель состояния атмосферного воздуха, действие которого равносильно влиянию системы основных метеорологических показателей на агробиогеоценоз и прирост продуктивности сельскохозяйственных культур.

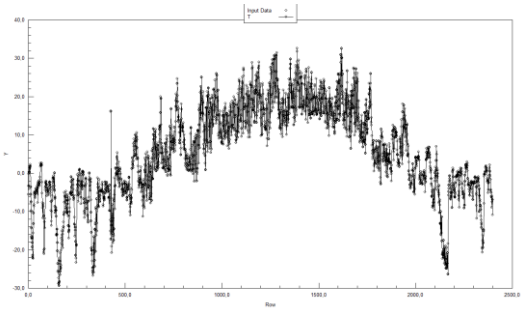
Задачи исследований: оценить взаимное влияние основных метеорологических и вычислить весовые коэффициенты каждого показателя, позволяющего перейти к набору взвешенных показателей; построить конфигурационное пространство и задать гиперповерхность, согласованного изменения во времени показателей температуры, давления, влажности и скорости потока атмосферного воздуха; на имеющемся массиве данных по температуре, давлении, влажности и скорости потока атмосферного воздуха [7] выполнить проверку инвариантности подвижной гиперповерхности во времени.

Объект исследований. Система основных и обобщенных метеорологических показателей, наблюдаемых числовых характеристик микроклимата, отнесенных к данной географической точке и ее окрестности (Плодовоягодная станция Среднесибирского УГМС, 56°01'33" с. ш., 92°42'16" в. д.).

Предмет исследований. Закономерности изменения метеорологических показателей и формирования микроклимата, влияющего на агробиогеоценоз.

Методика и методы исследования. Взаимодействие термодинамических показателей потока атмосферного воздуха представлены квадратичной формой. В качестве взвешиваемого показателя X_j последовательно выбраны величины: T^2, P^2, R^2, V^2, TP, TR, TV, PR, PV, RV, T, P, R, V. Значения коэффициентов b_{ij}, b_k, b_0 определены методом регрессионного анализа с использованием в качестве регрессоров этого же списка показателей (за исключением одного выбранного для взвешивания). Для сопоставимости весовых коэффициентов все зависимости приведены к общему значению нагрузки. Применен аппарат математического моделирования, регрессионного анализа, многомерной аналитической геометрии. Использованы компьютерные пакеты DataFit и Maple.

Результаты исследования. Динамика и весовые коэффициенты определены для давления, влажности, скорости потока воздуха (рис. 1–4) и для других показателей.



Рисю 1. Динамика температуры (*T*, °C)

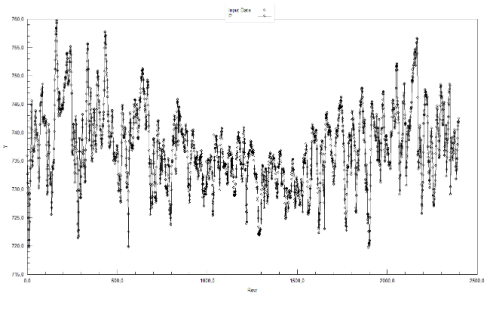


Рис. 2. Динамика давления (*P*, мм рт. ст.)

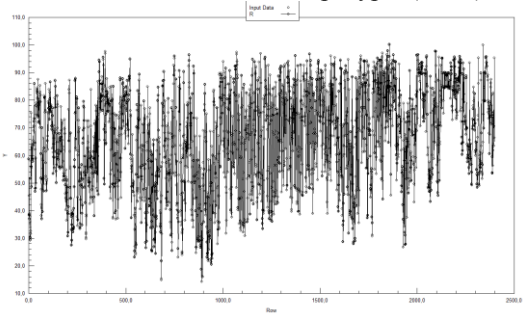


Рис. 3. Динамика влажности (*R*, %)

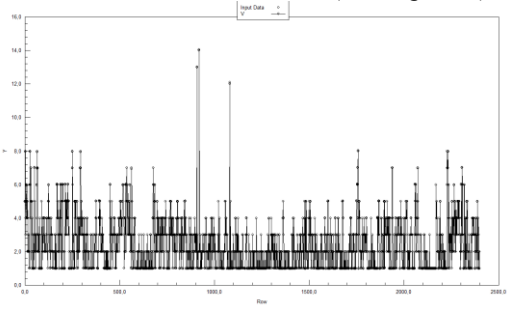


Рис. 4. Динамика скорости (*V*, м/с)

Детерминированность всех исследованных зависимостей, за исключением квадрата температуры, выше 95 %. Обобщенные показатели $\overline{T},\overline{P},\overline{R},\overline{V}$ (обобщенная температура, обобщенное давление, обобщенная влажность, обобщенная скорость потока атмосферного воздуха) с помощью одноименных основных показателей T, P, R, V (температура, давление, влажность, скорость потока воздуха) определяются посредством неоднородных сверток. Квадратичная форма

$$\overline{Q}\left(\overline{T},\overline{P},\overline{R},\overline{V}\right)\equiv\left(\overline{T}-e_T\right)^2+\left(\overline{P}-e_P\right)^2+\left(\overline{R}-e_R\right)^2-\left(\overline{V}-e_V\right)^2,$$

где $e_{Tk}=\overline{F}_k\cdot m_{Tk}$, $e_{Pk}=\overline{F}_k\cdot m_{Pk}$, $e_{Rk}=\overline{F}_k\cdot m_{Rk}$, $e_{Vk}=\overline{F}_k\cdot m_{Vk}$, задает гиперповерхность $\left(\overline{T}-e_T\right)^2+\left(\overline{P}-e_P\right)^2+\left(\overline{R}-e_R\right)^2-\left(\overline{V}-e_V\right)^2=C$ второго порядка. Выбором одного из трех значений $C=-1,0,1$ в каждый момент времени $t=k$ определены значения $\overline{F}_k$ и координаты центра подвижной гиперповерхности (табл. 1).

Таблица 1

Аналитическая оценка положений центров подвижных гиперповерхностей, отвечающих уровням $C=-1,0,1$

T	P	R	V	$\overline{H}$	F	e_{TPR}	e_V	$\hat{T}$	$\hat{P}$	$\hat{R}$	$\hat{V}$	$\overline{Q}$
[1]–30,30	719,70	14,30	0,00	–8,22	–4,49	–3,54	–4,45	–2,50	–2,67	–2,26	–5,37	–1,00
[2]3,71	737,99	68,95	2,35	1,34	1,01	0,80	–1,38	–0,80	–0,95	0,40	1,73	–1,00
[3]32,60	759,70	100,00	14,00	14,30	3,26	2,57	6,14	3,48	0,56	3,95	4,42	–1,00
[4]12,87	7,12	18,52	1,44	1,01	0,51	0,40	0,70	0,42	0,39	0,35	0,42	–1,00
[1]–30,30	719,70	14,30	0,00	–8,22	–4,19	–3,30	–1,99	–1,26	–1,70	–0,05	–4,96	0,00
[2]3,71	737,99	68,95	2,35	1,34	0,58	0,46	–0,79	–0,46	–0,61	0,74	1,14	0,00
[3]32,60	759,70	100,00	14,00	14,30	1,46	1,15	5,72	3,25	0,66	3,72	1,93	0,00
[4]12,87	7,12	18,52	1,44	1,01	0,42	0,34	0,58	0,35	0,33	0,23	0,36	0,00
[1]–30,30	719,70	14,30	0,00	–8,22	–3,89	–3,07	–1,32	–0,88	–1,84	0,76	–4,55	1,00
[2]3,71	737,99	68,95	2,35	1,34	0,15	0,11	–0,20	–0,12	–0,27	1,08	0,55	1,00
[3]32,60	759,70	100,00	14,00	14,30	0,97	0,76	5,31	3,01	1,96	3,48	1,78	1,00
[4]12,87	7,12	18,52	1,44	1,01	0,39	0,31	0,54	0,33	0,31	0,13	0,43	0,00

Примечание. 1 – минимальное значение; 2 – среднее; 3 – максимальное значение; 4 – стандартное отклонение.

Выбор значения C и типа гиперповерхности $\overline{Q}=C$ сделан исходя из минимума стандартного отклонения квадрата обобщенной скорости. Поэтому гиперповерхность на самом деле является гиперконусом. С учетом этого факта измерены основные [7] и вычислены обобщенные метеорологические показатели, отнесенные к гиперконусу второго порядка (табл. 2).

Таблица 2

Динамика основных и обобщенных метеорологических показателей, отнесенных к гиперконусу

Час.	T *	P *	R *	V *	$\overline{H}$	$\overline{F}$	e_{TPR}	e_V	$\hat{T}$	$\hat{P}$	$\hat{R}$	$\hat{V}$	$\overline{Q}$
1 января													
0	–5,50	735,90	58,70	5,00	0,02	0,01	0,00	–0,01	–0,05	–0,20	1,00	1,02	0,00
3	–3,30	732,70	45,40	8,00	–2,10	–0,39	–0,31	0,54	0,27	0,11	1,07	1,11	0,00
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
21	1,20	722,80	29,60	5,00	–0,79	–0,25	–0,19	0,34	0,18	–0,04	0,68	0,70	0,00

Час.	T *	P *	R *	V *	$\overline{H}$	$\overline{F}$	e_{TPR}	e_V	$\hat{T}$	$\hat{P}$	$\hat{R}$	$\hat{V}$	$\overline{Q}$
2 января — 30 декабря													
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
31 декабря													
0	–8,90	741,90	82,70	1,00	2,04	0,90	0,71	–1,22	–0,77	–0,88	0,72	1,37	0,00
3	–7,50	741,90	70,60	2,00	1,37	0,53	0,42	–0,73	–0,48	–0,59	0,79	1,10	0,00
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
18	–10,90	741,60	95,30		2,74	1,37	1,08	–1,87	–1,15	–1,26	0,57	1,80	0,00
21	–10,90	742,50	95,30	1,00	2,73	1,06	0,83	–1,44	–0,90	–1,01	0,81	1,58	0,00

Примечание.* – данные ФГБУ Среднесибирское УГМС с шагом 3 ч [7].

Зафиксировав любых два из четырех показателей квадратичной формы можно построить области и линии уровни по двум оставшимся показателям (рис. 5–8).

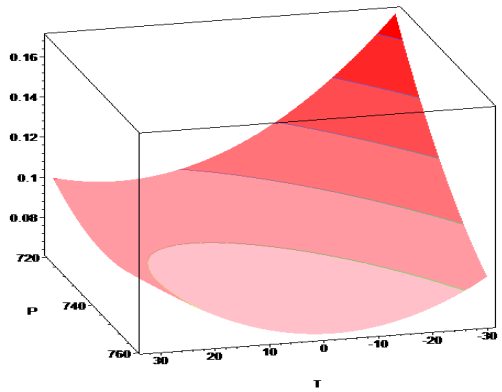


Рис. 5. Области температуры T, °С, и давления P, мм. рт. ст., при влажности R = 14,30 % и скорости ветра V = 0,00 м/с

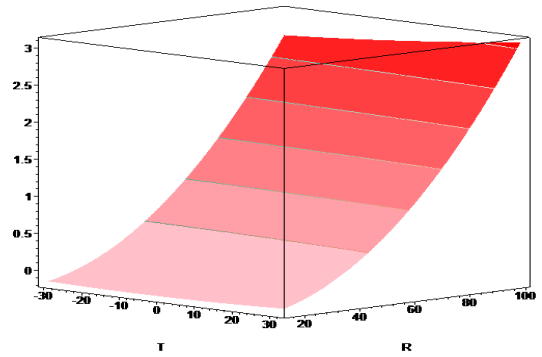


Рис. 6. Области температуры T, °С, и влажности R, %, при давлении P = 737,99 мм. рт. ст. и скорости ветра V = 2,35 м/с

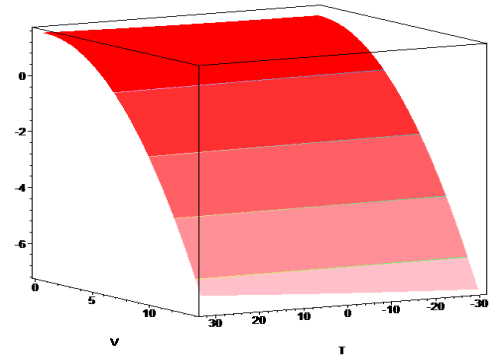


Рис. 7. Области температуры T, °С, и скорости V, м/с, при давлении P = 737.99 мм. рт. ст. и влажности R = 68,95 %

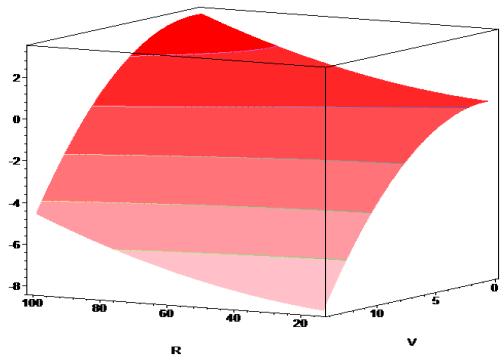


Рис. 8. Области влажности R, %, и скорости V, м/с, при температуре T = 32,60 °С и давлении P = 759,70 мм. рт. ст.

Таким образом, динамика системы показателей потока атмосферного воздуха может быть представлена движением точки $M(q,t)$ конфигурационного пространства вдоль подвижного гиперконуса второго порядка с уравнением связи:

$$\overline{Q}\left(\overline{T},\overline{P},\overline{R},\overline{V},t\right)\equiv\left(\overline{T}-m_T\overline{F}(t)\right)^2+\left(\overline{P}-m_P\overline{F}(t)\right)^2+\left(\overline{R}-m_R\overline{F}(t)\right)^2-\left(\overline{V}-m_V\overline{F}(t)\right)^2=$$
$$=\hat{T}^2+\hat{P}^2+\hat{R}^2-\hat{V}^2=0,$$

где $\hat{T} = \overline{T} - m_T \overline{F}(t)$, $\hat{P} = \overline{P} - m_P \overline{F}(t)$, $\hat{R} = \overline{R} - m_R \overline{F}(t)$, $\hat{V} = \overline{V} - m_V \overline{F}(t)$ – обобщенные метеорологические показатели; $\overline{F}(t)$ – обобщенный показатель, характеризующий движение центра гиперконуса метеорологических факторов.

Заключение. Аналитическая характеризация взаимного влияния показателей потока атмосферного воздуха над данной географической точкой может быть полезной для разработки теоретических методов прогнозирования, уточнения, систематизации или восстановления данных метеорологических наблюдений с использованием средств дистанционного зондирования.

Авторы выражают благодарность руководству и коллективу ФГБУ «Среднесибирское УГМС» в лице начальника Владимира Викторовича Ерёмина за полезные сведения и материалы, размещенные на официальном сайте организации.

Работа выполнена рамках комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг. (проект № 74).

Список литературы

1. Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 1. Обнинск: ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 808 с.

2. Иванников А.В. Краткий терминологический словарь по агрометеорологии. Астана, 2001. 31 с.

3. Лосев А.П., Журина Л.Л. Агрометеорология. М.: Колос, 2001. 297 с.

4. Уланова Е.С. Методы агрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1959. 280.

5. Чирков Ю.И. Агрометеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 296 с.

6. Шульгин А.М. Агрометеорология и агроклиматология. М.: Гидрометеоиздат, 1978. 200 с.

7. ФГБУ Среднесибирское УГМС: сайт. URL: http://www.meteo.krasnoyarsk.ru.

УДК 528.088.4:520.626.05[631.425.2]

Е.В. Василенко, Л.Л. Тарасова

Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации,
Москва, Россия
e-mail: wittmann20@mail.ru, lydia_tarasova@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ УБОРКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В СИБИРСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Технология спутникового мониторинга агрометеорологических условий проведения полевых работ базируется на анализе данных по относительной влажности верхнего слоя почвы, получаемых с активного микроволнового зондировщика ASCAT (ИСЗ MetOp-A,B). Оценка состояния верхнего слоя почвы проводилась по градациям. Новый информационный продукт возможно использовать в практике агрометеорологов, агрономов и страховщиков.

Ключевые слова: влажность почвы, дистанционное зондирование Земли.

© Василенко Е.В., Тарасова Л.Л., 2018

Условия проведения уборочной кампании в значительной степени влияют на конечную урожайность сельскохозяйственных культур. Частые дожди, высокая влажность воздуха и переувлажнение верхнего почвы в период уборки могут быть не менее губительными для урожая зерновых, чем засухи в период роста. В связи с этим даже при самых лучших видах на урожай мониторингу агрометеорологических условий проведения уборки уделяется повышенное внимание. Наиболее остро этот вопрос стоит в Сибирском федеральном округе, где яровые зерновые культуры поспевают в конце августа – начале сентября, а уже во второй половине сентября при понижении фона температуры существенно возрастает влажность воздуха, что ухудшает условия для проведения уборки.

Оценка условий уборки только по количеству осадков не дает полноты картины. Если осадки оцениваются по данным сети станций Росгидромета, то такая оценка репрезентативна для некоторой окрестности этой станции и остается неясным, что происходит вне этой окрестности. Если оценка ведется на основе данных численного моделирования или данных спутникового мониторинга, то встает проблема верификации этих данных. Кроме того, остается проблема водного баланса почвы, так как именно переувлажнение верхнего слоя почвы и повышенная влажность воздуха препятствуют ходу уборочных работ.

Предлагается следующий алгоритм.

1. Выделить области с различным состоянием верхнего слоя почвы. Твердопластичному состоянию соответствуют значения относительной влажности менее 50 %. Мягкопластичное состояние наблюдается при значениях от 51 до 80 %, причем диапазон 61–80 % соответствует оптимальному уровню увлажнения почвы для роста и развития большинства сельскохозяйчтвенных культур. При относительной влажности более 80 % почва находится в липком и текучем состоянии.

2. Оценить доли территории с различным увлажнением верхнего слоя почвы. Полевые работы будут приостанавливаться, если доля территории округа (области, края), где почва находится в липком и текучем состоянии, составляет более 30 %. Если она составляет более 20%, то снижаются темпы проведения полевых работ.

3. В период проведения сева озимых зерновых культур сдерживающим фактором является и недостаточное увлажнение почвы, и можно ожидать, что темпы сева понизятся. В период весеннего сева наиболее высокие темпы будут при оптимальном увлажнении почвы, но нужно учитывать, что главным огранивающим фактором в этот период будет термический режим воздуха и почвы. В период проведения уборки зерновых культур, напротив, недостаточное увлажнение почвы является благоприятным фактором, что существенно ускоряет ее темпы.

4. На основе критериев (п. 1) можно рассчитать число дней с благоприятными, удовлетворительными и малоблагоприятными условиями для проведения полевых работ и сделать вывод об условиях для проведения полевых работ за период.

Для анализа зависимости темпов уборки от условий увлажнения верхнего слоя почвы были выбраны ежедневные данные Министерства сельского хозяйства РФ по убранным площадям зерновых и зернобобовых культур и отдельно по пшенице по основным земледельческим регионам Сибирского федерального округа (Омская, Новосибирская и Кемеровская области, Алтайский и Красноярский края). Нами были сопоставлены доли территории с различным увлажнением почвы по спутниковым данным и темпы проведения уборки.

Коэффициенты корреляции убранных за день площадей с долями территории округа с относительно сухой почвой (ОВП менее 60 % ППВ) и с избыточно увлажненной почвой (ОВП более 80 % ППВ) значимы и составляют 0,9 и –0,8 для зерновых культур в целом и 0,7 и –0,7 для пшеницы. Коэффициенты корреляции с долей терри-

тории с оптимальным увлажнением незначимы, т.е. в зависимости от конкретных условий они могут быть и вполне удовлетворительными, и малоблагоприятными.

Таким образом, по данным скаттерометра ASCAT можно достаточно корректно диагностировать увлажнение верхнего слоя почвы, что может существенно повысить качество оперативного мониторинга условий проведения полевых работ в период уборки сельскохозяйственных культур на больших территориях.

Список литературы

1. Василенко Е.В., Тарасова Л.Л. Использование данных с прибора ASCAT/MetOp для мониторинга влажности почвы // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2015. № 2. С. 40–49.

2. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) / Z. Bartalis, W. Wagner, V. Naeimi [et al.] // Geophys. Res. Lett. 2007. № 24 – L20. 401 p.

3. Consistent validation of H-SAF soil moisture satellite and model products against ground measurements for selected sites in Europe // Final Report. 2010. 56 p. URL: http://hsaf.meteoam.it/documents/reference/HSAF_AS_09_03_final_report.pdf.

УДК 528.8.04, 528.88

Е.А. Гаврилюк[1], А.С. Плотникова[1], Д.Е. Плотников[2]

[1]Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия
[2]Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
e-mail: egor@ifi.rssi.ru, alexandra@ifi.rssi.ru, dmitplot@d902.iki.rssi.ru

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПЕЧОРО-ИЛЫЧСКОГО ЗАПОВЕДНИКА И ЕГО ОКРЕСТНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ МУЛЬТИВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ LANDSAT

Работа посвящена созданию актуальной тематической карты наземных экосистем на территорию Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей по данным Landsat. Мы использовали метод восстановления мультивременных серий спутниковых изображений в сочетании с объектно-ориентированным подходом к их обработке и алгоритмом случайных лесов для тематической классификации. Общая точность классификации составила более 90 % на основе оценки по случайным контрольным точкам.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, тематическое картографирование, восстановление временных серий, наземные экосистемы, лес, Печоро-Илычский заповедник, Landsat, Full Lambda Schedule, Random Forest.

В настоящее время мультиспектральные спутниковые изображения высокого и среднего пространственного разрешения являются универсальным, оперативным и общедоступным материалом для картографирования наземных экосистем нашей планеты. Помимо большого количества локальных исследований, ряд научных работ последних лет продемонстрировал широкие возможности использования спутниковых данных Landsat для тематического картографирования растительности, как на уровне отдельных стран и регионов [1–3], так и в глобальном масштабе [4]. Использование серии разновременных спутниковых изображений, отражающих последовательность фе-

© Гаврилюк Е.А., Плотникова А.С., Плотников Д.Е., 2018

нологических изменений лесного покрова в течение всего года, позволяет существенно повысить точность тематической классификации при оценке породной структуры древостоев [5;6]. Однако текущая частота съемки спутников Landsat (раз в 8–16 дней) обычно не позволяет получить непрерывную серию безоблачных наблюдений в течение одного года. Данная проблема может быть решена путем совместного использования данных разных лет (часто и их бывает недостаточно) либо применением различных техник восстановления (моделирования) пропущенных наблюдений.

Целью нашей работы было создание актуальной тематической карты лесных и прочих наземных экосистем Печоро-Илычского государственного природного биосферного заповедника и его окрестностей в пределах Припечорской низменности по спутниковым данным Landsat. Для этого мы использовали методику восстановления мультивременных серий спутниковых изображений, чтобы компенсировать нехватку безоблачных разносезонных наблюдений для всей интересующей нас территории. Леса заповедника становились объектом многих научных исследований, в том числе содержащих результаты тематического картографирования [7; 8], однако для большей части прилегающих к нему районов подобная информация отсутствует. Полученная карта наземных экосистем предназначена, прежде всего, для использования в качестве исходных данных при разработке методов динамического картографирования пожарных режимов лесов на локальном уровне.

Материалы и методы. Территория исследования расположена в пределах Троицко-Печорского муниципального района на юго-востоке Республики Коми. Помимо Печоро-Илычского заповедника, она включает в себя части прилегающих к нему Комсомольского и Печоро-Илычского лесничеств. Общая площадь составляет примерно 14,2 тыс. км^2, около 90 % которой покрыто лесами.

Мы использовали 960 сцен Landsat-ETM+/OLI из открытого архива Геологической службы США за период с 2014 по 2016 г. для восстановления ежедневных значений спектральных яркостей с начала мая по конец сентября 2016 г. в трех наиболее информативных спектральных каналах – красном (0,63–0,69 мкм), ближнем инфракрасном (0,75–0,9 мкм) и первом среднем инфракрасном (1,55–1,75 мкм). Метод восстановления частых временных серий спутниковых изображений Landsat ранее был успешно апробирован для задач распознавания пахотных земель [9]. Суть метода заключается в нахождении и использовании пространственно-временных связей между объектами земного покрова со схожей многолетней динамикой спектрально-отражательных характеристик для восстановления пропущенных измерений. Полученные на основе интерполяции скользящим полиномом второй степени [10] ежедневные данные затем были осреднены по условным периодам года (зима, весна, лето, осень) в четыре разносезонных трехканальных композита. По каждому композиту также рассчитывались спектральные индексы NDVI и SWVI (также известен как NDWI) в качестве дополнительных признаков для тематической классификации.

В дополнение к мультиспектральным спутниковым изображениям мы использовали ЦМР ALOS World 3D – 30m (AW3D30) версии 2.1, а также стандартные производные показатели крутизны и ориентации склонов.

В качестве основы для формирования обучающей выборки для тематической классификации мы использовали карту основных типов наземных экосистем Печоро-Илычского заповедника по состоянию на 2014 г., созданную в рамках проекта РФФИ № 13-04-01521 [8], а также актуальные данные проекта Global Forest Change (GFC) о сомкнутости и изменениях лесного покрова.

В рамках объектно-ориентированного подхода на первом этапе тематической обработки проводилась автоматическая сегментация изображений алгоритмом Full Lambda Schedule [11] с масштабом равным 20 (средний размер сегмента в пикселях изображения). Тематическая классификация проводилась методом случайных лесов

(англ. Random forest) [12] с базовыми статистическими метриками, рассчитанными в пределах каждого сегмента по всем каналам восстановленных разносезонных композитов, спектральным индексам, ЦМР и ее производным в качестве переменных. Мы использовали стандартные для случайных лесов показатели при выявлении наиболее значимых спектральных и орографических признаков, а также статистических метрик сегментов с целью формирования оптимального набора переменных для классификации [13].

В виду отсутствия актуальной открытой информации (как геопространственной, так и статистической) о структуре наземных экосистем в границах территории исследования для верификации полученной карты мы использовали метод случайных контрольных точек. Тематическая принадлежность контрольных участков определялась путем визуальной интерпретации исходных данных Landsat и спутниковых изображений высокого пространственного разрешения DigitalGlobe.

Результаты. На основе восстановленной мультивременной серии данных Landsat мы получили четыре разносезонных композитных изображения для тематической классификации. Качество и полнота восстановления данных варьируется в зависимости от времени года и спектрального диапазона. Среди спектральных каналов наилучшие результаты восстановления для всех четырех сезонов были получены в ближнем инфракрасном диапазоне. В наиболее полной мере удалось восстановить летние данные, наихудшие результаты были получены для осеннего периода. В итоге восстановленными спутниковыми данными по трем сезонам (без осеннего композита) было покрыто 90,9 % территории исследования, а с учетом обработки на уровне сегментов – 95,8 %.

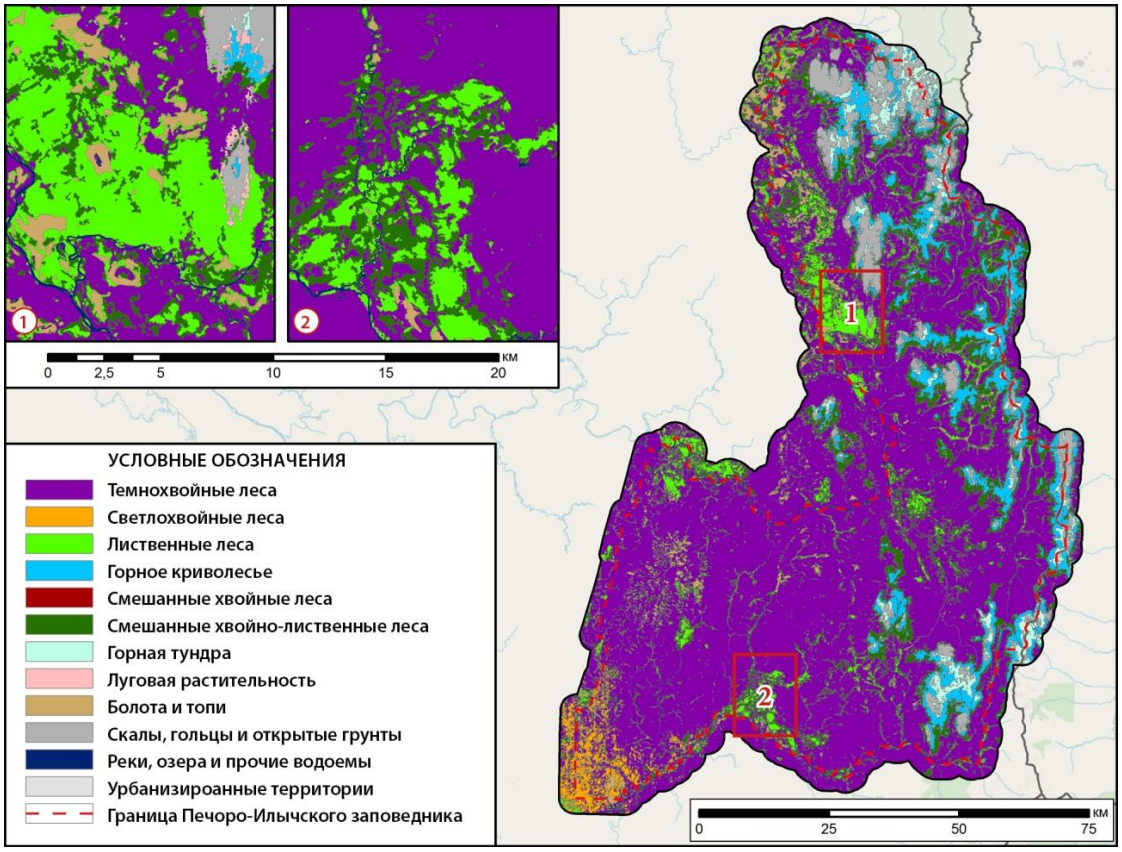


Рисунок. Карта наземных экосистем Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей по состоянию на 2016 г. пространственным разрешением 30 м (фрагмент). Общегеографическая основа и фоновое изображение – OpenStreetMap

Анализ информативности базовых статистических метрик сегментов при обучении классификационной модели случайных лесов не выявил значимой прибавки к точности распознавания тематических классов за счет использования показателей, отличных от среднего значения. Анализ информативности спектральных и орографических признаков продемонстрировал высокую значимость высоты рельеф, а также заметное преимущество отдельных спектральных каналов над индексами, рассчитанными на их основе.

Фрагмент полученной нами карты наземных экосистем приведен на рисунке. Общая точность тематической классификации, оцененная на основе 400 контрольных точек, составила 90,8 % (каппа 0,89), что можно интерпретировать как высокую степень соответствия полученной карты контрольным данным. Дополнительно только для территории Печоро-Илычского заповедника мы провели прямое пространственное сравнение полученной карты с картой 2014 г., по которой проводилось обучение. Степень соответствия карт составила 84,6 %.

Выводы. Результаты нашей работы демонстрируют возможности применения восстановленных мультивременных изображений Landsat для тематического картографирования наземных экосистем, прежде всего лесного покрова, на примере территории Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей. Использованный нами метод восстановления позволяет получать серии наблюдений в течение вегетационного периода с частотой вплоть до ежедневных, однако мы ограничились созданием разносезонных композитов, исходя из конкретных задач исследования. Несмотря на нехватку исходных безоблачных данных, для восстановления полностью непрерывных изображений на всю территорию интереса в итоге мы смогли получить тематическую карту наземных экосистем достаточно высокой точности (> 90 %), компенсировав большую часть пропусков данных за счет применения объектно-ориентированного подхода при тематической обработке. При этом было показано, что статистические метрики, отличные от среднего значения, не оказывают существенного влияния на дискриминацию классов при тематической классификации на уровне сегментов изображения Landsat (по крайней мере, для нашего набора классов). В целом использованные нами методы имеют высокий потенциал как для решения задач более детального картографирования типов наземного покрова, так и для масштабирования результатов в пространственном охвате (например, до уровня субъектов РФ), а также могут быть легко адаптированы для обработки аналогичных Landsat мультиспектральных спутниковых данных (например, Sentinel-2).

Подготовка исходных данных была выполнена в рамках ГЗ ЦЭПЛ РАН № 0110-2018-0001 «Концепция спутникового мониторинга состояния и динамики лесных экосистем». Тематическая обработка данных выполнена в рамках проекта РФФИ № 17-05-00300-18 «Разработка методологии динамического картографирования пожарных режимов лесных экосистем на локальном уровне».

Список литературы

1. A circa 2010 thirty meter resolution forest map for China / C.C. Li, J. Wang, L.Y. Hu [et al.] // Remote Sensing. 2014. Vol. 6, № 6. P. 5325–5343.

2. Large area mapping of tree species using composited Landsat imagery / S.D. Thompson, T.A. Nelson, J.C. White, M.A. Wulder // Canadian Journal of Remote Sensing. 2015. Vol. 41, № 3. P. 203–218.

3. Новая карта растительности центральной части Европейской России по спутниковым данным высокой детальности / Д.В. Ершов, Е.А. Гаврилюк, Д.А. Карпухина, К.А. Ковганко // Докл. РАН. 2015. Т. 464, № 5. С. 639–641.

4. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M.C. Hansen, P.V. Potapov, R. Moore [et al.] // Science. 2013. Vol. 342. P. 850–853.

5. Zhu X., Liu D. Accurate mapping of forest types using dense seasonal Landsat time-series // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. Vol. 96. P. 1–11.

6. Pasquarella V.J., Holden C.E., Woodcock C.E. Improved mapping of forest type using spectral-temporal Landsat features // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 210. P. 193–207.

7. Елсаков В.В., Марущак И.О. Спутниковые изображения в анализе количественных характеристик лесных фитоценозов Печоро-Илычского заповедника Республики Коми // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 303–309.

8. Диагностика современного сукцессионного состояния лесных экосистем Печоро-Илычского заповедника по спутниковым тематическим продуктам / Д.В. Ершов, В.С. Бурцева, Е.А. Гаврилюк [и др.] // Лесоведение. 2017. № 5. С. 3–15.

9. Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat / Д.Е. Плотников, П.А. Колбудаев, С.А. Барталев, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 2. С. 112–127.

10. Плотников Д.Е., Миклашевич Т.С., Барталев С.А. Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, №. 2. С. 103–110.

11. An efficient algorithm for Mumford-Shah segmentation and its application to SAR imagery / N.J. Redding, D.J. Crisp, D. Tang, G.N. Newsam // Digital Image Computing: Techniques & Applications (DICTA'99), Perth, Australia. 1999. P. 35–41.

12. Breiman L. Random forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45, № 1. P. 5–32.

13. Liaw A., Wiener M. Classification and Regression by randomForest // R News. 2002. Vol. 2, № 3. P. 18–22.

УДК 528.88

А.Г. Вырвинский, А.И. Стародубцев

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: sss.sv.1995@mail.ru

АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ И МОДИФИКАЦИЯ ВХОДНЫХ ДАННЫХ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Представлена модель биопродуктивности EPIC, а также ее модификации для условий России. Приводится описание модификации модели для использования авторами для прогнозирования урожайности на примере Сухобузимского района Красноярского края.

Ключевые слова: прогнозирование урожайности, EPIC, модель биопродуктивности.

Введение. Обеспечение продовольственной продукцией страны всегда было очень важной задачей, которая обеспечивает независимость государства. Особое внимание имеет прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур.

Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур является весьма трудоемким ввиду сложности сбора и обработки большого количества данных, влияющих на рост сельскохозяйственных культур.

Для решения этой проблемы в Техасской сельскохозяйственной научно-исследовательской лаборатории (Temple, TX, Soil and Water Research Laboratory) была

© Вырвинский А.Г., Стародубцев А.И., 2018

разработана модель биопродуктивности EPIC (Erosion Productivity Impact Calculato). Данная модель позволяет рассчитывать ежедневные основные параметры растительности (биомассу, листовой индекс, высоту растения и др.).

EPIC является непрерывной имитационной моделью блочного типа, которая может использоваться для определения стратегий управления в сельском хозяйстве. Для осуществления расчета урожайности в указанном методе моделирования биопродуктивности необходимо вводить 12 параметров по характеристикам роста и развития культуры, 6 метеорологических параметров и 9 почвенных параметров, характеризующих состояние почвы [1].

Детальный анализ исходной модели EPIC выявил существенные недостатки работы данного метода при применении его в России. Основным недостатком применения этой модели является получение и использование большого числи метеорологических и почвенных характеристик, которые удорожают метод и не измеряются в России.

В работах [2–7] предложены методики модернизации модели EPIC для прогноза урожайности в России. Разработан единый программный комплекс SDIM (System of Databases and Imitating Modeling), эффективно использующий данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и модели прогноза урожайности при оценке урожайности сельскохозяйственных культур и состояния растительного покрова в Алтайском крае, Тюменской и Новосибирской областях. Методика применения данной системы подробно описана в [5; 6].

Предложенные авторами этих работ методики позволяют осуществлять оперативную оценку и мониторинг биопродуктивности зерновых культур с высокой точностью, используя космические сканерные изображения среднего и высокого пространственного разрешения. Применяются также шесть основных метеорологических характеристик, которые измеряются на российских метеостанциях: максимальная и минимальная температура воздуха, приходящая солнечная радиация, количество осадков, относительная влажность воздуха и скорость ветра [2]. Использование космических изображений сканера MODIS для вычисления вегетационного индекса NDVI позволило во времени от начала посева до сбора зерновых культур с помощью определения параметров биопродуктивности контролировать состояние и прогнозировать урожайность за один месяц до начала сбора. По регрессионным уравнениям, полученным по многолетним экспериментальным данным, на базе вычисленных параметров по модифицированной модели биопродуктивности культур рассчитывают параметры растений: биомассу, листовой индекс, высоту растений и др. Используя полученные параметры, осуществляется мониторинг состояния зерновых культур, дается заблаговременная оценка урожайности и определяются сроки сбора зерновых культур, таких как пшеница, овес, ячмень и др. [2].

Модификация модели EPIC для прогноза урожайности в Красноярском крае. Исходя из выше сказанного, была определена цель работы, заключающаяся в создании программного продукта для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на примере хозяйств Сухобузимского района Красноярского края. В данном материале рассматриваются вопросы обеспечения модели входными данными: метеорологическими данными, характеристиками сельскохозяйственных культур и почвы, данными ДЗЗ.

Предлагается применить модификации модели EPIC по использованию метеорологических параметров, и использовать данные ДЗЗ для оценки индекса листовой поверхности ежедневно или не реже 2–3 раз в неделю. Также для расчета параметров культуры модифицируется блок входных данных, связанный с солнечной радиацией, путем использования ежедневно определяемых данных метеостанций. Общая схема функционирования системы представлена на рисунке.

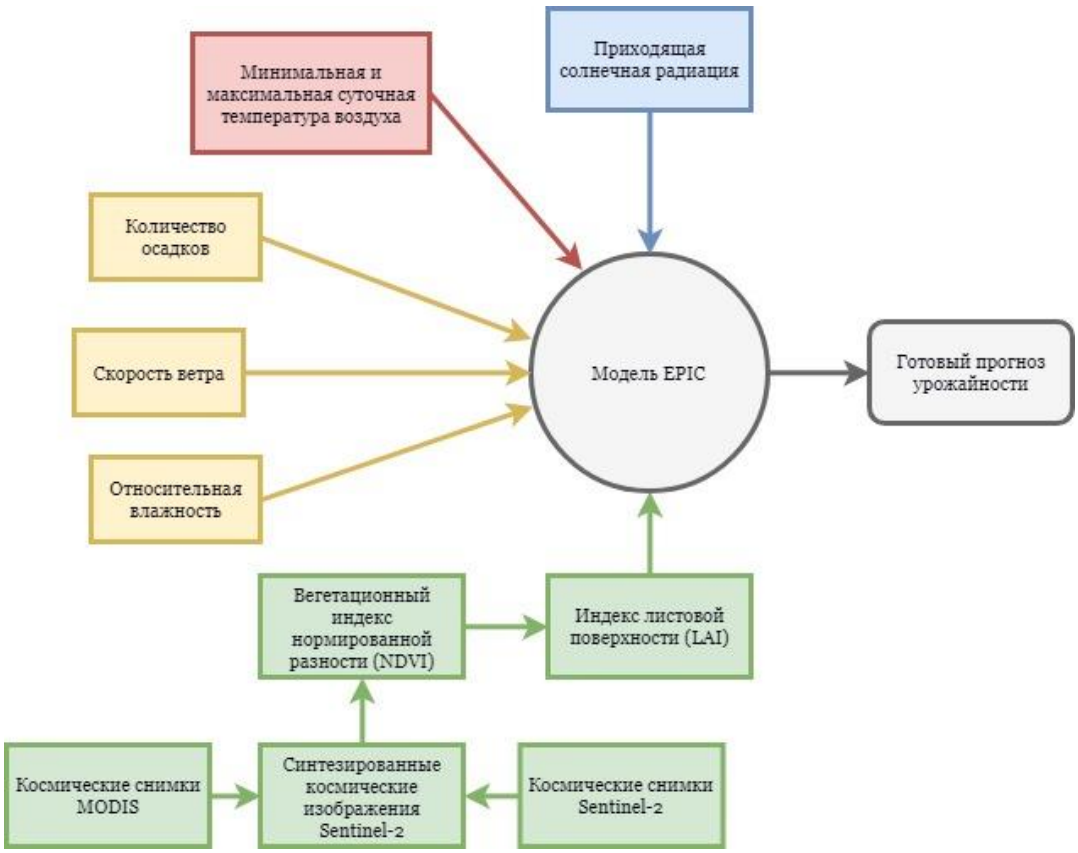


Рисунок. Общая схема функционирования системы

Оценка приходящей коротковолновой радиации определяется путем замены экспериментально измеренных значений приходящей коротковолновой фотосинтетически активной солнечной радиации на расчетные. При этом расчет производится, используя относительную влажность воздуха, ежедневно измеряемую на всех метеостанциях Росгидромета. Максимальную суточную температуру почвы определяют по суммарной коротковолновой солнечной радиации, а минимальную – по эффективному излучению атмосферы, как и в работе [2].

Переход от вычисленного по данным спутниковой съемки индекса NDVI к значениям листового индекса (LAI) возможен благодаря наличию корреляционной зависимости между данными показателями, что было доказано авторами [7]. Однако данная зависимость актуальна только до точки насыщения NDVI, после которой прирост значений вегетационного индекса значительно уступает приросту значений листового индекса. По этой причине производится коррекция индекса LAI по данным наземных наблюдений или космической съемки [2].

Помимо этого, в своих работах авторы [5; 6] сталкивались с необходимостью уточнения границ при использовании снимков низкого пространственного разрешения, что было обусловлено небольшим размером сельскохозяйственных полей, а также высокой дисперсией их спектральных яркостей. Эта же проблема присутствует и на территории Сухобузимского района Красноярского края. Исходя из данного факта, был сделан вывод, что для эффективного использования моделей биопродуктивности необходимы снимки высокого и временного, и пространственного разрешений.

Поскольку качественные данные в оптическом диапазоне спектра получаются только в условиях отсутствия облачности, обеспечение этими данными модели проблематично. Поэтому используется, в частности, подход генерации данных высокого разрешения на основе данных прибора MODIS с пространственным разрешением 250 м

и временным разрешением от 1 до 16 дней. Авторами [8] и [10] были предложены алгоритмы по генерации данных среднего пространственного разрешения для термальных изображений при помощи их комбинации со снимками Landsat (30 м). Также в [9] был предложен метод смешивания данных спектрорадиометра MODIS с изображениями Landsat для территорий с высокой облачностью. Для решения данной задачи предлагается использовать снимки MODIS, а также снимки Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м в красном и ближнем инфракрасном каналах и временным разрешением 5 дней. Предлагается путем вычисления коэффициента изменения спектральных яркостей пикселей изображений MODIS или построения уравнения регрессии синтезировать изображения Sentinel-2 на недостающие даты.

Заключение. В данной работе рассмотрен опыт использования модели EPIC для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, предложены способы модификации исходной модели. Предлагается использовать ежедневные или композитные данные MODIS для моделирования данных высокого пространственного разрешения для вычисления NDVI и оценки индекса листовой поверхности. Источниками метеорологических и почвенных параметров являются данных метеостанций, опубликованные в сети Интернет, и результаты модельных расчетов.

Список литературы

1. Williams J.R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC): Technical Reference // US Department of Agriculture. 1997. 235 с.

2. Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // Изв. Алтайс. гос. ун-та. Ханты-Мансийск. 2010. С. 89–93.

3. Брыксин В.М. Евтюшкин А.В. Рычкова Н.В. Оценка состояния растительных покровов по данным ДЗ и подспутниковых эксперементов // Вестн. Алтайс. гос. аграр. ун-та. Ханты-Мансийск. 2010. № 10. С. 50–53.

4. Технология мониторинга состояния посевов по данным дистанционного зондирования Земли на юге Западной Сибири / Л.А. Сладких, Е.И. Захватов, М.Г. Сапрыкин, Е.Ю. Сахарова // Геоматика. 2016. № 2. С. 39–48.

5. Брыксин В.М., Евтюшкин А.В. Оценка урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и модели биопродуктивности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2005. № 5. С. 218–222.

6. Брыксин В.М. Применение адаптированной модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Западной Сибири // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2007. № 5 (2). С. 20–26.

7. Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В. Изучение динамики вегетационного индекса сельскохозяйственной зоны Западной Сибири по данным NOAA и подспутниковых полигонных измерений // Информационные технологии и космический мониторинг: материалы 3-й науч.-практ. конф. «Электронная Россия». Екатеринбург: Изд-во «Баско», 2004. С. 54–61.

8. Generating high-temporal and spatial resolution TIR image data / M. Herrero-Huerta, S. Lagüela, S.M. Alfieri, M. Menenti // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Geospatial Week 2017, 18–22 September 2017, Wuhan, China. 2017. Vol. XLII-2/W7.

9. On the Blending of the Landsat and MODIS Surface Reflectance: Predicting Daily Landsat Surface Reflectance / F. Gao, J. Masek, M. Schwaller, F.G. Hall // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. August 2006. № 44 (8). P. 2207–2218.

10. High-resolution Urban Thermal Sharpener (HUTS) / A. Dominguez, J. Kleissl, J.C. Luvall, D.L. Rickman // University of California, San Diego, Department of Mechanical and Aerospace Engineering NASA, Marshall Space Flight Center. AL 35812. USA.

УДК 551.501

И.А. Готюр, Д.М. Караваев, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: dm.karavaev@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ ДАННЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ЗОНДИРОВЩИКОВ

Обсуждаются пути совершенствования методов калибровки и валидации информации космической системы гидрометеорологического назначения, состояние и перспективы оснащения создаваемой геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

Ключевые слова: валидация, калибровка, геофизическая обсерватория, гидрометеорологическое обеспечение, микроволновые радиометры.

Микроволновые зондировщики рассматриваются в числе перспективных средств совершенствования оперативного гидрометеорологического обеспечения и решения широкого круга прикладных задач метеорологии и океанологии. В России развитие метода спутниковой микроволновой радиометрии для задач метеорологии начиналось под руководством К.С. Шифрина и А.Е. Башаринова [1; 2], первый в мире космический аппарат (КА) «Космос-243» с микроволновым радиометром на борту был запущен в 1968 г. В настоящее время создается космическая система «Метеор-3М» гидрометеорологического и океанографического обеспечения на базе КА «Метеор-М», планируются к запуску очередные КА «Метеор-М» № 2-2, № 2-3, оборудованные микроволновыми радиометрами МТВЗЯ-ГЯ [3]. Основные информационные продукты спутниковых микроволновых радиометров включают: профили температуры и влажности атмосферного воздуха; влагозапас атмосферы и водозапас облаков (над океаном); скорость приводного ветра; температуру поверхности океана; интенсивность осадков; характеристики снежного и ледового покровов. Методы решения обратных задач для определения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков, скорости приводного ветра, профилей температуры и влажности воздуха, температуры поверхности океана рассматривались в [4; 5]. Необходимыми процессами технологии дистанционного зондирования Земли из космоса являются калибровка и валидация спутниковых данных [6]. Актуальной задачей развития отечественной космической системы гидрометеорологического назначения является создание постоянно действующей подсистемы подспутниковых экспериментов и совершенствование методов калибровки и валидации информационных продуктов, получаемых по данным различных приборов, в частности микроволновых зондировщиков [7; 8].

Для осуществления мероприятий по калибровке и валидации спутниковых данных микроволновых радиометров перспективно развивать инфраструктуру для проведения подспутниковых экспериментов на основе существующей сети метеорологических наблюдений Росгидромета и специализированных тестовых полигонов-обсерваторий, развивать методы самолетных, судовых, контактных и дистанционных высокоточных измерений метеорологических параметров атмосферы и характеристик поверхности. Подспутниковые эксперименты, обеспечивающие контроль параметров окружающей среды и проведение прямых измерений метеорологических и океанологических параметров в период сеансов спутниковых наблюдений, являются моделирующей основой для разработки и совершен-

© Готюр И.А., Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г., 2018

ствования методов и алгоритмов решения обратных задач микроволновой радиометрии. Первым примером микроволнового подспутникового эксперимента является советско-американский эксперимент «Беринг» [9].

В докладе рассматриваются некоторые результаты сравнительных экспериментов, выполненных с использованием спутниковых радиометров температурно-влажностного зондирования атмосферы, данных сетевого аэрологического зондирования атмосферы и наземных микроволновых радиометров. В общем эти результаты подтверждают теоретические исследования информативности метода микроволновой радиометрии и демонстрируют положительные возможности метода микроволновой радиометрии для определения параметров атмосферы (профилей температуры и влажности воздуха, влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков). Особый интерес к применению метода наземной микроволновой радиометрии в подспутниковых экспериментах обусловлен возможностями дистанционных измерений водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы, среди перспективных рассматривается метод сетевого микроволнового зондирования атмосферы. Отмечается недостаток сравнительных экспериментов с использованием контактных самолетных измерений водности облаков (перспективны эксперименты с применением нового самолета-лаборатории Росгидромета ЯК-42Д).

Важным этапом предварительной обработки данных микроволновых радиометров является получение калиброванных значений радиояркостных температур, которые являются базовым информационным продуктом для дальнейшей тематической обработки данных. Один из методов контроля калибровки основан на сравнении модельных полей радиотеплового излучения системы «атмосфера – поверхность» с измеренными и уточнения соответствующих калибровочных коэффициентов. Реализация метода требует проведения комплексных (контактных и дистанционных) высокоточных измерений метеорологических параметров атмосферы, исследований характеристик поверхности в районах тестовых полигонов.

На Северо-Западе России (пос. Лехтуси Ленинградской области) получила развитие геофизическая обсерватория Военно-космической академии (ВКА) имени А.Ф. Можайского. Среди задач обсерватории как методического центра по испытанию новых образцов измерительных комплексов и средств гидрометеорологического обеспечения – подготовка специалистов и проведение научных исследований по различным направлениям прикладной гидрометеорологии и геофизики. Среди них выделим следующие: а) развитие новых технологий гидрометеорологического прогнозирования, методов прогнозирования опасных явлений погоды, методов усвоения разнородной гидрометеорологической информации в численных схемах мезомасштабного прогнозирования; б) развитие методов и создание новых средств метеорологических измерений; в) совершенствование методов обработки радиолокационной информации; г) атмосферно-электрические исследования атмосферы; в) исследования экологических проблем, связанных с влиянием мегаполисов на окружающую среду; г) задачи валидации спутниковой информации и т.д.

В составе геофизической обсерватории ВКА имени А.Ф. Можайского можно выделить три функциональных подсистемы: а) комплекс средств гидрометеорологических и геофизических измерений; б) автоматизированная система сбора, анализа и прогнозирования гидрометеорологической и геофизической обстановки; в) подсистема взаимодействия и обмена данными с федеральными организациями и потребителями информации.

В настоящее время в состав средств геофизической обсерватории включены следующие аппаратно-программные комплексы (АПК): 1 – измерения приземных гидрометеорологических параметров; 2 – радиолокационных измерений характеристик облаков и осадков; 3 – аэрологического зондирования атмосферы; 4 – зондирования ионосферы; 5 – экологических исследований; 6 – приема и обработки спутниковых данных; 7 – атмосферно-

электрических измерений. Особенностью специализированной обсерватории является организация единого центра сбора и обработки гидрометеорологической информации, на базе которого должны реализовываться современные технологии анализа, усвоения и использования разнородной гидрометеорологической информации, получили развитие аппаратно-программный комплекс и автоматизированное рабочее место военного гидрометеоролога (комплекс АРМ-ВГМ-М) [10]. Дополнительно для валидации радиолокационных спутниковых данных на территории обсерватории планируется установить девять калибровочных пассивных уголковых отражателей, имеющих геодезическую привязку. В перечень перспективных измерительных средств входят также актинометрические станции, озонометры, лидары, радиолокаторы ветрового зондирования и т.д.

Для валидации данных температурно-влажностного зондирования атмосферы, получаемых с помощью микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-1М», перспективно использовать комплексные средства аэрологического зондирования атмосферы, которые включают микроволновые радиометры для определения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков, профилей влажности и температуры в тропосфере, а также бесконтактные измерения параметров ветра. При интерпретации результатов сравнительных экспериментов необходимо учитывать особенности получения наземной и спутниковой информации (пространственное разрешение, зависимость информативности от высоты слоя, тип подстилающей поверхности, динамические процессы в атмосфере и т.д.). Поэтому перспективно развитие региональных сетей, оснащенных микроволновыми радиометрами температурно-влажностного зондирования атмосферы. Целесообразным представляется объединение усилий организаций, расположенных на территории Ленинградской области и имеющих экспериментальную базу, для проведения комплексных экспериментов (СПбГУ, РГГМУ, ААНИИ, ИНОЗ РАН, ИПА РАН и обсерватория «Светлое»). Перспективны мероприятия, направленные на развитие системы обмена данными с организациями федерального и регионального уровней, которые решают задачи получения, обработки и систематизации гидрометеорологической и геофизической информации (ГГМЦ МО РФ, 373 Центр ВМФ, НИЦ «Планета», ИПГ, ВНИИГМИ-МЦД, НПО «Тайфун», РГГМУ, СПбГУ). Научно-методические разработки и опыт создания геофизической обсерватории планируется использовать для организации типовых специализированных обсерваторий в различных регионах России.

Заключение. Решение актуальной проблемы калибровки и валидации спутниковой информации направлено на повышение эффективности гидрометеорологического обеспечения ВС РФ на основе отечественных космических комплексов. Рассмотрены проблемные вопросы валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы и роль подспутниковых экспериментов в совершенствовании спутниковых методов зондирования земли с помощью микроволновых зондировщиков. Обсуждается состояние и перспективы развития геофизической обсерватории ВКА имени А.Ф. Можайского для решения задач калибровки и валидации спутниковой информации.

Список литературы

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.

2. Шифрин К.С., Рабинович Ю.И., Щукин Г.Г. Исследование поля микроволнового излучения в атмосфере // Тр. ГГО. 1968. Вып. 222. С. 5–18.

3. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ / В.В. Болдырев, Н.Н. Горобец, П.А. Ильгасов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 243–248.

4. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. Л.: Гидрометеоиздат. 1987. 283 с.

5. Polyakov A.V. The Method of Artificial Neural Networks on Retrieving Vertical Profiles of Atmospheric Parameters // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. Vol. 27, № 3. P. 247.

6. Щукин Г.Г. Задачи, состояние и перспективы подспутниковых наблюдений: сб. докл. Берлин: Природа, Интеркосмос, 1989. С. 44–68.

7. Исследование потенциальной эффективности спутниковых микроволновых радиометров. Вопросы электромеханики / Д.М. Караваев, Ю.В. Кулешов, А.Б. Лебедев [и др.] // Тр. ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики: материалы IV междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». 2016. С. 193–199.

8. Валидация информационных продуктов спутниковых радиометров микроволнового диапазона / Д.М. Караваев, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин, А.Б. Успенский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 259–267.

9. Советско-американский эксперимент «Беринг» / под ред. К.Я. Кондратьева, Ю.И. Рабиновича, В. Нордберга. Л.: Гидрометеоиздат. 1975, 315 с.

10. A technology of forecasting weather conditions for space rocket launching at the Vostochnyi cosmodrome using the automatic meteorological system data / I.A. Gotyur, Yu.V. Kuleshov, A.B. Makov [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. Vol. 40. № 11. P. 758–765.

УДК 528.8.04, 528.88

М.Ю. Грищенко, Е.Ю. Сарычев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ МОСКВЫ ПО СНИМКАМ СО СПУТНИКОВ СЕРИИ LANDSAT

По космическим снимкам со спутников серии Landsat, полученным с 1986 по 2016 г., проведен расчет изображений различных индексов застройки. Для каждого индексного изображения с использованием метода Оцу получены бинарные растры, на которых все пикселы отнесены к одному из двух классов: «застройка» и «прочие объекты». Выявлено, что ни один из использованных индексов не позволяет достоверно представить изменение площади застроенных территорий Москвы с 1986 по 2016 г., тем не менее использование индексов NDBI и UI позволяет получить общее представление об изменениях границ застроенных территорий.

Ключевые слова: Москва, городская застройка, Landsat, индексные изображения, метод Оцу.

Москва – крупный город и столица Российской Федерации, который быстро развивается в настоящее время. Этот процесс связан с активным строительством и ростом городской территории за счет присоединения новых земель. Выявление пространственно-временной неоднородности застройки является весьма актуальной задачей, так как площадь застроенных территорий – важный показатель, по которому можно оценить комфортность проживания в городской среде. Помимо этого, детальные знания об изменении площади застройки важны для таких географических наук, как городская климатология, урбанистика, социально-экономическая география. В рамках нашего исследования выявление застроенных территорий основано на использовании различных специальных спектральных индексов. Индексы застройки нередко применяются для таких целей, среди таких индексов выделяют более или менее эффективные [1–4]. Ин-

© Грищенко М.Ю., Сарычев Е.Ю., 2018

тересно рассмотреть применимость этих индексов для изучения изменения площади застройки Москвы.

Наиболее эффективным индексом для выделения застройки считается индекс NDBI [2]; кроме него, для этих целей используют индексы VrNIR-BI, VgNIR-BI, UI, NDISI, которые рассчитываются в соответствии со следующими выражениями:

$$NDBI = (R_{SWIR1} - R_{NIR}) / (R_{SWIR1} + R_{NIR});$$
$$VrNIR - BI = (R_R - R_{NIR}) / (R_R + R_{NIR});$$
$$VgNIR - BI = (R_G - R_{NIR}) / (R_G + R_{NIR});$$
$$UI = (R_{SWIR2} - R_{NIR}) / (R_{SWIR2} + R_{NIR});$$
$$NDISI = (R_{TIR1} - ((R_G + R_{NIR} + R_{SWIR1}) / 3)) / (R_{TIR1} + ((R_G + R_{NIR} + R_{SWIR1}) / 3)),$$

где R_G – значение спектральной плотности излучения в зеленом канале видимого диапазона (0,52–0,60 мкм); R_R – значение спектральной плотности излучения в красном канале видимого диапазона (0,63–0,69 мкм); R_{NIR} – значение спектральной плотности излучения в ближнем инфракрасном канале (0,76–0,90 мкм); R_{SWIR1} – значение спектральной плотности излучения в среднем инфракрасном канале (1,55–1,75 мкм); R_{SWIR2} – значение спектральной плотности излучения в среднем инфракрасном канале (2,08–2,35 мкм); R_{TIR1} – значение спектральной плотности излучения в тепловом канале (10,6–11,2 мкм) [1].

Цель исследования – оценить применимость указанных индексов для определения изменений городской застройки за как можно больший период времени. Для достижения такой цели нужно большое количество сопоставимых снимков высокого пространственного разрешения, поэтому в качестве исходных материалов выбраны снимки со спутников серии Landsat. Рассмотрены и проанализированы архивные снимки за период с 1982 по 2017 г. за май, июнь, июль, август и сентябрь для создания многовременной серии. Чтобы провести успешное выявление застройки с помощью расчета индексных изображений застройки, необходимо отобрать снимки с наименьшей площадью облачного покрова. Всего отобрано 11 снимков за летние периоды следующих годов: 1986, 1989, 1990, 1994, 1998, 2001, 2003, 2007, 2011, 2014, 2016.

После вычисления спектральной плотности излучения по исходным значениям яркости снимков можно рассчитать индексные изображения в соответствии с представленными выше выражениями. Далее для всех снимков многовременной серии удобно рассчитать бинарные растры, которые содержат пикселы двух классов: «застройка» и «прочие объекты». Для их получения использован метод Оцу. Его суть заключается в том, что необходимо найти пороговое значение индекса, в соответствии с которым все пикселы индексного изображения будут разделены на два класса. Метод разбивает изображение на два класса с минимальной внутриклассовой дисперсией, которая определяется как взвешенная сумма дисперсий двух классов, а критерий максимальной дисперсии между классами определяет оптимальное пороговое значение для разделения изображения.

Проанализировав полученные бинарные растры, можно сделать несколько выводов о пригодности использования спектральных индексов застройки для изучения изменения площади застроенных территорий Московского региона. Все индексы в разной степени отобразили изменение застройки, но ни один индекс не отобразил истинный характер изменения площади городской застройки Москвы.

Бинарные растры индексов NDBI и UI наиболее правдоподобно передали застройку; застроенные территории Москвы и Подмосковья отобразились на итоговых изображениях более-менее достоверно. Недостатки этих индексов проявляются в том, что на некоторых бинарных растрах к классу застройки ложно отнесены участки открытого грунта. Бинарные изображения индексов VgNIR-BI и VrNIR-BI менее достоверно отобразили застройку Московского региона: не все застроенные территории правдоподобно изображены на ито-

говых изображениях, некоторые районы Москвы отобразились очень мозаично из-за высокой степени озелененности. Кроме этого, при расчете бинарных растров по этим индексным изображениям к застройке отнесены водные объекты. Бинарные растры индекса NDISI плохо отобразили застройку – она отображена отдельными пикселами, не объединенными в массивы, по ним можно лишь в целом судить о границах застройки Москвы. Здесь к классу застройки также отнесены водные объекты.

При расчете бинарных растров у каждого индекса встречаются ошибки, связанные с отнесением тех или иных пикселов изображения к классу застройки, а также, наоборот, связанные с тем, что городская застройка была отнесена к классу прочих объектов. Примером ложного отнесения пикселов к классу застройки является отнесение участков открытого грунта к классу застройки для индексов NDBI, VrNIR-BI, VgNIR-BI, UI. При использовании индексов NDBI, VrNIR-BI, VgNIR-BI, NDISI в отдельные годы к застройке оказались отнесены хвойные леса и старые торфоразработки (такая ошибка есть практически на каждом бинарном растре индекса NDISI, для индексов VrNIR-BI, VgNIR-BI – на бинарных растрах за 1990, 1998 и 2014 г., а для индексов NDBI и UI – лишь в 1998 и 2014 г.). Ошибки, связанные с тем, что застройка отнесена к классу прочих объектов, присутствуют на бинарных растрах всех индексов, в наибольшей степени – NDISI. Расчету площади застройки мешало наличие облачности в некоторые года, из-за которой приходилось маскировать часть пикселов. Кроме этого, можно сделать предположение о том, что некоторые ошибки связанны с использованием различных съемочных систем. В работе использованы космические снимки, полученные с трех разных съемочных систем: TM, ETM+, OLI. Ошибки также могут быть связаны и с тем, что снимки получены в разные сезоны. Так, из-за того что снимок за 2014 г. получен в сентябре, для этого года происходит резкое увеличение количества пикселов, отнесенных к классу застройки. Изменение доли пикселов, отнесенных к классу застройки, при использовании разных индексов отображено в таблице.

Таблица

Доли пикселов, отнесенных к классу застройки,
за весь рассматриваемый период для каждого индекса

Год	Доля пикселов, отнесенных к классу застройки, % (от общего количества пикселов бинарного растра)				
	NDBI	UI	VrNIR-BI	VgNIR-BI	NDISI
1986	33,8	28,7	31,9	29,2	27,1
1989	36,2	31,5	37,2	40,8	28,9
1990	37,4	33,7	40,2	41,5	21,3
1994	33,5	27,3	34,2	31,4	26,0
1998	45,8	37,6	37,9	30,0	9,9
2001	35,3	28,6	33,1	30,8	42,1
2003	28,5	22,8	32,0	29,6	26,5
2007	37,3	27,7	33,0	31,4	37,2
2011	39,1	33,7	36,1	33,5	11,5
2014	44,8	60,6	37,3	31,0	26,7
2016	34,9	28,6	35,6	36,2	40,6

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для исследования изменения застройки Москвы лучше всего подходят индексы NDBI и UI, так как они наиболее достоверно передают застройку Московского региона и в некоторые временные промежутки правдоподобно передают изменения площади застроенных территорий. Наихудшим образом передает застройку и ее изменение индекс NDISI.

Заключение. Использование индексов застройки показало свою ограниченную применимость для оценки изменения площади застроенных территорий Московского региона. Достоинствами описанного метода являются простота выявления застроенных

территорий и анализа результатов обработки снимков. При этом у метода есть и существенные недостатки. Во-первых, метод Оцу не всегда позволяет достоверно выделить застроенные территории, и на результат влияет множество факторов, которые порой сложно учесть. Во-вторых, нельзя не отметить зависимость качества выделения застроенных территорий от сезона съемки: использовать можно только снимки за летний сезон, причем желательно, чтобы анализируемые снимки были получены в один месяц.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-20070 «Оценка и прогноз биоклиматической комфортности городов России в условиях изменения климата в XXI веке»).

Список литературы

1. Estoque R.C., Yuji M. Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices // Ecological Indicators. 2015. Vol. 56. P. 205–217.

2. Estoque R.C., Yuji M., Myint S.W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 577. P. 349–359.

3. Garcia P., Perez E. Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index: A case study in Madrid (Spain) // Geoderma. 2016. Vol. 268. P. 100–107.

4. Haas J., Furberg D., Ban Y. Satellite monitoring of urbanization and environmental impacts: A comparison of Stockholm and Shanghai // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. Vol. 38. P. 138–149.

УДК 528.871.6

А.П. Гук, С.А. Арбузов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: guk_ssga@mail.ru

РАСПОЗНАВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ДЕРЕВЬЕВ ПО МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ ЛЕСА

Представлен метод распознавания отдельных деревьев по многомпектральным аэрокосмическим снимкам на основе использования эталонного образа дерева. Показано, что статистический образ дерева в виде многомерной функции плотности распределения вероятностей можно использовать как эффективный дешифровочный признак. Преобразование изображения путем сглаживания с помощью функции Гаусса и получения градиентного образа повышает устойчивость метода.

Ключевые слова: дешифрирование по эталонам, мгногоспектральные аэрокосмические снимки, статистический образ дерева, функции плотности распределения, методика дешифрирования по эталону.

Задача определения деревьев по многоспектральным аэрокосмическим снимкам может являться как самостоятельной задачей (подсчет количества деревьев на участке и с последующим анализом динамики вырубок деревьев или их гибели в результате

© Гук А.П., Арбузов С.А., 2018

различных причин), так и одним из вспомогательных этапов при определении таксационных характеристик лесных массивов.

В соответствии с предложенной в [1] общей теории распознавания на основе не параметрического статистического метода по статистическим эталонам и принципов конструирования алгоритмов распознавания [2; 3] на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования (ДЗ) СГУГиТ разработана методика выделения отдельных деревьев по их изображениям на многоспектральных аэрокосмических снимках массивов леса.

Сущность метода заключается в следующем. Выбирается обобщенный образ дерева для данного лесного массива, если необходимо получить общее количество деревьев, или образ конкретного типа дерева (береза, сосна, кедр и т.д.). Образ формируется в результате статистической обработки эталонных участков изображений деревьев и определения функции плотности распределения вероятностей. Затем, используя эталонный образ изображения дерева, выполняется последовательный просмотр изображения леса и вычисляется корреляционная матрица, состоящая из коэффициентов корреляции для каждого элемента изображения:

$$R(x,y)=\frac{\sum_{m=1}^{k}\sum_{n=1}^{k}P(x,y)\,f(x+m,y+n)}{\left(\sum_{m=1}^{k}\sum_{n=1}^{k}P(x,y)\right)^{2}\left(\sum_{m=1}^{k}\sum_{n=1}^{k}f(x+m,y+n)\right)^{2}}$$

$$x=1,2.....N$$

$$y=1,2.....N$$

N и M – размер матрицы исходного изображения; $k \times k$ – размер маски (эталонного образа).

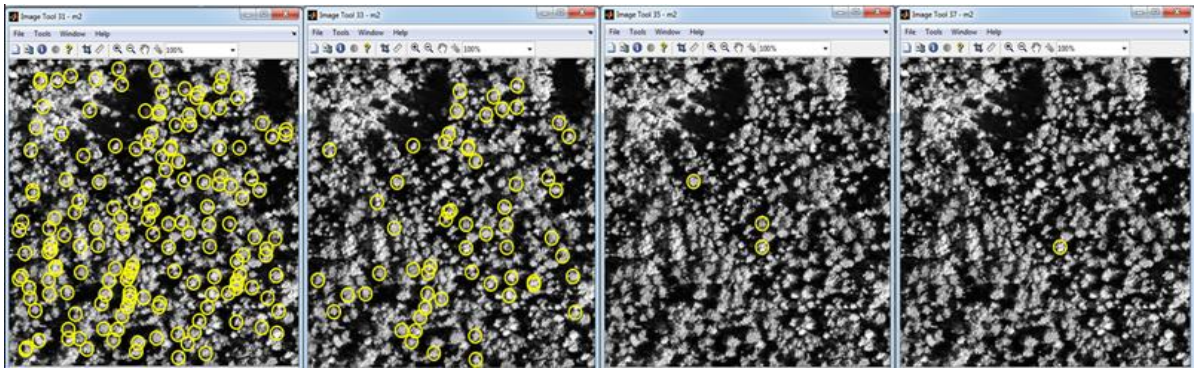
Полученная таким образом матрица анализируется на наличие локальных максимумов с учетом заданного порога корреляции α.

Центры локальных максимумов в матрице коэффициентов корреляции и определяют положение деревьев, соответствующих эталонному образу на снимке.

Образ дерева выбирается в соответствии с реальным размером дерева на изображении. Так, например, для цифровых аэроснимков, полученных камерой ADS 40 с высоты 3 000 м и имеющих GSD 0,2 м. (рис. 1), размер образа $f(x,y)$ составлял 10 на 10 элементов.

На рис. 1 представлены результаты выделения деревьев при задании различного порога допустимого коэффициента корреляции. Как видно из рис. 1, изменение порога корреляции при выделении деревьев показывает, что повышение порога приводит к уменьшению количества выделенных деревьев, что естественно, так как повышает степень соответствия эталонного образа реальному. Соответственно, уменьшение порога увеличивает количество выделенных деревьев.

Экспериментально установлено, что оптимальный результат получается при α = 0,5. В этом случае выделяется до 95 % деревьев, причем достоверность распознавания достигает до 90 %. Для повышения достоверности идентификации были исследованы различные варианты преобразования эталонного и оцениваемого изображений.



а *б* *в* *г*

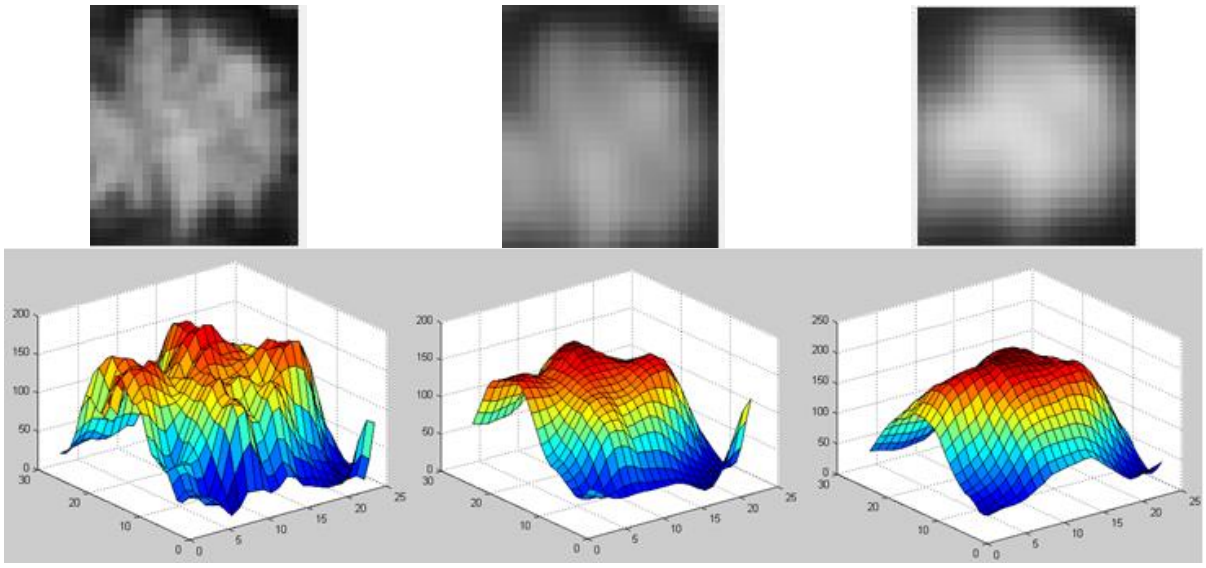
Рис. 1. Результат поиска деревьев с порогом корреляции α: *а* – 0,5; *б* – 0,6; *в* – 0,7; *г* – 0,8

Функцию распределения яркостей в пределах эталона $f(x, y)$ можно сформировать различным образом:

- путем использования элементов реального изображения;
- путем использования элементов образа на преобразованном изображении.

В данной работе для получения преобразованного изображения образа дерева использовалось следующие операторы [4]: сглаживание изображение функцией Гаусса и градиентное преобразование.

На рис. 2 представлены образы, созданные по исходному изображению, с применением различных уровней сглаживания.



а *б* *в*

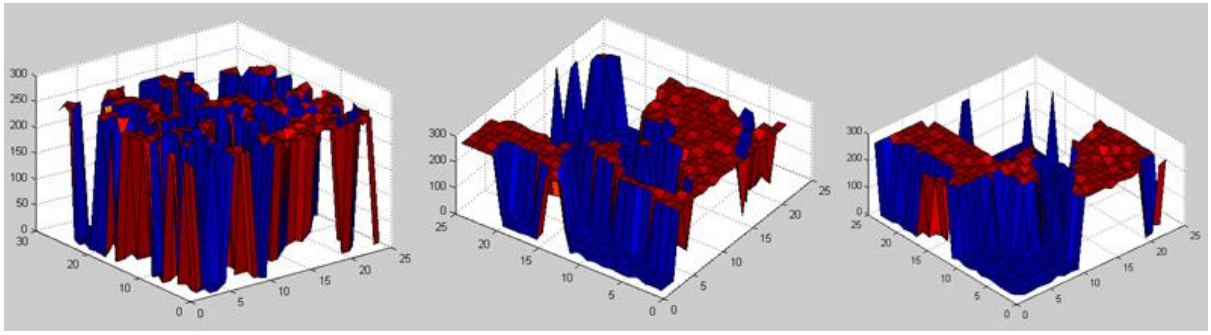
Рис. 2. Образ дерева с различным уровнем сглаживания функцией Гаусса:
а – σ = 0,5; *б* – σ = 1,5; *в* – σ = 2,0

Применение различного уровня сглаживания изменяет качество распознавания. Причем для образов различных деревьев требуется различный уровень сглаживания

Применение градиентного образа дерева повышает устойчивость распознавания деревьев относительно изменения освещенности.

На рис. 3 показан градиентный образ с различным уровнем сглаживания.

Экспериментальные работы показали высокую эффективность предложенного метода. Вероятность распознавания во всех исследуемых случаях при использовании градентного образа выше 95%, а в некоторых случаях близка к 100 %.



а *б* *в*

Рис. 3. Градиентный образ дерева: *а* – σ = 0,5; *б* – σ = 1,5; *в* – σ = 2,0

Данным методом можно не только выделить деревья по изображениям лесного массива, но и выделять деревья заданного класса, а также определить размер крон, сомкнутость и другие таксационные характеристики леса.

Развитием данного подход может стать формирование более сложного образа – например, многоспектрального образа, полученного по многоспектральным снимкам. Кроме того можно сформировать образы для деревьев определенного класса, удовлетворяющего одновременно различным характеристикам (заданный тип, возраст, размеры кроны и т.д.).

Список литературы

1. Гук А.П. Автоматизация дешифрирования снимков. Теоретические аспекты статистического распознавания образов // Изв. вузов. Серия «Геодезия и аэрофотосъемка». 2015. № 5. С. 166–170.

2. Гук А.П., Евстратова Л.Г. Новый статистический подход к распознаванию лесных массивов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III Междунар. науч. конф. Красноярск 13–16 сентября 2016 г. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 14–17.

3. Гук А.П. Евстратова Л.Г. Конструирование технологических схем обработки изображений для автоматизированного дешифрирования многоспектральных космических снимков // Геодезия и картография. 2015. Спец. вып. С. 27–35.

4. Арбузов С.А. Автоматизированное определение координат деревьев по материалам аэро- и космических съемок // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. Т. 1.: сб. материалов IX Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013», апрель 2013 г. Новосибирск: СГГА, 2012. С. 43–47.

5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Техносфера. М., 2006. 1072 с.

УДК 528.871.6

А.П. Гук, М.М. Шляхова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия, e-mail: plazma_space@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ЛЕСА

Представлены результаты исследования статистических свойств изображений леса на многоспектральных космических снимках. Показано, что функции плотности распределения вероятностей яркостей являются устойчивыми признаками различных типов леса. Преобразование изображений по методу главных компонент позволяет усилить различие в функциях плотности распределения. В ряде случаев наиболее информативными признаками являются первая и третья компоненты разложения.

Ключевые слова: дешифровочные признаки, функции плотности распределения, метод главных компонент, дешифрирование по эталонам.

В [1; 2] был предложен метод статистического распознавания типов леса по их изображениям на многоспектральных космических снимках. В этом методе в качестве признака используется функции плотности распределения вероятностей яркостей в выбранном канале. Наиболее информативный канал выбирается визуально по максимальному отличию вида кривой функций плотности распределения для различных объектов. Данный подход, хотя и не является математическим, по нашему мнению, но может быть использован, что и подтвердилось на практике. Вторым условием применения подхода является то, что предварительно выполняется сегментация изображения, затем получают функцию плотности распределения для фрагмента и сравнивают значение полученной функции с эталоном.

Теоретически при распознавании нужно использовать всю информацию, содержащуюся в многоспектральном изображений, т.е. изображения, полученные во всех каналах. Однако просто использовать многоспектральную функцию плотности распределения не корректно, так как измерения в различных каналах зависимы.

Линейную зависимость (корреляционные связи) можно устранить путем преобразования измерений по методу главных компонент. В этом случае в матрице преобразований U вычисляется под условием независимости векторов преобразованных измерений

$$R' = P'P'^{T} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_k \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где λ_1 собственные значения характеристического уравнения $|R - \lambda I| = 0$, где $R = PP^T$.

Вектор измерений $P = \begin{pmatrix} p^1 \\ p^2 \\ p^k \end{pmatrix}$ яркости элементов изображения i, j. Тогда, преобразованные изображение будет равняться $P' = U^T P$. Однако даже при наличии линейной

© Гук А.П., Шляхова М.М., 2018

зависимости между яркостями многоспектральных изображений в различных каналах метод главных компонент не приведет к получению независимых преобразованных измерений. Это связано с тем, что ковариационная матрица R вычисляется как средняя матрица для всех элементов многоспектрального изображения:

$$R = \frac{1}{NN}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} P_{i,j}P_{i,j}^{T}, \quad (2)$$

где NN – размер матрицы изображения.

Зависимость между яркостями элементов для каждой точки многоспектрального изображений будет изменяться случайным образом в соответствии с неизвестным законом распределения.

Вероятно, что более эффективным для целей распознавания является использование функции плотности распределения вероятностей по изображениям, полученным в результате применения метода независимых компонент. В работе приведены результаты сравнительного исследования статистик для исходных и преобразованных измерений спектральных яркостей.

На рис. 1 приведены функции плотности распределения для трех типов объектов, полученные гистограммным методом для красного канала.

На рис. 2 приведены функции плотности распределения для тех же объектов для главных компонент преобразованного изображения.

Для анализа статистических свойств различных изображений иногда целесообразно использовать функции распределения. Анализируя кривые этих функции можно выбрать интервал, для которого необходимо производить оценку «близости» функций для различных объектов. На рис. 3–5 приведены функции распределения для тех же объектов для главных компонент преобразованных изображений.

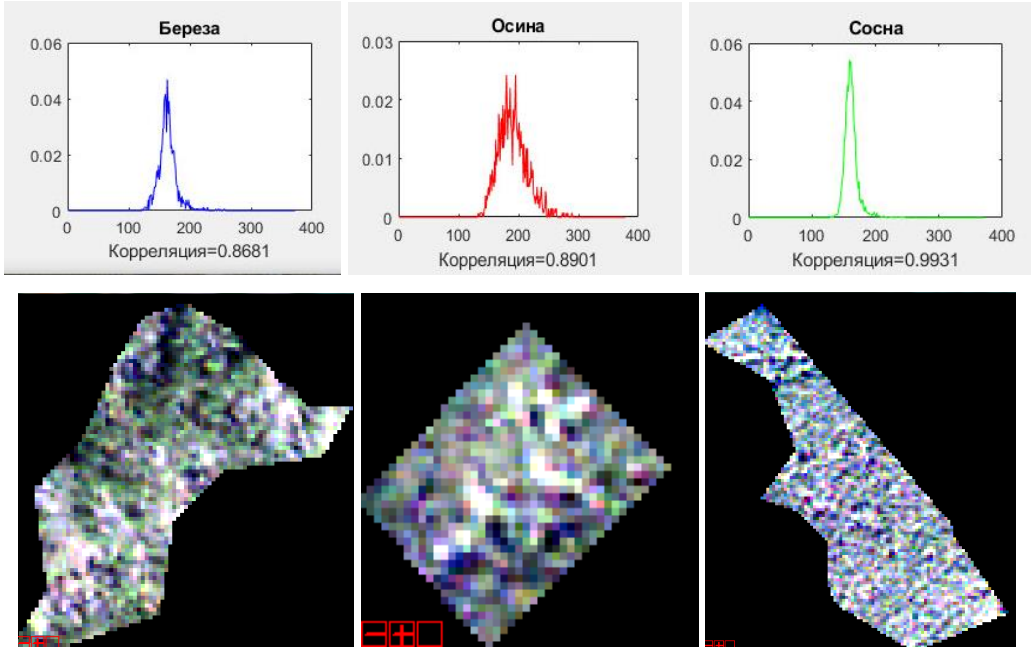


Рис. 1 Функции плотности распределения для трех типов объектов

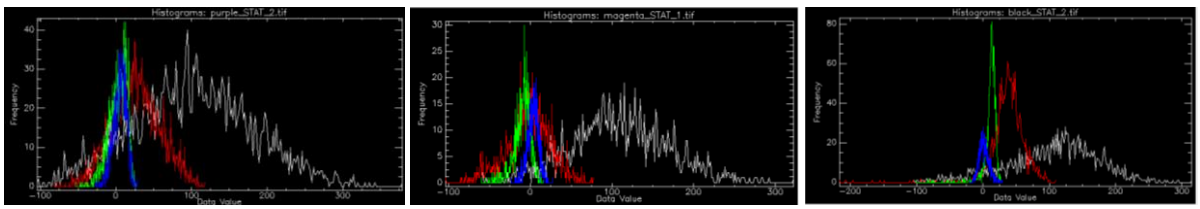


Рис. 2. Функции плотности распределения объектов
для главных компонент преобразованного изображения

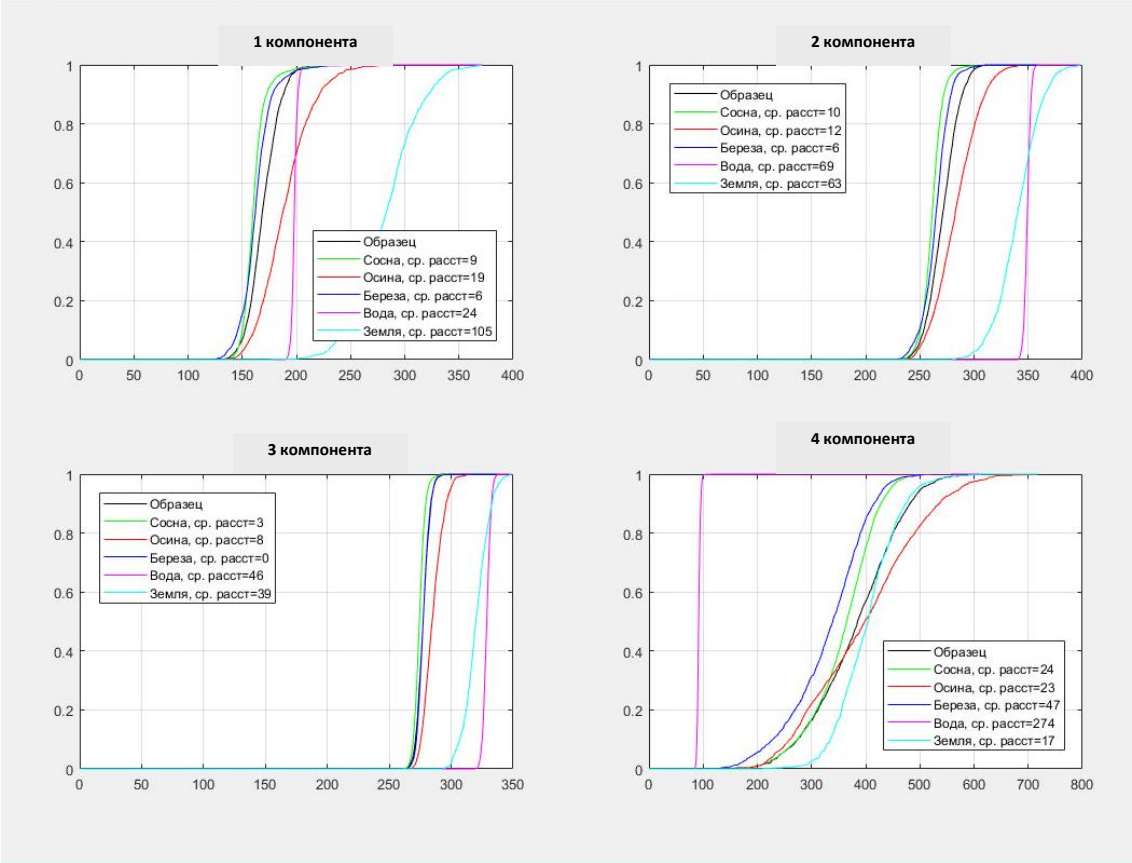


Рис. 3. Функции распределения 1-го объекта (береза)
для главных компонент преобразованного изображения

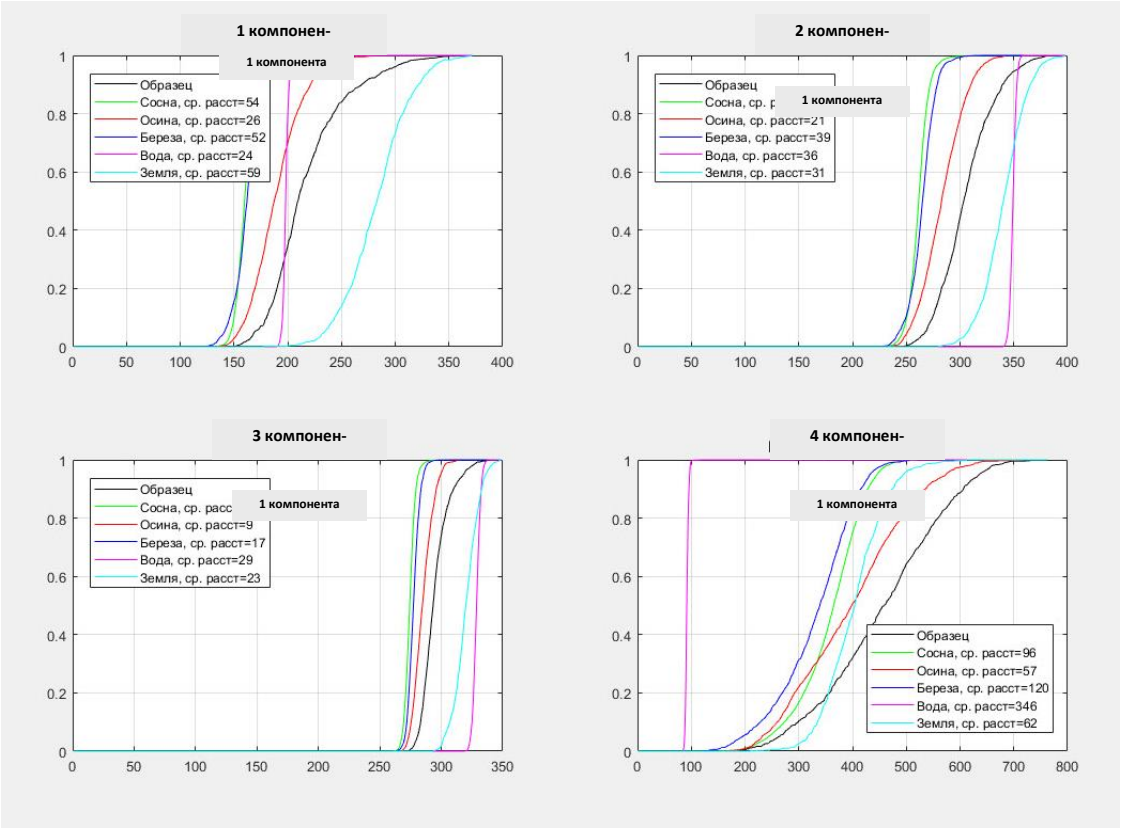


Рис. 4. Функции распределения 2-го объекта (осина)
для главных компонент преобразованного изображения

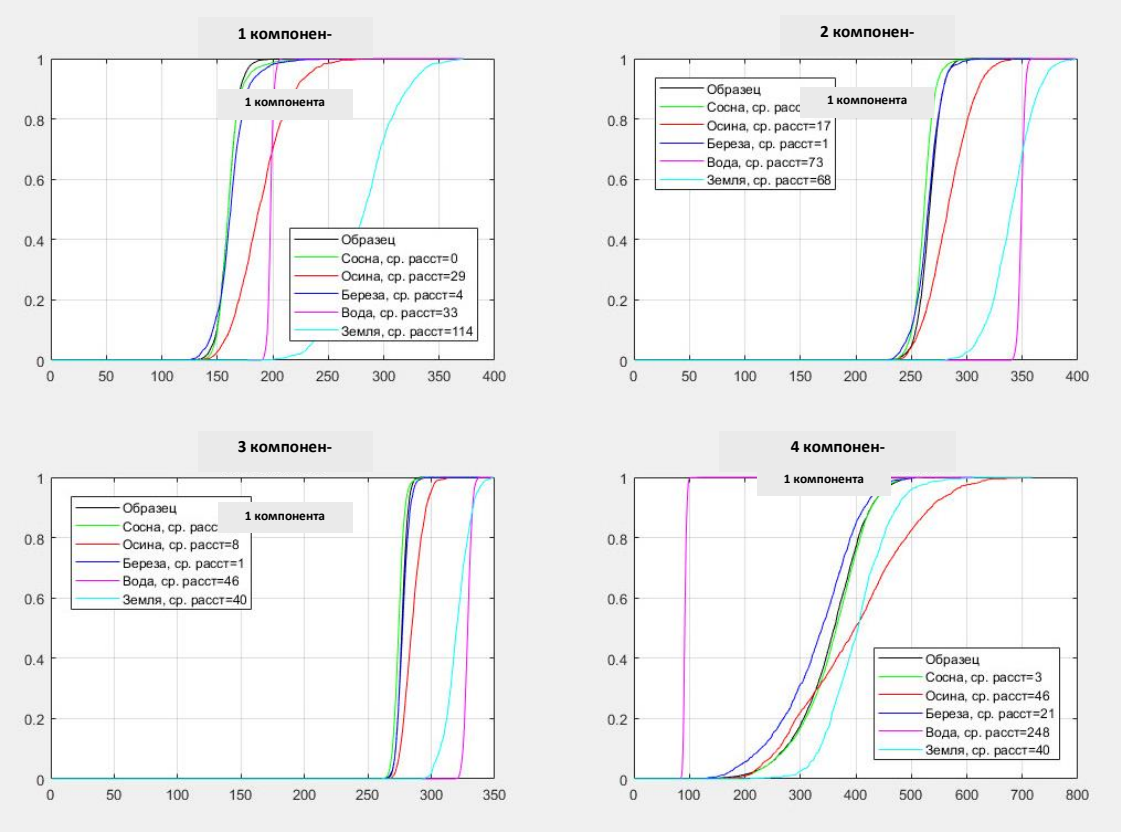


Рис. 5. Функции распределения 3-го объекта (сосна)
для главных компонент преобразованного изображения

Сранительный анализ приведенных кривых показывает, что дополнительно к первой компоненте наибольший интерес представляют вторая и третья компоненты, так как эти компоненты дают большие различия функций распределения для различных типов растительности. При распознавании можно использовать все компоненты или их комбинации, а так же при вычислении оценки соответствия следует учитывать зоны для которых рассчитывается критерий. Эти зоны можно в первом приближении выбрать по кривым функций распределения. Основываясь на полученные результаты можно построить эффективный классификатор изображений.

Заключение. Для повышения надежности статистического метода распознавания, предложенного в [1; 2] необходимо использовать все каналы многоспектрального изображения, преобразованного с целью уменьшения зависимости между спектральными яркостями в различных каналах (методом главных компонент, методом независимых компонент и т.п.) В результате статистических исследований нужно получить надежные эталоны для дешифрирования снимков.

Список литературы

1. Гук А.П. Автоматизация дешифрирования снимков. Теоретические аспекты статистического распознавания образов // Изв. вузов. Серия «Геодезия и аэрофотосъемка». 2015. № 5. С. 166–170.

2. Гук А.П., Евстратова Л.Г. Новый статистический подход к распознаванию лесных массивов // Материалы III Междунар. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» 13–16 сентября 2016 г. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 14–17.

УДК 528.813

П.Н. Дагуров[1], А.К. Балтухаев[1], А.В. Дмитриев[1], С.И. Добрынин[2], Т.Н. Чимитдоржиев[1]

[1]Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия
[2]Бурятский институт инфокоммуникаций СибГУТИ, Улан-Удэ
e-mail: pdagurov@gmail.com

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Разработана модель обратного рассеяния от снежного покрова в приближении метода малых возмущений. Результирующее поле является результатом интерференции волн обратного рассеяния от границ «снег – земная поверхность» и «воздух – снег». Такой подход в отличие от известных моделей позволяет оценить как амплитуду, так и фазу волны обратного рассеяния.

Ключевые слова: микроволны, радарное зондирование, снежный покров.

Введение. Определение характеристик снежного покрова на земной поверхности является одной из важных задач космического дистанционного зондирования Земли, осуществляемого в различных диапазонах электромагнитных волн активными и пассивными методами. Основными характеристиками снежного покрова, определяющими его влияние на окружающую среду, являются его толщина и водный эквивалент снега (снегозапасы) [1; 2]. Водный эквивалент снега определяет количество воды, содержащееся в снеге. В частности, в случае однородного снега с постоянной высотой он определяется как произведение высоты снежного покрова и его плотности, отнесенной к плотности воды, и выражается в единицах длины.

Микроволновое дистанционное зондирование дает возможность измерения высоты и водного эквивалента снега, поскольку микроволны проникают через толщу снежного покрова в отличие от оптического излучения, которое позволяет определить только границы снежного покрытия. Эффективным методом зондирования с высоким разрешением являются космические радиолокаторы с синтезированной апертурой [3]. Анализ состояния проблемы радарного зондирования снежного покрова показывает, что в настоящее время отсутствуют теоретические модели, позволяющие оценить амплитудно-фазовую структуру радарного сигнала. В [4], например, описана модель, учитывающая только оптический путь в снежном покрове. В настоящей работе разрабатывается более общая интерферометрическая модель обратного рассеяния микроволн от снежного покрова на основе приближении метода малых возмущений.

Постановка задачи. Будем полагать, что снег является сплошной однородной средой и объемное рассеяние отсутствует. Это справедливо в C- и L-диапазонах, когда размеры снежных частиц много меньше длины волны.

На рисунке показана геометрия задачи и траектории микроволн, по которым они распространяются при отсутствии снежного покрова и при его наличии. При отсутствии снега волна *1*, падающая из воздуха на почву под углом θ_i, рассеивается обратно шероховатостями почвы в виде волны w_{ag} (красная штриховая линия). Отметим, что на рисунке траектории падающих волн показаны сплошными линиями, а траектории рассеянных волны – штриховыми линиями. При наличии снега волна *2* при падении на снег из воздуха под тем же углом θ_i после преломления и распространения в снежном

© Дагуров П.Н., Балтухаев А.К., Дмитриев А.В., Добрынин С.И., Чимитдоржиев Т.Н., 2018

слое падает на границу «снег – земля» под углом θ_t и рассеивается обратно шероховатой почвой в виде волны w_{sg}, траектория которой показана зеленой штриховой линией. В модели [4] учитывается только эта рассеянная волна.

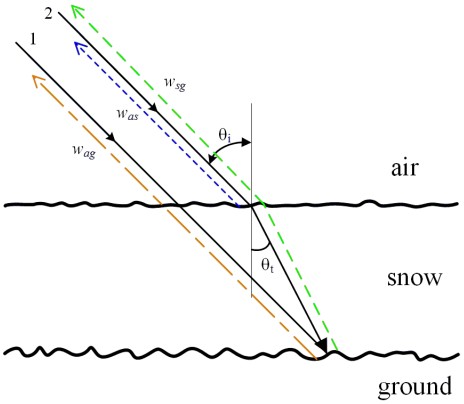


Рисунок. Геометрия обратного рассеяния волны почвой
без снежного покрова и со снежным покровом

Пусть из воздуха на слой снега, покрывающий землю, падает радарная волна *2* под углом θ_i (рисунок). Радар находится в дальней зоне, падающую волну можно считать плоской волной $\vec{E}_p^i = \vec{E}_{0p} e^{jk(x\sin\theta_i - z\cos\theta_i)}$ (k – волновое число в воздухе). Индекс p здесь и далее описывает поляризацию излучения: $p = h$ при горизонтальной поляризации излучения, $p = v$ при горизонтальной поляризации. Однородная *ground* характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_g = \varepsilon_g' + j\varepsilon_g''$, сухой снег полагаем непоглощающей средой с диэлектрической проницаемостью ε_s, диэлектрическая проницаемость воздуха равна 1. Граничные поверхности «воздух – снег» и «снег – почва» являются статистически шероховатыми поверхностями со случайными неровностями, высоты которых описываются некоррелированными между собой стационарными случайными функциями $z_s(x, y)$ и $z_g(x, y)$ со средними значениями $\langle z_s \rangle = d$, и $\langle z_g \rangle = 0$ (d – средняя толщина снега), среднеквадратичными отклонениями b_s и b_g, радиусами корреляции l_s и l_g. Полагаем, что неровности малы по сравнению с длиной волны, их наклоны невелики и выполняются условия применимости метода малых возмущений $kb_s, kb_g < 0{,}3$ и $kl_s, kl_g < 3$. Считаем, что неровности не влияют на когерентное поле (борновское приближение). Падающая волна проходит в слой снега под углом θ_t, определяемым законом Снеллиуса. Рассеянное поле при выходе из снега также преломляется по закону Снеллиуса. Коэффициенты отражения и прохождения когерентных волн определяются формулами Френеля для плоской границы раздела.

Модель обратного рассеяния микроволн от снежного покрова. Построим модель, учитывающую волну обратного рассеяния от границы «воздух – снег». Поле обратного рассеяния является когерентной суммой волн, рассеянных на неровностях границ. Это волна w_{as}, рассеянная границей *air – snow* (ее траектория на рисунке обозначена синей штриховой линией), и волна обратного рассеяния w_{sg} (красная штриховая линия) от границы *snow – ground*, возникающая после прохождения в слой и выхода из него (основная рассеянная волна). Результирующее поле образуется в результате интерференции этих волн. Кроме этих волн образуется более слабые волны обратного рассеяния, появляющиеся вследствие отражений от границ слоя и рассеяния на неровностях, однако влиянием этих волн пренебрегаем из-за малого значения коэффициента отражения от границы «сухой снег – воздух».

Вследствие малости неровностей не учитываем флуктуации фазы волны и полагаем, что в приближении метода малых возмущений значения фаз обусловлены путями,

пройденными волнами после их отражений и преломлений на плоских в среднем границах раздела, и являются детерминированными величинами. Тогда случайное электромагнитное поле, рассеянное шероховатыми границами в обратном направлении, с амплитудой $\left|E_p\right|$ и фазой Ф можно представить в виде следующей суммы:

$$\left|E_p\right|e^{j\Phi} = \left|E_{sp}\right|e^{j\Phi_s} + T_{sp}T'_{sp}\left|E_{gp}\right|e^{j\Phi_g}, \qquad (1)$$

где слагаемые в правой части формулы описывают поля волн w_1, w_2 соответственно. В формуле (1) T_{sp} и T'_{sp} – коэффициенты прохождения волн через границу «воздух – снег», рассматриваемую в среднем как плоская поверхност, в прямом и обратном направлениях соответственно; $\left|E_{sp}\right|$ – амплитуда поля, рассеянного неровностями снега на рисунке; $\left|E_{gp}\right|$ – амплитуда поля, рассеянного неровностями *ground*. Интерферометрические фазы Φ_s и Φ_g отсчитываются относительно фазы волны в отсутствие снежного покрова:

$$\Phi_s = \psi - \varphi_0, \quad \Phi_g = \varphi + \psi - \varphi_0, \qquad (2)$$

где $\varphi = 2k\sqrt{\varepsilon_2}d/\cos\theta_s$, $\psi = 2kd(tg\theta_i - tg\theta_t)\sin\theta_i$, $\varphi_0 = 2kd/\cos\theta_i$.

После усреднения соотношения (1) получим

$$\left\langle\left|E_p\right|\right\rangle e^{j\Phi} = \left\langle\left|E_{sp}\right|\right\rangle e^{j\Phi_s} + T_{sp}T'_{sp}\left\langle\left|E_{gp}\right|\right\rangle e^{j\Phi_g}, \qquad (3)$$

где выражения в угловых скобках представляют собой средние амплитуды рассеянных полей. Полагаем, что квадраты этих средних амплитуд пропорциональны средним квадратам амплитуд. Это справедливо, например, для случайных величин, распределенных по закону Релея. Поскольку средний квадрат амплитуды поля обратного рассеяния пропорционален коэффициенту обратного рассеяния, то из выражения (3) следует

$$\sqrt{\sigma_p^0}e^{j\Phi} = \sqrt{\sigma_{sp}^0}e^{j\Phi_s} + T_{sp}T'_{sp}\sqrt{\sigma_{gp}^0}e^{j\Phi_g}, \qquad (4)$$

где σ^0 – результирующий коэффициент обратного рассеяния; σ_{sp}^0 – коэффициент обратного рассеяния от границы «воздух – снег», σ_{gp}^0 – коэффициент обратного рассеяния от границы «снег – земля».

Величину $\sqrt{\sigma_p^0}e^{i\Phi}$ можно назвать комплексным амплитудным коэффициентом обратного рассеяния. Учитывая соотношения между коэффициентами прохождения и коэффициентом отражения R_{sp} от границы «воздух – снег»: $T_{sp} = 1 + R_{sp}$, $T'_{sp} = 1 - R_{sp}$, перепишем (4) в виде

$$\sqrt{\sigma_p^o}e^{j\Phi} = \sqrt{\sigma_{sp}^0}e^{j\Phi_s} + (1 - R_{sp}^2)\sqrt{\sigma_{gp}^0}e^{j\Phi_g}. \qquad (5)$$

Для определения коэффициентов обратного рассеяния в (5) воспользуемся известными результатами метода малых возмущений в приближении, не учитывающем деполяризацию. SPM дает следующее выражение для коэффициента обратного рассеяния волны, падающей под углом θ_i из воздуха на шероховатую границу раздела со средой с диэлектрической проницаемостью ε.

$$\sigma_p^0 = 8k^4 s^2 \cos^4\theta\left|\alpha_p\right|^2 W(2k\sin\theta, 0). \qquad (6)$$

В формуле (6) параметр s – среднеквадратичное отклонением неровностей; l – радиус корреляции неровностей. Функция $W(2k\sin\theta, 0)$ является спектром неровностей шероховатой поверхности. Значения α_p при горизонтальной и вертикальной поляризации определяются следующими соотношениями:

$$\alpha_h = \frac{\varepsilon - 1}{(\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i})^2}, \quad \alpha_v = (\varepsilon - 1)\frac{(\varepsilon - 1)\sin^2\theta_i + \varepsilon}{(\varepsilon\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i})^2}. \qquad (7)$$

Коэффициенты обратного рассеяния σ_{sp}^0 и σ_{gp}^0 в (5) определяются с помощью формул (6), (7) путем подстановки в них соответствующих параметров снега и почвы. Для оценок можно, например, использовать спектр неровностей, соответствующий гауссовой корреляционной функции

$$W(2k\sin\theta, 0) = \frac{l}{2}\exp[-(\mathrm{klsin}\,\theta)^2] \quad . \qquad (8)$$

Тогда, например, для горизонтально поляризованных волн, получим

$$\sigma_{sh}^0 = 4k^4 b_s^2 l_s^2 \cos^4\theta_t \left|\alpha_{sh}\right|^2 \exp[-(kl_s\sin\theta_i)^2], \qquad (9)$$

$$\sigma_{gh}^0 = 4k^4 \varepsilon_s^2 b_g^2 l_g^2 \cos^4\theta_t \left|\alpha_{gh}\right|^2 \exp[-(kl_g\sin\theta_t)^2], \qquad (10)$$

где, напомним, b_g – среднеквадратичные отклонения неровностей снега и почвы соответственно; l_s, l_g – радиусы корреляции этих неровностей;

$$\alpha_{sh} = \frac{\varepsilon_s - 1}{(\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2\theta_i})^2}, \quad \alpha_{gh} = \frac{\varepsilon_g/\varepsilon_s - 1}{(\cos\theta_t + \sqrt{\varepsilon_g/\varepsilon_s - \sin^2\theta_t})^2} \qquad (11)$$

Заключение. В работе построена интерферометрическая модель обратного рассеяния микроволн от снежного покрова. Модель позволяет оценить как амплитуду, так и фазу волны обратного радарного рассеяния от снежного покрова.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-01051 А).

Список литературы

1. Remote sensing of snow depth and snow water equivalent / M. Tedesco, C. Derksen, J.S. Deems, J.L. Foster // Remote Sensing of the Cryosphere; ed. by M. Tedesco. John Wiley & Sons, Ltd. 2015. P. 73–98.

2. Радиолокационная дифференциальная интерферометрия L-диапазона для определения параметров снежного покрова / П.Н. Дагуров, Т.Н. Чимитдоржиев, А.В. Дмитриев [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5. С. 14.

3. Базовые продукты зондирования земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой / А.В. Дмитриев, Т.Н. Чимитдоржиев, М.А. Гусев [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2014. № 5. С. 83–91.

4. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow / T. Guneriussen, K.A. Hogda, H. Johnsen, I. Lauknes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39, № 10. P. 2101–2108.

УДК 519.24

Б.С. Добронец, О.А. Попова

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: OlgaArc@yandex.ru

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ СО СЛУЧАЙНЫМИ ВХОДНЫМИ ДАННЫМИ

Предложен новый подход к вычислению функций от случайных аргументов, представляющий собой технику быстрых вычислений, основанную на идее параллельных вычислений и применении численного вероятностного анализа. Для вычисления функции от случайных аргументов используется одно из основных понятий численного вероятностного анализа – вероятностное расширение. Для реализации техники быстрых вычислений применяется метод, основанный на параллельно-рекурсивных вычислениях.

Ключевые слова: численный вероятностный анализ, вероятностные расширения, рекурсивно-параллельные вычисления.

Введение. Для многих практических задач, использующих данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используются модели со случайными входными параметрами. В тех случаях, когда их функции плотности вероятности известны, исследование таких моделей можно свести к вычислению функций со случайными аргументами или решению различных уравнений и систем уравнений со случайными характеристиками.

В качестве примера можно рассмотреть задачу моделирования взаимодействия солнечного излучения с растительной средой на основе уравнения переноса. Этот подход рассматривает объемное рассеяние фотонов, в отличие от модели геометрической оптики, описывающей отражение от поверхности растительного покрова. Предполагается, что неоднородный растительный покров состоит из кластеров фитоэлементов и открытого пространства между ними. Пространственная структура такой среды может быть описана при помощи индикаторной функции, заданной для каждой точки пространства. При этом идикаторная функция считается случайной величиной. Для обработки спутниковых данных с целью расчета объемных биофизических и других характеристик среды наиболее целесообразным является использование стохастического подхода.

Одним из основных способов решения стохастического уравнения переноса является численное моделирование методом Монте-Карло (*ray-tracing*) рассеяния фотонов в растительной среде. Данный метод является универсальным для решения разнообразных задач со случайными неопределенностями во входных данных. Этот подход является одним из наиболее мощных вычислительных методов, позволяющих численно решать задачи, которые «не решаются» другими методами. Так в моделирования взаимодействия солнечного излучения с растительной средой метод Монте-Карло основан на возможности придания процессу переноса излучения вероятностного смысла. После моделирования и набора достаточной статистики (обычно десятки и сотни тысяч) траекторий, можно по определенным формулам находить требуемые характеристики излучения (в частности, потоки и интенсивности) [1].

При всех положительных качествах метод Монте-Карло обладает рядом недостатков. Один из самых существенных есть низкая скорость сходимости и большой

© Добронец Б.С., Попова О.А., 2018

объем вычислений, что представляет дополнительные сложности при работе с данными большого объема. Для численного моделирования и анализа систем со случайными входными параметрами по данным ДЗЗ как альтернативу методу Монте-Карло предлагается использовать численный вероятностный анализ (ЧВА), представляющий набор методов и подходов к решению задач с различными типами неопределенности с использованием численных операций над плотностями вероятностей случайных величин и их функций. Так, в [3] рассматриваются методы решения линейных и нелинейных уравнений и систем со случайными параметрами.

В статье предлагается новый подход к вычислению функций от случайных аргументов, представляющий собой технику быстрых вычислений, основанную на идее распараллеливания вычислительного процесса и применении методов численного вероятностного анализа в условиях случайной неопределенности. Для вычисления функции от случайных аргументов используется одно из основных понятий ЧВА вероятностное расширение. Предлагается процесс вычисления вероятностных расширений представить в виде параллельного рекурсивного вычислительного процесса [2], как технику быстрых вычислений для различных классов функций со случайными аргументами.

Процедура параллельно-рекурсивного вычисления вероятностного расширения. Пусть имеется n непрерывных случайных величин $x_1,...,x_n$ с плотностью x_i соответственно. Предположим, что случайная величина z связана с $x_1,...,x_n$ функциональной зависимостью

$$z = f(x_1,...,x_n).$$

Необходимо вычислить вероятностное расширение *f*, используя рекурсивно-параллельную процедуру. Заметим, что вероятностное расширение *f* в некоторой точке ζ можно вычислить следующим образом:

$$f(\xi) = \int x_1(t) f_1(\xi,t)dt. \qquad (1)$$

Таким образом, задача вычисления вероятностного расширения f в некоторой точке ζ сводится к вычислению интеграла (1). Рассмотрим численное вычисление (1). Для простоты изложения представим (1) в виде квадратуры

$$\int x_1(t) f_1(\xi,t)dt \approx \sum_{l=1}^{m} \gamma_l x_1(t_l) f_1(\xi,t_l).$$

Далее

$$z_{n-1}(\xi,t_l) \approx \sum_{i=1}^{m} \gamma_i x_{n-1}(t_i) z_{n-2}(\xi,t_i,t_l).$$

и т.п. На рисунке приведено дерево рекурсивного параллелизма.

Таким образом, на нижнем слое необходимо вычислять вероятностные расширения для функций только одной переменной. Все вычисления на каждом слое независимы и могут быть вычислены одновременно.

Рассмотрим процедуру вычисления вероятностного расширения для одномерного случая. Пусть дана функциональная зависимость $z = f(x)$, где x случайная величина и $\{x_i(z) \mid i = 1,..,n\}$ — корни уравнения $z = f(x)$. Далее x – функция плотности вероятности случайной величины x с носителем $[\underline{x}, \overline{x}]$. Необходимо найти функцию плотности вероятности z случайной величины z. Следуя [7; 8], решение можно представить в виде

$$z(\xi) = \sum_{i=1}^{n} \frac{x(x_i(\xi))}{| f'(x_i(\xi)) |},$$

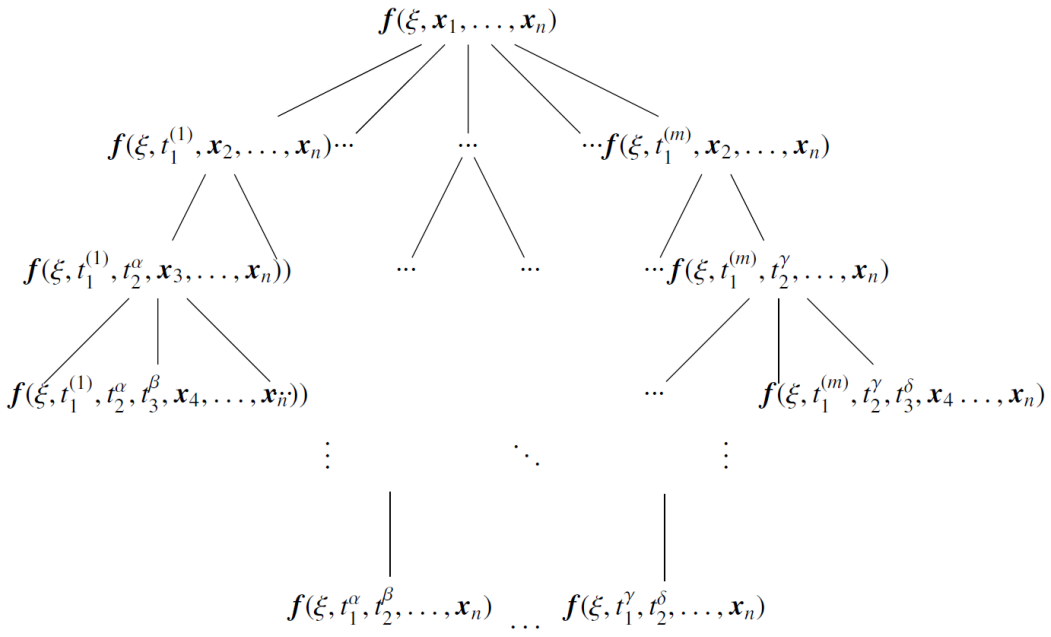


Рисунок. Дерево рекурсивного параллелизма

Заключение. Предлагаемый подход позволяет решить задачу вычисления функции от нескольких случайных аргументов, используя технологию быстрых вычислений, основанной на параллельно-рекурсивной организации вычислительного процесса. Таким образом, важная задача вычисления вероятностных расширений может быть решена в рамках параллельных рекурсивных вычислений, что открывает широкие возможности для моделирования задач со случайными входными данными в таких областях как дистанционное зондирование Земли, цифровая экономика, гидрология и т.п. Быстрота и точность вычислений обеспечивается свойствами численных арифметических процедур над кусочно-полиномиальными моделями, разработанными в рамках ЧВА [3–9].

Список литературы

1. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко [и др.]. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб:. БХВ-Петербург, 2002. 608 с.
3. Добронец Б.С., Попова О.А. Численный вероятностный анализ неопределенных данных. Красноярск, 2014. 167 с.
4. Dobronets B.S., Popova O.A. The Numerical Probabilistic Approach to the Processing and Presentation of Remote Monitoring Data // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия «Техника и технологии». 2016. Т. 9, № 7. С. 960–971.
5. Dobronets B.S., Popova O.A. Piecewise Polynomial Aggregation as Preprocessing for Data Numerical Modeling // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015. 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032028.
6. Dobronets B.S., Popova O.A. Improving reliability of aggregation, numerical simulation and analysis of complex systems by empirical data // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 354. 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/354/1/012006.
7. Dobronets B., Popova O. Numerical Probabilistic Approach for Optimization Problems // Scientific Computing, Computer Arithmetic, and Validated Numerics. Lecture Notes in Computer Science 9553. Springer International Publishing, Cham. 2016. P. 43–53.
8. Dobronets B.S., Popova O.A. Numerical probabilistic analysis under aleatory and epistemic uncertainty // Reliable Computing. 2014. № 19. P. 274–289.
9. Dobronets B.S., Popova O.A. Improving the accuracy of the probability density function estimation // Journal of Siberian Federal University Mathematics and Physics. 2017. № 10 (1). P. 16–21.

УДК 528.854

Д.В. Емельянов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: dima9526@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЛАБОРАТОРНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА В ПОЧВАХ

Работа посвящена проблематике дешифрирования содержания гумуса почвенного покрова по данным дистанционного зондирования Земли. Спектрометром Flame произведена съемка спектра отражения образцов почв в лабораторных условиях. Полученные спектры были сравнены с данными прибора Landsat-8 OLI.

Ключевые слова: коэффициент отражения, спектральная яркость, спектрометр, ДЗЗ, Landsat-8, почвы, гумус.

Вопросу определения состава почвы по ее оптическим свойствам на протяжении многих лет посвящают свои работы многие ученые. Отечественными и зарубежными специалистами разрабатываются методики применения космической съемки для оценки гранулометрического состава почв и определения ее состава как на качественном, так и количественном уровнях [1; 2].

Известно, что между спектральной отражательной способностью почвы и количеством в ней гумуса существует зависимость. Коэффициенты отражения зависят от нескольких факторов. В порядке убывания их значимости они располагаются в следующей последовательности: поверхностная влажность; комковатость почвы; содержание окрашивающих компонентов (обычно соединений железа).

В настоящее время практически во всех регионах России существует проблема устаревания почвенных карт. Вопрос определения агрохимии почвенного покрова очень актуален. Известно, что, в отличие от традиционной почвенной съемки, автоматическое картографирование почв методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) более перспективно [3].

Цель исследования – анализ возможности использования материалов анализа космических изображений для изучения свойств почв и пространственного распределения агрохимических их свойств на контрольных участках.

Аналитическая работа выполнена на 68 образцах, представленных почвообразующими породами и почвами. Образцы были отобраны в пойме Енисея, в заказнике «Погорельский бор» и ОПХ «Минино». Исходные анализируемые образцы имели разный гранулометрический состав, $pH_{сол}$ и сильно различались по содержанию гумуса (табл. 1, 2). Последующие образцы получались путем смешивания друг с другом отобранных проб для получения различного состава по гумусу, pH и физической глине.

Так, содержание гумуса колебалось в очень широких пределах, от 0,37 до 8,50 %, с переходом через 1, 3, 5 %. Содержание физической глины изменялось от 8,6 до 47,5 %, а разновидности были представлены связным песком, супесью, легким, средним и тяжелым суглинками. pH солевой суспензии также было различным, от 5,45 до 8,00 ед., что указывает на слабокислую, близкую к нейтральной, нейтральную, слабощелочную и щелочную реакцию среды.

© Емельянов Д.В., 2018

Рис. 1. Карта отбора образцов почв: *1* – пойма Енисея; *2* – Погорельский бор; *3* – порода ОПХ «Минино»; *4* – чернозем «Минино»

Таблица 1

Результаты аналитической работы
(Модельный опыт 1, повторность 4-хкратная, закладка 20.07.2017)

Вариант опыта (место отбора)	Номер образцов	Гумус, %	$pH_{сол}$	Физ. глина, %	Разновидность по гранулометрическому составу
1 (пойма Енисея)	1–4	0,37	8,00	9,5	Связный песок
2 (Погорельский бор)	5–8	0,37	5,45	14,9	Супесь
3 (Погорельский бор + порода ОПХ «Минино»)	9–12	0,40	7,35	26,3	Легкий суглинок
4 (порода ОПХ «Минино»)	13–16	0,73	7,25	46,4	Тяжелый суглинок
5 (чернозем «Минино»)	17–20	8,50	6,75	46,4	Тяжелый суглинок

Таблица 2

Результаты аналитической работы
(Модельный опыт 2, повторность 4-хкратная, закладка 20.07.2017.)

Вариант опыта	Номер образцов	Гумус, %	$pH_{сол}$	Физ. глина, %	Разновидность по гранулометрическому составу
1	21–24	0,95	7,10	8,6	Связный песок
2	25–28	2,95	6,75	19,0	Супесь
3	29–32	4,34	6,73	23,6	Легкий суглинок
4	33–36	1,33	6,35	16,2	Супесь
5	37–40	2,44	6,43	21,6	Легкий суглинок
6	41–44	4,69	6,53	29,3	Легкий суглинок
7	45–48	1,17	6,65	27,4	Средний суглинок
8	49–52	2,69	6,85	30,4	Средний суглинок
9	53–56	4,54	6,95	35,6	Средний суглинок
10	57–60	1,82	7,18	45,4	Тяжелый суглинок
11	61–64	3,76	7,15	47,5	Тяжелый суглинок
12	65–68	5,65	7,15	47,3	Тяжелый суглинок

Каждый из имеющихся 17 опытов был разделен на 4 образца, вследствие чего было образовано 68 образцов и были измерены спектры отражения образцов спектрометром FLAME компании OceanOptics. Путем усреднения образцов получили 17 спектров отражения (табл. 3).

К настоящему времени известен ряд методов моделирования содержания гумуса в верхнем воздушно-сухом слое почвы по данным ДЗЗ с применением парных и множественных, линейных и нелинейных регрессий [4–5]. В данной работе использовалась линейная регрессионная зависимость вида $G = B1 \cdot X1 + B2*X2 + B3 \cdot X3 + B4 \cdot X4 + ... + A$, где G – концентрация гумуса; $B1$–$B4$, A – параметры модели (регрессии); $X1$–$X4$ – спектральные яркости в соответствующих спектральных диапазонах (каналах). В частности, для сравнения с данными ДЗЗ прибора Landsat-8 OLI $X1$ будет соответствовать синему; $X2$ – зеленому; $X3$ – красному и $X4$ – ближнему инфракрасному диапазонам.

Таблица 3

Коэффициенты спектральной яркости почв в разных диапазонах, %

Номер опыта	450–515 нм	525–600 нм	630–680 нм	845–885 нм
1	13,67	19,20	24,36	26,23
2	18,78	29,18	37,85	42,88
3	13,61	20,93	30,12	34,63
4	13,35	20,34	29,00	32,52
5	2,79	3,61	4,80	8,17
6	14,23	19,75	25,96	28,24
7	8,31	11,03	14,01	16,85
8	7,27	9,41	11,69	14,80
9	17,55	25,06	30,47	36,43
10	13,90	18,17	20,80	25,98
11	7,62	10,25	12,67	17,06
12	14,53	21,20	29,02	32,98
13	10,23	14,69	19,96	23,93
14	6,84	9,32	12,06	15,47
15	11,21	16,31	22,00	26,08
16	11,00	15,66	20,35	24,91
17	8,32	11,26	14,31	18,78

Для построения уравнения регрессии использовались те диапазоны спектрометра, которые соответствовали каналам прибора Landsat-8 OLI. Анализ использования разного набора диапазонов для уравнения показал, что наибольшее значение R^2 имеет при использовании всех четырех диапазонов. В табл. 4 приведены данные коэффициентов спектральной яркости для диапазонов лабораторного спектрометра, которые попадают в более широкий диапазон каналов Landsat-8 OLI.

Таблица 4

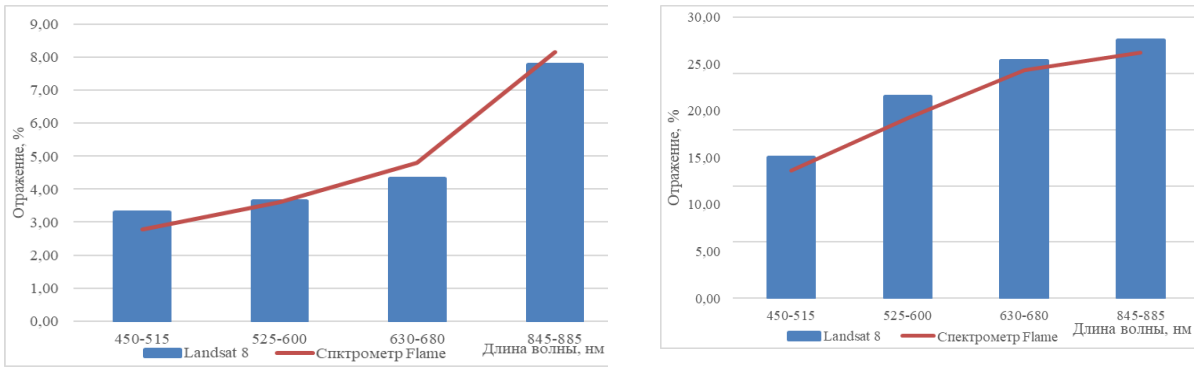
Коэффициенты и статистические характеристики регрессионных зависимостей между содержанием гумуса в почве и спектральными данными прибора

A	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$	$R2$	D
7,61	–1,28	–1,18	–0,99	0,46	0,91	0,75

Таким образом, для моделирования гумуса использовалось следующие линейное уравнение: $G = 7{,}61 - 1{,}28X1 + 1{,}19X2 - 0{,}99X3 + 0{,}46 \cdot 4$, где G – содержание гумуса в почве, %; $X1$, $X2$, $X3$, $X4$ – спектральная яркость в диапазонах 450–515, 525–600, 630–680, 845–885 нм соответственно.

Точность определения содержания гумуса в почве в данных образцах была ± 0,75 %. Тем не менее для уточнения полученных результатов необходимо продолжить проведение исследований с измерением спектров отражения почв с разной влажностью.

Для сравнения лабораторных исследований с данными ДЗЗ Landsat-8 OLI были выбраны участки отбора образцов с территории Минино с высоким содержанием гумуса и с поймы Енисея с низким содержанием гумуса. На графиках (рис. 2) показано сравнение спектров отражения между лабораторным спектрометром и данными Landsat- 8 OLI за 29 апреля 2018 г. Для анализа брались четыре образца со сравниваемой территории и четыре случайных пикселя этой же территории, которые были усреднены.



а *б*

Рис. 2. Спектр отражения почвы по данным спутника Landsat-8 и лабораторного спектрометра Flame: *а* – территория Минино; *б* – пойма Енисея

Из графиков на рис. 2 видно, что спектральный портреты почв, снятые как спектрометром, так и Landsat-8 OLI, положительно коррелируют.

Заключение. Установлена тесная корреляционная связь между содержанием гумуса в почвах и коэффициентами спектральной яркости, определяемыми в лабораторных исследованиях. Также установлена корреляция между лабораторной спектрометрией и яркостью почвы на снимках Landsat8 OLI.

Список литературы

1. Заварзина А.Г. Содержание гумуса и отражательная способность верхних горизонтов почв юга европейской части России // Почвоведение. 1995. № 10. С. 1248–1255.

2. Виноградов Б. В. Дистанционная индикация содержания гумуса в почве // Почвоведение. 1981. № 11. С. 114–123.

3. Савин И. Ю. Автоматизированная инвентаризация почв на основе материалов дистанционных съемок: возможности и перспективы // Региональные проблемы экологии, географии и картографии почв. 1998. С. 91–101.

4. Лабутин И.А. Дешифрование аэрокосмических снимков: учеб. пособие. М.: АСПЕКТ ПРЕСС, 2004. 184 с.

5. Халфин А.А. Статистический анализ данных: монография. М.: ООО Бином-Пресс, 2008. 512 с.

6. Крупкин П.И. Черноземы Красноярского края: монография. Красноярск: Крас-ГУ, 2002. 109 с.

УДК 004.93

Д.А. Ермолаева

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
e-mail: Dasha26071996e@gmail.com

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Работа направлена на решение задач, возникающих в области цифровой обработки данных дистанционного зондирования, требующих значительных вычислительных затрат, обусловленных использованием специализированных алгоритмов и многократного тестирования с привлечением обширной базы различных изображений, для обнаружения и извлечения линейных структур. В статье анализируются различные методы обнаружения линейных структур, а также приводится новый алгоритм решения задачи.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, линеаменты, линейные структуры, линеаментный анализ, метод Canny, метод LoG, метод Prewitt, метод Sobel.

Введение. В современном мире автоматизированный линеаментный анализ предполагает применение совокупности дистанционных, геологических и других методов, алгоритмов для эффективного картирования и мониторинга геолого-геоморфологических линейных объектов. Линейные структуры, выявленные в результате исследований, могут использоваться для решения различных прикладных задач:

- определение путей миграции подземных вод;
- поиск месторождений полезных ископаемых;
- прогнозирование геодинамической опасности;
- оценка устойчивости структурно-тектонических блоков при проектировании и строительстве сооружений [1].

Определение линеаментов на земной поверхности может выполняться двумя способами: визуальным или автоматизированным. Для выделения линеаментов визуальным способом традиционно используются морфологические карты и аэрокосмические данные, полученные с помощью дистанционного зондирования [2]. Этот процесс является довольно трудоемким, а также его невозможно применить на территориях с густой растительностью или чехлом рыхлых отложений. В связи с этим изучению линеаментов, обусловленных трещиноватостью горных пород, до последнего времени уделялось недостаточно внимания. Оптимизацией идентификации линеаментов является применение автоматизированного линеаментного анализа в среде современных географических информационных систем. Автоматизированное дешифрирование обладает высокой скоростью, экономической эффективностью, а также объективностью и возможностью сравнения различных методов. Такое свойство космических изображений как обзорность обеспечивает выявление линеаментов, в том числе и на территориях с растительным покровом и осадочными породами. В настоящее время подобные исследования приобретают особую актуальность в связи с широкой доступностью и малой стоимостью спутниковых изображений.

Основная часть. В ходе выполнения данной работы были исследованы и протестированы существующие методы, алгоритмы и программные комплексы, реализующие идентификацию линейных структур на основе данных дистанционного зондирова-

© Ермолаева Д.А., 2018

ния. Анализ показал, что в настоящее время не существует программного комплекса, обеспечивающего адаптивную настройку существующих алгоритмов. В связи с этим для решения данной задачи был реализован новый алгоритм, позволяющий работать с разными методами фильтрации и настраивать данные методы по параметрам рельефа. В качестве основы был выбран программный комплекс TecLines [3], обладающий как значительными преимуществами, так и определенными недостатками, например: корректная работа только с одним фильтром, потеря необходимых данных при переходе от функции к функции, отсутствие итоговой таблицы по идентифицированными линеаментам, неточное построение розы-диаграммы. Работа выполнена в среде разработки MatLab, что позволяет программному комплексу работать на любой операционной системе.

Структура программного комплекса. Общая структура расширенного программного комплекса TecLines состоит из одиннадцати основных этапов, значительная часть которых содержит необходимые входные параметры, которые могут быть изменены для достижения оптимального результата.

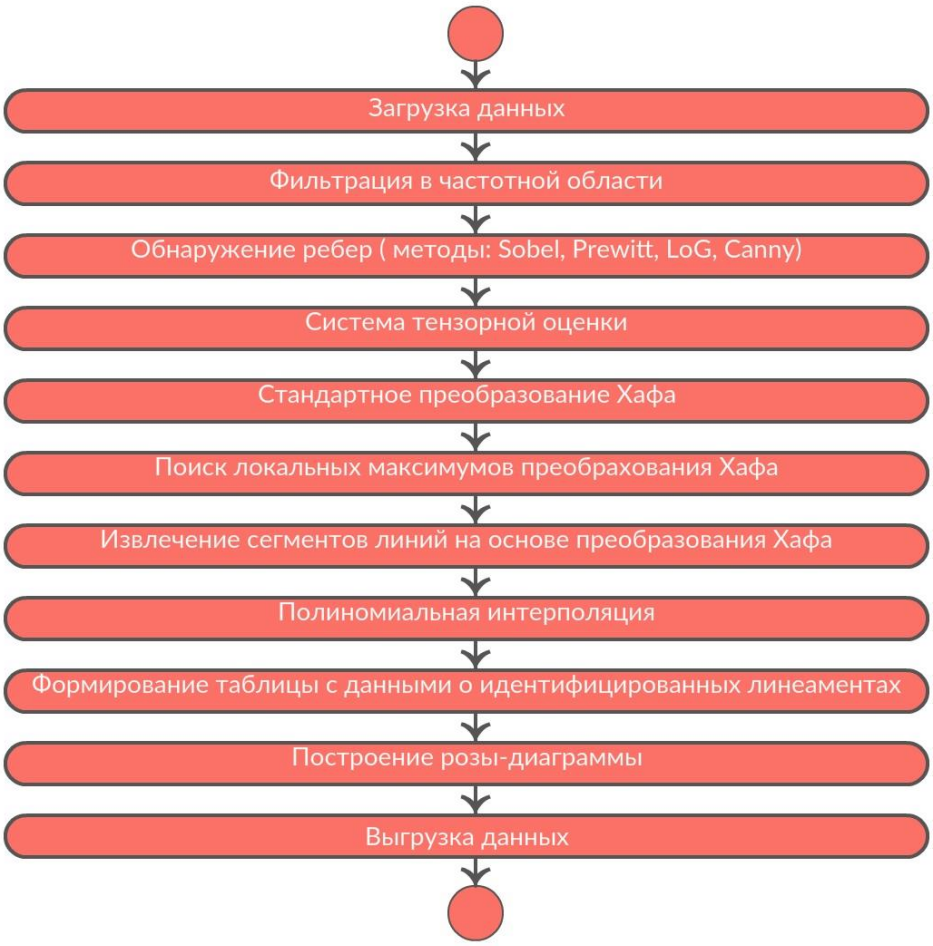


Рис. 1. Общая структура расширенного программного комплекса TecLines

Входные данные. В качестве входных данных используется изображение в формате GeoTiff (рис. 2).

Методы для обнаружения ребер. Существуют несколько типов методов для обнаружения ребер в пространственной области. В расширенный алгоритм TecLines внедрены четыре общих метода: Sobel и Prewitt (производная первого порядка), LoG (производная второго порядка) и Canny (оптимальный метод обнаружения края).

Использование разных методов для обнаружения ребер приведено на рис 3.

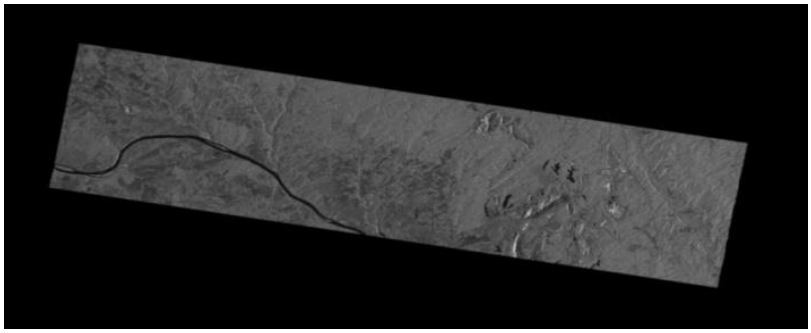


Рис. 2. Файл GeoTiff

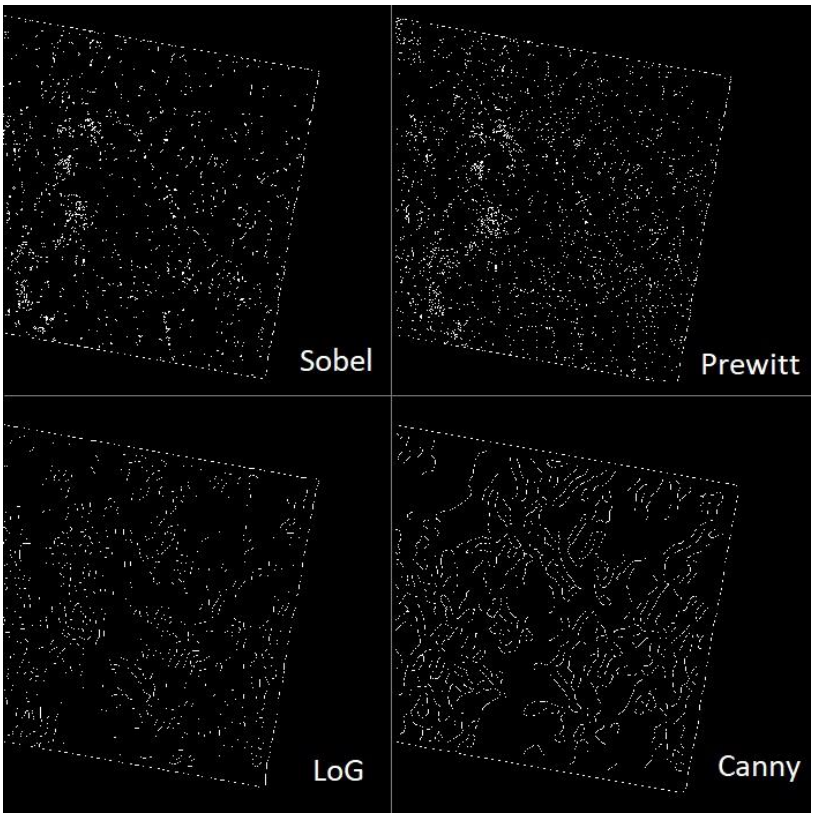


Рис. 3. Сравнение методов для обнаружения ребер

Проведенные расчеты и анализ литературы показал, что метод Canny является оптимальным методом обнаружения границ, который использует многоэтапный алгоритм для распознавания широкого спектра ребер в изображениях. Данные алгоритм позволяет идентифицировать существующие границы и игнорировать ложные, точно определять линию границы и реагировать на каждую границу только один раз. Эти свойства позволяют избежать восприятия широких полос изменения яркости как совокупность границ. Данные метод содержит следующие этапы: сглаживание, поиск градиентов, подавление немаксимумов, двойная пороговая фильтрация, трассировка области неоднозначности [2; 4].

Результаты. Результат выполнения автоматизированного линеаментного анализа можно представить в виде розы-диаграммы (рис. 4).

Также результат работы можно представить в виде таблицы идентифицированных линеаментов (рис. 5).

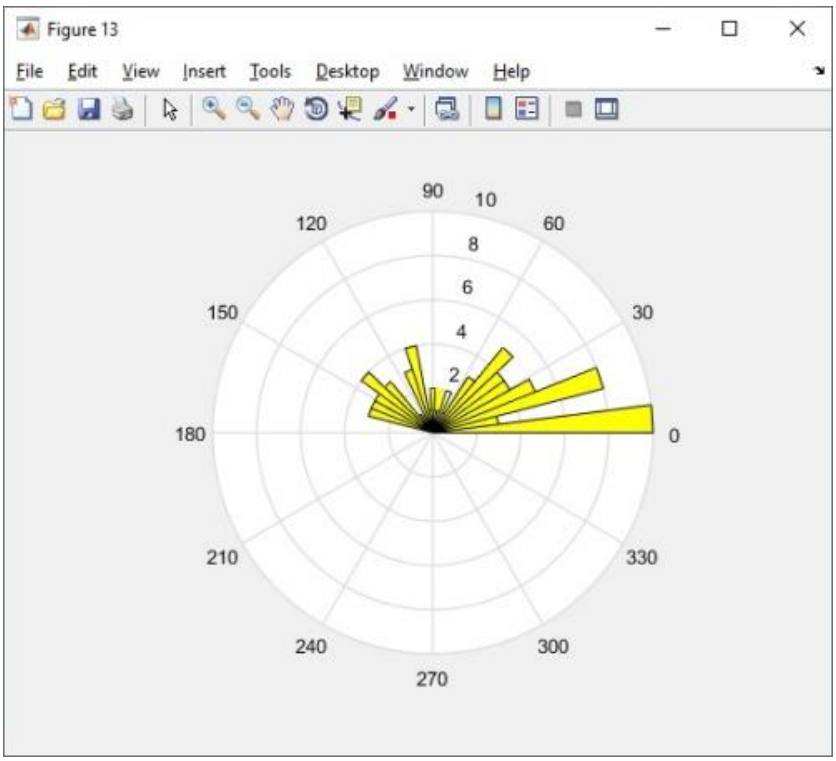


Рис. 4. Роза-диаграмма

segmentstructeca | lengthsfeca

3960x1 struct with 5 fields

Fields	ID	edge	length	enabled	angle
1978	1978	[1047 1036 1053 1042]	212.1320	1	45
1979	1979	[1086 1074 1087 1075]	35.3553	1	45
1980	1980	[1108 1096 1108 1097]	25	1	90
1981	1981	[1201 1190 1203 1191]	55.9017	1	26.5651
1982	1982	[736 301 736 302]	25	1	90
1983	1983	[854 447 854 448]	25	1	90
1984	1984	[893 495 893 496]	25	1	90
1985	1985	[956 573 956 574]	25	1	90
1986	1986	[1.1535e+03 816 1.1...	317.1462	1	134.8096
1987	1987	[1205 881.2297 1210 ...	156.7582	1	37.1169
1988	1988	[1369 1084 1371 1086]	70.7107	1	45
1989	1989	[1398 1119 1404 1126]	230.4886	1	49.3987
1990	1990	[1497 1242 1498 1243]	35.3553	1	45
1991	1991	[724 1088 726 1087]	55.9017	1	153.4349
1992	1992	[767 1075 767 1076]	25	1	90

Рис. 5. Таблица идентифицированных линеаментов

Заключение. Использованная методика многоуровенного автоматизированного линеаментного анализа позволяет выявлять линеаменты разных иерархических уровней. Это значительно повышает объективность и полноту выявления специфики геоэкологической обстановки на исследуемой территории, связанную с трещиноватостью горных пород и инициируемыми ею гидродинамическими и склоновыми процессами. В процессе работы были произведены сравнения с другими расчетными системами, анализ результатов показал работоспособность расширенного комплекса TecLines.

Список литературы

1. Изосов Л.А. Линеаментный анализ при тектонических и металлогенических построениях. 2014.

2. Колобова Н.С. Методики и технологии дистанционного зондирования Земли с целью оценки параметров тектонических процессов. 2010.

3. TecLines. URL: http://www.mdpi.com/2072-4292/6/7/5938.

4. Детектор границ Канни. URL: https://special.habrahabr.ru/kyocera/p/114589/.

УДК 630:004.9

С.Т. Им[1], В.Г. Ли[2]

[1]Институт леса имени В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

[2]Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

e-mail: stim@ksc.krasn.ru

ГИС-АНАЛИЗ СЕВЕРНОЙ ГРАНИЦЫ ВЕЧНОЗЕЛЕНЫХ ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

Проведен анализ смещения северной границы сомкнутых вечнозеленых хвойных (ВЗХ) лесов в Средней Сибири на основе временной серии карт растительного покрова, полученных по данным спутниковой съемки MODIS. Для решения поставленной задачи разработан оригинальный алгоритм автоматизированного выделения северной границы сомкнутых ВЗХ древостоев с помощью ГИС-инструментов. Использованный подход позволил определить усредненные северные границы ВЗХ и их пространственные доверительные интервалы для двух исследуемых периодов (2001–2003 и 2011–2013 гг). Пространственное сопоставление выявленных границ выявило продвижение северной границы ВЗХ древостоев на север в начале XIX в. в Средней Сибири (в среднем на 35 ± 1 км за 2001–2013 гг). Это происходило в период временной паузы роста летних температур. Отступление границы на отдельных участках, скорее всего, связано с антропогенным воздействием, повышенной активностью насекомых вредителей и распространением грибковых и бактериальных заболеваний.

Ключевые слова: северная граница хвойных лесов, Центральная Сибирь, MODIS, ГИС-анализ.

Введение. Хвойные леса играют важную экологическую и экономическую роль в России и покрывают более 500 млн га. В последние десятилетия в Сибири отмечается рост сомкнутости хвойных вечнозеленых лесов (ВЗХ) [1]. Это связывают с изменениями климата [1; 2]. Смягчение климата способствовало расширению ареала ВЗХ. Отмечается распространение ВЗХ древостоев в зону доминирования лиственницы [2]. Продвижение древесной растительности на север [3; 4]. Однако остается не изученным вопрос о движении северной границ ВЗХ на обширных территориях Сибири. В этом случае необходимо применение данных дистанционного зондирования для пространственного анализа границы древостоев на больших территориях. В данном исследовании целью являлся анализ смещения северной границы сомкнутых ВЗХ древостоев на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий. Для проведения анализа необходимо было разработать и апробировать алгоритм выделения северной границы лесов.

Объект исследования. Анализировались вечнозеленые хвойные древостои Средней Сибири. Исследуемый участок покрывал территорию более 2 млн км^2

© Им С.Т., Ли В.Г., 2018

(62–96° в. д.; 56–70° с. ш.; рис. 1). Высота рельефа варьируется от 0 до 270 м над уровнем моря на равнинных участках левобережья Енисея, и до 1580 м над у.м. на правобережье. Средние летние температуры варьируются в широких пределах и составляют 8–10 °С на севере до 20 °С на юге, среднегодовые – от –8 до –40 °С, зимние – от –20 до –45 °С. Количество осадков за год выпадает 200–1 200 мм, летом – 80–250 мм, зимой – 70–120 мм. Хвойные ВЗХ древостои представлены кедром (*Pinus sibirica*), сосной (*Pinus silvestris*), пихтой (*Abies sibirica*) и елью (*Picea obovata*). В северных лесах преобладают лиственничные древостои (*Larix gmelinii*). Темнохвойные леса (ель, пихта и кедр) в основном произрастают в юго-западной части анализируемой территории. Отдельные массивы еловых древостоев доходят по 68° с. ш. по долине реки Енисей.

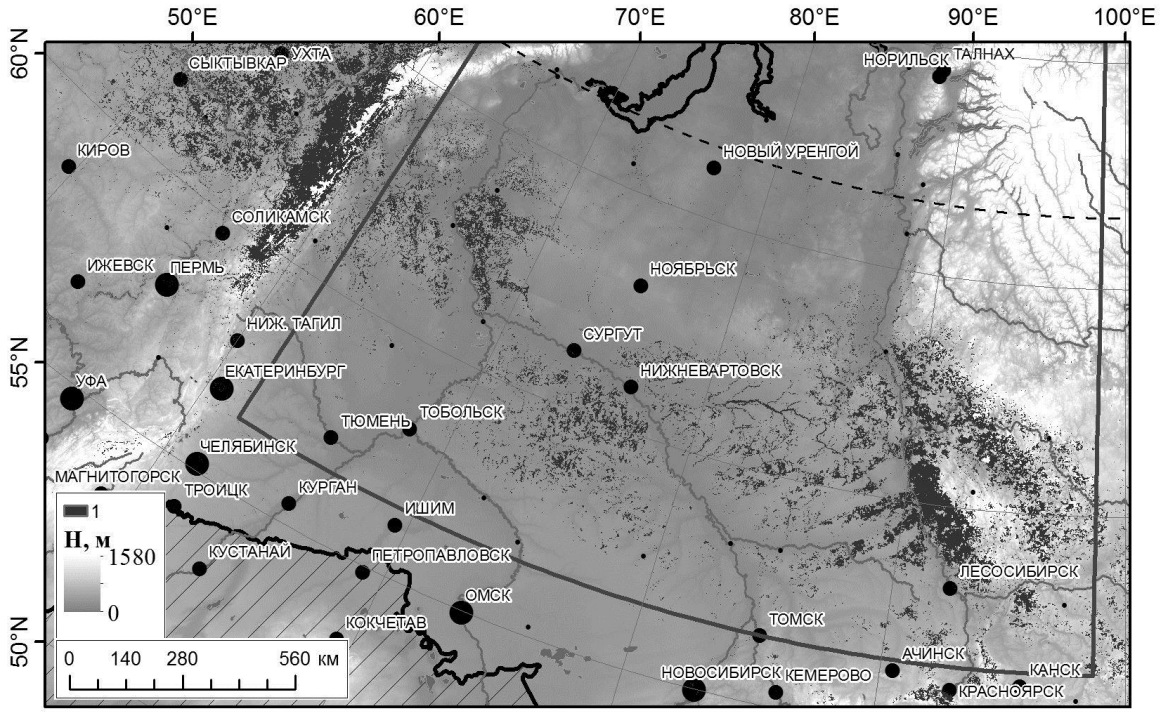


Рис. 1. Расположение объекта исследования (показан трапецией): *1* – сомкнутые вечнозеленые хвойные леса в соответствии с картой MODIS IGBP MCD12Q1 (2013 г.); *H* – высота над уровнем моря (по данным ЦМР GMTED2010)

Материалы и методы. В исследовании использована временная серия ежегодных карт растительного покрова MCD12Q1 (классификация IGBP; https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/ modis/modis_products_table/mcd12q1) [3], сгенерированная на основе данных дистанционного зондирования MODIS. Данные имею пространственное разрешение 500 м и покрывают период с 2001 по 2013 г. Согласно классификации IGBP, класс ВЗХ представляет собой участки земли с преобладанием хвойных древостоев с покрытие >60 % (сомкнутость 0,6) и высотой деревьев более 2 м. Почти у всех деревьев кроны остаются зелеными круглый год. Общая точность классификаций составляет ~67–74 % (https://landval.gsfc.nasa.gov/ProductStatus.php?ProductID=MOD12) [4].

Для устранения влияния пожаров на границу древостоев использована маска гарей за 2001-2013 гг, составленная на основе данных о пожарах MCD64A1 (http://modis-fire.umd.edu; ftp://ba1.geog.umd.edu).

Данные о температурах воздуха и выпадающих осадков извлекались из набора данных CRU TS 4.01 (https://crudata.uea.ac.uk) за период. Климатические помесячные

данные имеют пространственное разрешением 0,5°. Анализировались данные за 1980–2016 гг.

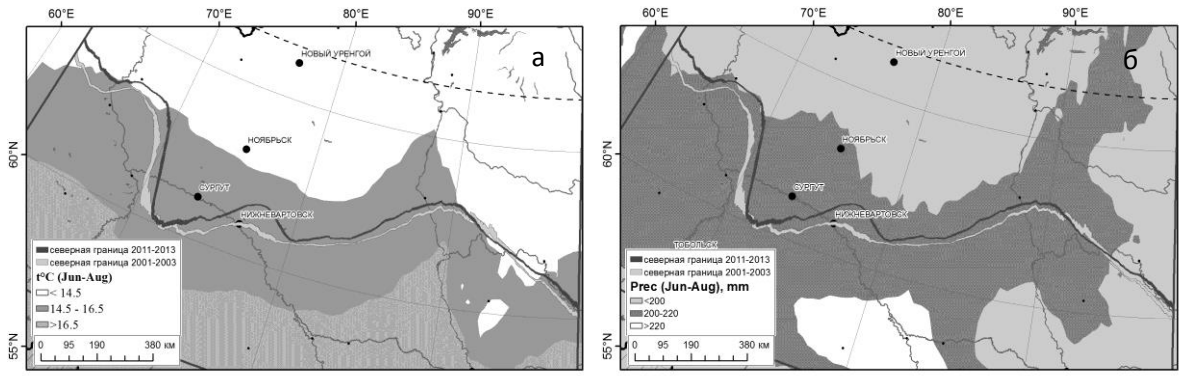
Алгоритм выделения северной границы сомкнутых ВЗХ древостоев. Разработанный алгоритм состоял из следующих этапов. 1. По данным MCD64A1 сформирована маска гарей за период наблюдений (2001–2013 гг). 2. Из временной серии классификационных картосхем MCD12Q1 устранены гари по ранее созданной маске и вырезан фрагмент анализируемой территории. Картосхемы спроецированы в равновеликую проекцию Альберса. 3. Для междугодовой «стабилизации» классификаций MCD12Q1 из слоев начального периода (2001–2003 гг.) сформирована обобщенная картосхема ВЗХ древостоев, в которой единицей обозначены пикселя, соответствующие классу ВЗХ древостоев, присутствовавший одновременно во всех слоях начального периода. Нулем закодирован класс фона. Таким же образом сформирована обобщенная картосхема ВЗХ древостоев для конечного периода (2011–2013 гг). 4. Для учета пространственной плотности пикселей ВЗХ древостоев применена фокальная статистика с усреднением в скользящем окне размером 7 пикселей (применение окна с размером 15 пикселей (3,5 км) не дало адекватных результатов, так как многие кластеры деревьев исчезли после фильтрации по плотности пикселей по критерию 0,3, и граница получилась разорванной). 5. Из карт плотностей пикселей, полученных на предыдущем шаге, были отобраны пикселя ВЗХ древостоев с плотностью пикселей больше 0,3. 6. По полученным отфильтрованным картам плотностей больше 0,3 построена векторная линия северной границы ВЗХ древостоев путем соединения самых северных пикселей вдоль параллели. Северные пикселя ВЗХ определялись путем трассирования всех пикселей вдоль меридианов с севера на юг. 7. Производилась фильтрация «выбросов», т.е. устранение узловых точек из векторной линии сформированной границы ВЗХ древостоев в пределах скользящего окна размером 50 км, отходящих далее, чем три стандартных отклонения от усредненной линии границы ВЗХ древостоев вдоль меридиана. 8. К полученной отфильтрованной линии границы ВЗХ древостоев применялся усредняющий фильтр в пределах скользящего вдоль долготы окна размером 50 км. В результате получена усредненная линия границы ВЗХ древостоев. Также для сгенерированной усредненной линии рассчитывалась полигональная область доверительного интервала ($P > 0{,}95$). 9. Рассчитывалась разность вдоль меридиана между усредненными векторными линиями серверных границ ВЗХ древостоев начального и конечного периодов.

В зоне выделенных границ ВЗХ рассчитана динамика климатических переменных за анализируемый период, которые сопоставлены с произошедшими изменениями.

Пространственные данные анализировались в программном пакете ESRI ArcGIS (https://www.arcgis.com). Статистическая обработка производилась в Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. Разработанный алгоритм позволил выявить изменения северной границы в начале XXI в. По данным временной серии карт MCD12Q1 за 2001–2013 гг. в среднем северная граница сомкнутых ВЗХ в Средней Сибири продвинулась на север на 35 ± 1 км. В 2011–2013 гг. северная граница ВЗХ расположилась на широтах 62,0 ± 0,1° с. ш. (рис. 2). При этом следует отметить, что отдельные массивы ВЗХ древостоев расположились значительно севернее выделенных границ (без применения фильтрации и усреднения граница получалась пилообразной с большими выбросами).

Известно, что северная граница леса чувствительна к летним температурам [2–4]. Однако наблюдаемое смещение границы происходило в период «паузы» (хиатуса) роста летних температур. Следовательно, северная граница распространения ВЗХ, определяемая летними температурами 2000-х гг., еще не достигнута древостоями.



а *б*

Рис. 2. Изменение северной границы сомкнутых хвойных вечнозеленых древостоев (по данным MCD12Q1) и зоны средних летних температур (*а*) и суммарных осадков (*б*) (по данным CRU TS 4.01 за 2001–2013 гг.). Северные границы хвойных вечнозеленых древостоев показаны в виде полигональных областей – доверительных интервалов ($P > 0,95$) средних линий границ

В основном северные границы ВЗХ располагаются в зоне средних летних температур 14,5–16,5 °С, где выпадает летом 200–220 мм осадков. На некоторых участках граница ВЗХ расположилась севернее выделенной температурной зоны (рядом с рекой Обь и поселком Тунгуска) (рис. 2).

Отступление границы наблюдалось в междуречье Оби и Иртыша, что, вероятно, связано с антропогенным воздействием, а также гористой местности севернее Тунгуски (рис. 2).

Выявленные процессы согласуются с ранее полученными результатами других исследований. Так, отмечается экспансия темнохвойных древостоев в зону доминирования лиственницы [2]. Возрастает площадь ВЗХ [1].

Заключение. Разработанный алгоритм позволил автоматизировать выделение границы ВЗХ древостоев на обширной территории, что дало возможность объективно оценить изменения в положении северной границы ВЗХ за анализируемый период (2001–2003 и 2011–2013 гг.) в средней Сибири. В начале XXI в. выявлено продвижение северной границы ВЗХ древостоев на север (в среднем на 35 ± 1 км, ~3 км/г.), что связано с возрастание сомкнутости ВЗХ и их инвазией в зону доминирования лиственницы. Это происходило в период паузы (хиатуса) роста летних температур.

В исследовании не учитывалась точность классификационных картосхем MCD12Q1, которая могла значительно повлиять на результаты. Примененный алгоритм планируется доработать и применить для выделения северных и южных границ различных древостоев по преобладающей породе, применив временные серии карт растительного покрова из других известных картографических источников (например, ESA CCI LC, TerraNorte).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00432 и 18-01-00251).

Список литературы

1. He Y., Huang J., Shugart H.H., Guan X. Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus // Journal of Climate. 2017. Vol. 30 (13). P. 5021–5039.

2. Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in central Siberia // Eurasian Journal of Forest Research. 2007. Vol. 10. P. 163–171.

3. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century / S.G. Shiyatov, M.M. Terent'ev, V.V. Fomin, N.E. Zimmermann // Russian Journal of Ecology. 2007. Vol. 38, № 4. P. 223–227.

4. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры / В.И. Харук, С.Т. Им, К.Дж. Рэнсон, М.М. Наурзбаев // Докл. РАН. 2004. Т. 398, № 3. С. 1–5.

5. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets / M.A. Friedl, D. Sulla-Menashe, B. Tan [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 168–182.

6. Comparison and Assessment of Coarse Resolution Land Cover Maps for Northern Eurasia / D. Pflugmacher, O.N. Krankina, W.B. Cohen [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. P. 3539–3553.

УДК 528.852

П.А. Ким

Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: kim@ooi.sscc.ru

О ФОРМАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Предложены формальные средства описания механизмов естественной кластеризации [1], основанные на известных географических понятиях «речной бассейн», «площадь водосбора», «водораздел». Основу формализации составляют разработанные в математике диаграммы Вороного, тесно связанные с разбиением триангуляцией Делоне. Естественная кластеризация разрабатывалась для масштабируемой модели рельефа, допускающей расширение в четырехмерное пространство, и тем самым кластеризация не ограничивается только двумя параметрами, но может быть продолжена и в многомерные пространства. И если обычно для кластеризации используются статистические методы, то для предложенной модели на первый план выдвигаются методы математического анализа для выделения границ водоразделов.

Ключевые слова: масштабируемая модель рельефа, кластеризация, многомерные пространства, диаграммы Вороного.

Введение. Понятие кластера используется в разных отраслях науки как специфический разделяющий инструмент, что порождает множество алгоритмов кластеризации, отвечающих требуемым целям конкретных исследований. И хотя общепринятой классификации методов кластеризации не существует, выделяют группируемые подходы, которые можно рассматривать как некоторое приближение к практической классификации методов кластеризации [2]. Среди них: вероятностные (*K*-средних, *K*-medians, *EM*-алгоритм, алгоритмы семейства FOREL, дискриминантный анализ); подходы на основе систем искусственного интеллекта (метод нечеткой кластеризации, *C*-средних, нейронная сеть Кохонена, генетический алгоритм); логические (построение дендрограммы, осуществляемое с помощью дерева решений); теоретико-графовые; иерархический подход, предполагающий наличие вложенных групп кластеров различного порядка. Приведенная здесь классификация имеет своей целью оттенить своеобразие разработанного в лаборатории обработки изображений ИВМиМГ СО РАН метода естественной кластеризациии.

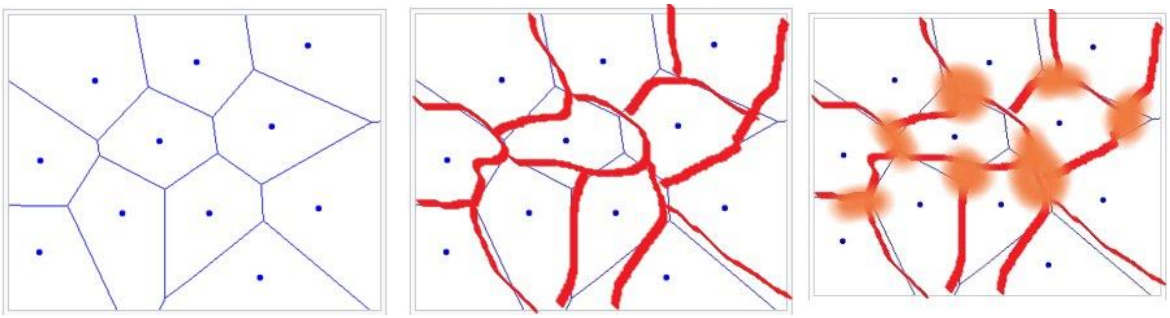
Естественная кластеризация. Поскольку все методы кластеризации опираются на исходную «гипотезу компактности» в пространстве объектов, следовательно, все близкие в этом фазовом пространстве объекты исследуемой совокупности должны относиться к одному кластеру, а все различные объекты, соответственно, должны нахо-

© Ким П.А., 2018

диться в различных кластерах. Подход к кластерному анализу, основанный на методе «геометрической кластеризации», относится к числу задач, содержащих в себе «внутренне присущие» свойства классификации в их фазовом пространстве признаков. Предлагаемый к рассмотрению метод естественной кластеризации выполняется на фазовом пространстве индикаторов. Используемые термины «водораздел», «речной бассейн», отражающие топологические свойства рельефа, исходно применялись в моделях масштабирования рельефа в геофизических исследованиях. Гистограмма двумерных векторов признаков, получаемая обычно при двухспектральном анализе изображения, в новой постановке задач, например, в случае сравнения индекса налогового потенциала территории муниципального образования с индексом бюджетных расходов образует своего рода рельеф в фазовом пространстве индикаторов. И если рассматривать «опрокинутую» поверхность, то логично к кластерам относить «озерные бассейны» для определенного выбираемого уровня высоты поверхности «озера». Границы перевернутых кластеров проходят по «водоразделам». Выбирая разные уровни поверхности «озер», возможно получать не только различное количество кластеров, но и различные их распределения в фазовом пространстве, сохраняя при этом топологическую связность объектов одного кластера. Принципиально новым в подходе, который мы называем «естественной кластеризацией», является возможность его распространения на четырехмерное фазовое пространство признаков [3].

Разрабатываемая в лаборатории естественная кластеризация, в отличие от чисто статистических подходов, ориентируется на геометрическиие свойства кластеризуемых объектов. Ключевым фактором классификации определяется свойство «водораздела», имеющего понятийные корни в географии. О нетривиальности подхода говорит уже тот факт, что наличие локальных высот на рельефе может не характеризоваться свойством разделимости, тогда как наличие локальных минимумов такими свойствами обладает.

Кластеризация по Вороному. Диаграмма Вороного конечного множества точек *S* на плоскости представляет такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, более близких к одному из элементов множества *S*, чем к любому другому элементу множества (рисунок, *а*). Естественные кластеры (рисунок, *б*), образующиеся на поверхности рельефа, сохраняют свою топологическую структуру, индуцированную соответствующей диаграммой Вороного для точек соответствующих локальным минимумам высот рельефа.



а *б* *в*

Рисунок. Схемы разбиения поверхности диаграммами Вороного
и соответствующие географические кластеры

Разработан алгоритм вычленения линий «водоразделов» на базе полигонов Вороного, разбивающих пространство множества точек локальных минимумов высот рельефа. Были сформулированы утверждения о существовании фрагментов линий «водораздела» между локальными минимумами высот. Интересные математические постановки возникают в связи с возможностью рассматривать в качестве представителей кластеров – точки локальных

минимумов, т.е. объекты, порождающие площадные «озера», площадные границы которых несколько размывает нечеткий фронт «водоразделения» (рисунок, *в*), что порождает разные вариативные возможности толкования разделения кластеров, в частности, путем привлечения механизмов использования нечетких множеств.

Возрастание интереса к естественной кластеризации связывается в первую очередь с переносом наработанных результатов на пространства большей размерности. Важным индикатором этого вновь формирующего технологического тренда следует отметить патент США Yao, 31.01.2017, United States Patent 9554776 «Способ выделения области интереса с использованием 3D/4D аппаратуры визуализации», в котором представлено устройство, создающее виртуальный четырехмерный объект. Вторым примером является виртуальный учебник «4D-Анатомия». Это облачный интерактивный ресурс для моделирования рассечения и современная образовательная платформа. Создатели программы изобрели мощный интерактивный ресурс по анатомии человека. Вы получаете не просто изображение, но можете вращать его и даже увидеть, как бьется сердце (http://didaktor.ru/dobavte-v-kopilku-programmy-po-4d-anatomii-uchitelyu-na-zametku/#more-6067).

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и базового проекта ФАНО (проект № 0315-2016-0003).

Список литературы

1. Ким П.А. Федоровых О.П. О методе естественной кластеризации в задачах оптимизации межбюджетных трансфертов // Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов: в 2 т. Т. 1. Новосибирск: СГГА, 2013. С. 168–171.

2. Кластерный анализ. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Кластерный.

3. Ким П.А., Федоровых О.П. Геометрия четырехмерного пространства – о развитии пространственного восприятия // Предметное образование. М., 2016. С. 50–63.

УДК 910.26

А.А. Колесников, П.М. Кикин,
Е.В. Комиссарова, Д.В. Грищенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия, e-mail: alexeykw@mail.ru

АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Сегодня технологии искусственного интеллекта, машинного обучения и больших данных получили сильное развитие и применяются для широкого спектра задач. Направление дистанционного зондирование Земли (ДЗЗ) с его разнообразием типов исходных и обрабатываемых данных, задач пространственного анализа, способов моделирования и прогнозирования как нельзя лучше подходит для применения этих технологий. В статье будет рассмотрена типовая схема обработки данных ДЗЗ методами машинного обучения.

Ключевые слова: машинное обучение, анализ данных, прогнозирование, алгоритмы.

© Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В., Грищенко Д.В., 2018

В настоящее время технологии машинного обучения применяются для решения очень широкого спектра задач. Их использование для обработки, анализа информации и построения математических моделей на основе данных дистанционного зондирования Земли может поспособствовать разработке новых программных инструментов и улучшению автоматизации все большего спектра операций.

Использование технологий машинного обучения подразумевает, что проблема решается не традиционным написанием компьютерной программы, а обучением уже готовых алгоритмов на частных примерах ее решения. Такой подход позволяет выполнить автоматизированное построение математической модели, подходящей для практических всех возможных вариантов исходных данных и вариантов решения рассматриваемой задачи. Авторами по результатам применения технологий машинного обучения для конкурсных (GeoHack.112, Raiffeisen Data Cup, DengAI: Predicting Disease Spread, Statoil/C-CORE Iceberg Classifier Challenge) и научно-исследовательских работ (прогнозирование развития городских агломераций, автоматизированная векторизация гидрографических данных по спутниковым снимкам), ориентированных на обработку данных дистанционного зондирования Земли, представленных в исходном либо обработанном виде, были сформулированы типовой порядок действий (приведен на рисунке) и рекомендации по применению алгоритмов в зависимости от типа решаемой задачи, приведенные далее в тексте статьи [1].

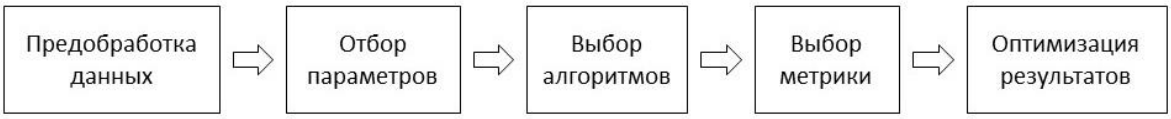


Рисунок. Типовая схема действий при создании математической модели с использованием технологий машинного обучения

Поскольку обучение программы происходит на основе набора данных (англ. *dataset*), то их предварительная обработка (предобработка) является очень важным этапом. Ошибки в типах данных, пропуски, шумовые значения и т.п. могут очень сильно исказить итоговую математическую модель. На этом этапе проводится проверка и назначение (при необходимости) правильных типов параметров (целое или дробное число, текст, дата и время и т.п.), заполнение пропущенных значений (если это возможно и в этом есть необходимость, поскольку некоторые алгоритмы не могут обрабатывать данные с пропусками), удаление ошибочных данных, различные типы кодирования. Под кодированием здесь понимается замена исходных значений на те, которые больше подходят для выбранного алгоритма. Примерами этой операции могут быть конвертация даты и времени в набор целых чисел, отображающих количество недель, дней, часов от определенной даты или замена числового значения класса объекта на набор отдельных признаков все из которых равны нулю за исключением одного (англ. *one-hot encoding*).

После предобработки данных нужно выполнить операции по отбору тех параметров, по которым будет строиться итоговая модель. Данный этап необходим, потому что слишком большое число параметров может значительно замедлить выполнение алгоритмов и, что более важно, уменьшить точность предсказания и привести к переобучению (особенно при наличии параметров с низкой степенью корреляции с целевой переменной). Способами провести отбор значимых параметров могут быть:

- визуализация с помощью диаграмм, графиков и т.п., в том числе на карте, посредством геоинформационных систем;
- расчет значений корреляции (коэффициенты Пирсона, Спирмена и т.д.) [2–4];
- пространственная автокорреляция, хаотичность размещения объектов в пространстве (индекс Морана и т.д.) [2–5];

- расчет энтропии, в том числе для временных рядов (характерный показатель Ляпунова, коэффициент Хёрста, detrended fluctuation analysis и т.д.) [2–4].

Третий и четвертый пункты приведенного списка относятся к анализу пространственно-временных данных, в том числе данных ДЗЗ. Их расчет реализован как в традиционных геоинформационных системах (ArcGIS, GRASS GIS, Saga), так и в специализированных программных библиотеках (PySAL, nolds и др.).

После того как был произведен отбор параметров, нужно осуществить выбор наиболее подходящих алгоритмов. На данном этапе трудно однозначно сделать выбор в пользу того или иного алгоритма или технологии машинного обучения, поэтому обычно производят тестирование нескольких алгоритмов и уже потом производят оптимизацию для наиболее подходящего. Большое количество предложений и относительная дешевизна облачных сервисов для построения моделей машинного обучения позволяют запустить оценку точности одновременно для нескольких алгоритмов/технологий, по сути, осуществить выбор оптимального и наиболее точного варианта методом подбора. Но такой вариант подходит не для всех задач, учитывая традиционно большой объем данных дистанционного зондирования. Далее приведен список наиболее часто используемых алгоритмов для конкретного круга задач:

- детекция и сегментация объектов на растровых данных [6–10];
  - деревья решений;
  - комбинация деревьев решений и градиентного бустинга (данный вариант является одним из наиболее универсальных решений наряду с нейронными сетями);
  - традиционные и сверточные нейронные сети (являются наиболее универсальным решением, но требуется подбирать большое число параметров и подбирать архитектуру сети);
- классификация данных;
  - деревья решений и случайный лес;
  - нейронные сети;
  - метод опорных векторов;
  - логистическая классификация;
  - наивная байесовская классификация;
- расчет пропущенных либо недостающих значений;
  - деревья решений и случайный лес;
  - комбинация деревьев решений и градиентного бустинга;
  - линейная регрессия;
  - логистическая регрессия;
  - нейронные сети;
  - ridge регрессия;
  - lasso регрессия;
  - метод опорных векторов;
  - кригинг и кокригинг (этот и следующие методы реализованы в большинстве геоинформационных систем);
  - метод обратных взвешенных расстояний [7];
  - методы локальных и глобальных полиномов;
- прогнозирование и анализ временных рядов (для этих задач характерно наличие пространственных и атрибутивных данных для одной и той же территории в нескольких временных интервалах) [8; 10];
  - комбинация деревьев решений и градиентного бустинга;
  - ARIMA/SARIMA;
  - нейронные сети глубокого обучения;
  - нейронные сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM);

- пространственно-временные повторяющиеся сверточные сети (SRCN);
- пространственный анализ методом Монте-Карло (SMCA);

- поиск аномалий в данных;
  - метод опорных векторов;
  - метод главных компонент;
  - метод K-средних.

Для оценки результатов работы алгоритмов необходимо выбрать способ оценки качества и эффективности конкретного алгоритма (метрика) и их выбор также необходимо делать, основываясь на особенностях решаемой задач. При обработке результатов, имеющих среди исходной информации данные дистанционного зондирования можно использовать специфические метрики, учитывающие пространственное положение объектов – коэффициент Джини, коэффициент Кендалла, процент попадания в окружность. Для оценки качества классификации и регрессии на основе табличных данных обычно используются среднеквадратическая ошибка, R2-метрика, матрица ошибок (англ. *confision matrix*), F1-метрика, AUC ROC, логарифмическая функция потерь [5; 7].

После выбора оптимального алгоритма и построения предварительной математической модели следует применить какие-либо способы улучшения качества:

- ансамблирование или гибридные модели (суть этого метода состоит в объединении нескольких математических моделей различных алгоритмов и последовательная или параллельная обработка исходных данных для увеличения точности результатов);
- перекрестная проверка (кросс-валидация, при использовании этого метода для обучения используются все исходные данные в отличие от традиционного разделения на обучающую и тестовую выборки, плюсы такого подхода особенно заметны на разнородных данных и при их малом объеме);
- подбор параметров по сетке (англ. *grid search*) и случайный подбор параметров (англ. *random search*) (этот метод позволяет автоматизировано подобрать параметры алгоритмов, называемые гиперпараметрами, наиболее подходящие для конкретной задачи, отличие состоит в переборе значений в заранее указанном интервале, либо на основе случайно указанных значений);

После того как были подобраны оптимальные параметры (гиперпараметры) алгоритмов, нужно сделать возможным использование созданной модели на реальных данных. Для этого есть несколько вариантов:

- создание модулей для какой-либо ГИС (поскольку одним из самых распространенных, общих для ГИС и для библиотек языков программирования стал Python, то внедрение сторонних библиотек в интерфейс настольной ГИС может быть выполнено достаточно просто);
- создание web-обвязки для выполнения скриптов на сервере;
- размещение на специализированном облачном сервисе.

Заключение. Документы и программный код проведенных исследований в формате программного обеспечения Jupyter Notebook размещен по адресу https://github.com/AlexeyKW/Spatial_ML. Можно сделать выводы о том, что использование современных технологий машинного обучения может привнести новые методы в уже привычные технологические цепочки обработки и использования данных ДЗЗ. Но для выработок четких алгоритмов и технологий в значимости от решаемой задачи и имеющихся данных потребуются дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Использование машинного обучения для построения картографических изображений / А.А. Колесников, П.М. Кикин, Е.В. Комиссарова, Д.В. Грищенко // Междунар. науч.-практ.

конф. «От карты прошлого – к карте будущего», 28–30 ноября 2017 г., Пермь – Кудымкар. С. 110-120

2. Breiman L. Random forests // Machine learning, Т. 45, №. 1, 2001. С. 5–32.

3. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. Convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. № 39 (12). С. 2481–2495.

4. Dai J., He K., Sun J. Boxsup: Exploiting bounding boxes to supervise convolutional networks for semantic segmentation // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015. С. 1635–1643.

5. Haug S., Ostermann J. A Crop Weed Field Image Dataset for the Evaluation of Computer Vision Based Precision Agriculture Tasks // Computer Vision – ECCV 2014 Workshops. Zurich: Springer. 2014. С. 105–116.

6. A machine learning approach to visual perception of forest trails for mobile robots / Giusti J. Guzzi, D.C. Cires, F.-L. He [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. 2016. Т. 1, № 2. С. 661–667.

7. Eigen D., Fergus R. Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015. С. 2650–2658.

8. Rey S.J., Smith R.J. A spatial decomposition of the Gini coefficient // Letters in Spatial and Resource Sciences. 2013. № 6. P. 55–70.

9. Orchard fruit segmentation using multi-spectral feature learning. Intelligent Robots and Systems (IROS) / C. Hung, J. Nieto, Z. Taylor [et al.] // IEEE/RSJ International Conference on. IEEE. 2013. P. 5314–5320.

10. Semantic segmentation of mixed crops using deep convolutional neural network / K. Mortensen, M. Dyrmann, H. Karstoft [et al.] // International Conference on Agricultural Engineering, 2016.

УДК 004.932.2

В.Б. Костоусов, А.В. Дунаева, Ф.А. Корнилов

Институт математики и механики имени Н.Н. Красовского
УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: vkost@imm.uran.ru, maryanova.av@yandex.ru, kornilovfa@imm.uran.ru

ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СТЕРЕОСЪЕМКИ

В работе представлен метод построения цифровой модели местности в составе матрицы высот рельефа и объектов, а также матрицы типов объектов местности. Матрица высот строится посредством двухэтапного алгоритма стереосопоставления и далее используется для обучения сверточной нейронной сети, предназначенной для поиска строений на спутниковых снимках. Приводятся результаты работы метода на реальных данных.

Ключевые слова: обработка изображений, космическая съемка, стереосопоставление, классификация, сверточные нейронные сети.

Введение. Цифровые модели местности находят широкое применение в картографии, строительстве, навигации летательных аппаратов и других отраслях. Такая модель включает в себя матрицу высот рельефа и объектов местности, а также матрицу типов объектов поверхности. В настоящее время задача автоматического построения высокодетальной матрицы высот успешно решается по данным аэросъемки методом

© Костоусов В.Б., Дунаева А.В., Корнилов Ф.А., 2018

SGM [1]. Однако этот метод не работает при его прямом использовании на данных космической съемки. Это связано в первую очередь с тем, что значимые объекты земной поверхности (здания и сооружения) на таких изображениях имеют малый размер, сопоставимый с размером геометрических искажений, вызванных съемкой местности под разными углами.

Для построения матрицы высот в работе [2] предлагается двухэтапный алгоритм стереосопоставления, использующий априорную картографическую информацию. Предварительной процедурой для выполнения стереосопоставления является классификация типов объектов подстилающей поверхности, среди которых выделяются: облака, водная поверхность и растительность, что позволяет отдельно обработать фрагменты снимка, относящиеся к этим типам. Кроме вышеупомянутых типов объектов, не менее важной задачей является обнаружение зданий и сооружений. В работе представлено сравнение двух подходов к решению этой задачи, первый основан на обнаружении скачков высоты в матрице высот [3]. Второй подход основан на использовании сверточной нейронной сети специальной архитектуры: рассматривается модификация сети *U-Net* [4], обученная на данных разного типа (спектральная и высотная информация, и их комбинация), а также представлены результаты сравнения качества обнаружения строений на спутниковом снимке в зависимости от состава набора данных, используемого для обучения нейронной сети.

Построение цифровой модели местности. Входными данными для предлагаемого метода являются спутниковый стереоснимок, состоящий из пары панхроматических изображений высокого разрешения и соответствующей им пары мультиспектральных изображений (как правило, меньшего разрешения), электронная топографическая карта и цифровая матрица высот рельефа с разрешением порядка 150 м на пиксель.

Результатом работы алгоритма является цифровая модель местности в составе трех геометрически синхронизированных растровых изображений с шагом на местности 1 м на пиксель:

1) матрица высот объектов и рельефа;
2) матрица типов объектов подстилающей поверхности;
3) цифровой ортотрансформированный снимок.

Первым шагом предварительной обработки является повышение разрешения мультиспектральных снимков методом слияния (англ. *pansharpening*) с панхроматическим изображением, имеющим более высокое разрешение. Эта процедура позволяет получить мультиспектральные снимки с разрешением равным разрешению панхроматического снимка. Полученные мультиспектральные снимки, вместе с контурами, извлеченными из электронной топографической карты, используются для получения матрицы типов объектов подстилающей поверхности, среди которых выделяются: облака и водная поверхность (определяются путем текстурного анализа с привлечением картографической информации), растительность (определяется путем вычисления индекса *NDVI* [5]) и прочие типы поверхности. При этом области, скрытые облаками, требуется исключить из дальнейшей работы, а для внутренней слабоконтрастной части водной поверхности высота определяется с помощью интерполяции значений, вычисленных по ее границе. Последним этапом предварительной обработки является разбиение на вычислительные фрагменты области, для которой следует осуществить построение цифровой модели местности. Данная процедура позволяет выполнить стереосопоставление параллельно, что ускоряет расчеты пропорционально количеству имеющихся вычислительных ядер.

Стереосопоставление является основным этапом при построении цифровой модели местности. Его целью является вычисление матрицы сдвигов M, описывающей сдвиг пикселей между парами панхроматических изображений (I_1, I_2) такой, что для всех пикселей (x, y) выполняется:

$$I_1(x+M(x, y), y) \sim I_2(x, y).$$

В предлагаемом методе построение матриц сдвигов ведется в два этапа. На первом шаге строятся предварительные матрицы сдвигов пикселей для пар изображений (I_1, I_2) и (I_2, I_1), такие матрицы сдвигов мы называем *грубыми*. Для измерения близости пикселей при вычислении соответствий используется дескриптор *DAISY* [6], который основан на сравнении свойств нескольких фрагментов в окрестности рассматриваемой точки, и устойчив к изменениям яркости и небольшим геометрическим искажениям объектов. Для стереосопоставления применяется алгоритм, основанный на разрезах на графах [7]. Параметры алгоритма подобраны таким образом, чтобы он вычислял матрицы сдвигов, на которых представлены лишь сдвиги для сравнительно больших объектов таких, как дом или группа деревьев.

На втором шаге, осуществляется уточнение полученных грубых матриц сдвигов. Для этого применяется модифицированная версия алгоритма *SGM*. В отличие от исходного алгоритма [1], модифицированный алгоритм строит матрицу сдвигов, значения которой в каждом пикселе лежат в заданном диапазоне относительно значений соответствующей грубой матрицы сдвигов. В качестве меры близостей также используется *DAISY*, как на первом шаге, но с другими параметрами, позволяющими осуществлять более точную локализацию объектов. Наконец, на этапе постобработки две полученные матрицы высот сшиваются в одну ортотрансформированную матрицу. В итоге полученная цифровая модель местности состоит из трех слоев данных: матрицы высот рельефа, матрицы типов подстилающей поверхности и цифрового ортотрансформированного снимка.

Обнаружение строений и сооружений. До недавнего времени большинство алгоритмов обнаружения зданий было основано на сегментации и контурном анализе снимков, что не позволяло достичь требуемого качества обнаружения объектов. Как и во многих других задачах обработки изображений, значительно повысить качество обнаружения объектов позволило использование сверточных нейронных сетей. Сверточные сети показывают лучшие результаты в соревнованиях по обнаружению и классификации объектов на аэрокосмоснимках, проведенных за последние два года. В соревнованиях по обнаружению зданий лучшее качество показали решения, основанные на модификациях сверточной нейронной сети *U-Net* [4].

U-Net принимает на вход многомерный массив, составленный из каналов спутникового снимка и дополнительных данных о сцене, таких как матрица высот и индекс *NDVI*, вычисленный в каждом пикселе изображения. Обработка данных в *U-Net* выполняется двумя частями сети: первая предназначена для извлечения признаков и определения класса объекта (энкодер), вторая (декодер) для получения итоговой разметки снимка на два класса – здания и фон. В виду ограниченности памяти видеокарты, обучение сети производится на случайно выбранных фрагментах спутникового снимка размером 112×112 пикселей. В данной работе обучение производилось на вручную размеченном четырехканальном спутниковом снимке участка городской местности размером порядка 5×5 км с разрешением 1 м на пиксель, и содержащем более 3 000 строений – многоэтажные постройки, гаражи, ангары и частные дома. Для оценки степени влияния состава обучающего набора на качество обнаружения зданий, было обучено четыре модели *U-Net* на наборах данных, содержащих:

- снимок, *NDVI*, матрицу высот;
- снимок, матрицу высот;
- снимок, *NDVI*;
- снимок.

Обучение нейронных сетей требует наличия большого обучающего набора, что является главным недостатком этого подхода. Этого недостатка лишен алгоритм, основанный на поиске скачков высоты в матрице высот [3]. Он не требует времени и дан-

ных для обучения, а также настройки параметров для работы с разными спутниковыми снимками.

Оценка качества работы алгоритмов проводилась на фрагменте четырехканального спутникового снимка размером 900×500 пикселей с пространственным разрешением 1 метр на пиксель и содержащим 116 зданий. Области, отмеченные алгоритмами как здания, сравнивались с ручной разметкой по следующим критериям:

1. Мера пересечения на объединение (*Intersection over Union*), учитывающая точность локализации обнаруженных объектов:

$$IoU = \frac{|S_{obj} \cap R|}{|S_{obj} \cup R|},$$

где S_{obj} – найденные области строений; R – ручная разметка. Значение IoU изменяется от 0 до 1, где 1 означает полное совпадение найденных областей с ручной разметкой.

2. Количество и доля верных обнаружений и ложных тревог.

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица

Сравнение качества работы алгоритмов обнаружения строений

Алгоритм	*IoU*	Верное обнаружение	Ложные тревоги	Верное обнаружение	Ложные тревоги
Высотные объекты + сегментация [3]	0,6 0	76	14	0,66	0,16
U-Net (снимок, ndvi)	0,74	95	10	0,82	0,09
U-Net (снимок, ndvi, высота)	0,74	101	18	0,87	0,15
U-Net (снимок)	0,74	102	7	0,88	0,06
U-Net (снимок, высота)	0,76	102	13	0,88	0,11

Заключение. В данной работе был рассмотрен метод построения цифровой модели местности, основанный на двухэтапном алгоритме стереосопоставления и определении типов подстилающей поверхности (воды и растительности) путем проведения текстурного анализа снимка с привлечением топографических карт. Также было рассмотрено сравнение двух подходов к обнаружению зданий на изображениях. Лучшее качество работы показала сверточная нейронная сеть *U-Net*. Согласно результатам проведенного эксперимента, *U-Net* показывает хорошее качество обнаружения зданий даже без привлечения дополнительной информации о сцене, однако использование информации о высоте улучшает точность обнаружения границ зданий, о чем свидетельствует более высокое значение *IoU* Важным продолжением работы является расширение класса распознаваемых объектов на дороги, различные типы растительности и открытого грунта, а также определение требований к составу и размеру набора необходимого для обучения сверточных нейронных сетей.

Работа выполнена в рамках Программы УрО РАН № 18-1-1-14 «Классические и современные методы теории аппроксимации и приложения».

Список литературы

1. Semi-global matching: an alternative to LiDAR for DSM generation? / S. Gehrke, K. Morin, M. Downey [et al.] // ISPRS Archives. 2010. Vol. Part 1. XXXVIII. 6 p.

2. Костоусов В.Б., Перевалов Д.С., Корнилов Ф.А. Создание цифровой модели местности по данным космической стереосъемки // Материалы XXX конф. памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн "ЦНИИ Электроприбор"», 2016. С. 382–388.

3. Dunaeva A.V., Kornilov F.A. Building detection in remote sensing images using a digital surface model // Computational Mathematics and Information Technologies. Electronic journal. 2017. V. 2, № 2. P. 185–193.

4. Iglovikov V., Mushinskiy S., Osin V. Satellite Imagery Feature Detection using Deep Convolutional Neural Network: A Kaggle Competition // June 2017. URL: https://arxiv.org/abs/1706.06169.

5. Козодеров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. М.: МФТИ, 2008. 222 с.

6. Tola E., Lepetit V., Fua P. A DAISY: An Efficient Dense Descriptor Applied to Wide-Baseline Stereo // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2010. Vol. 32. Is. 5. P. 815–830.

7. Kolmogorov V., Monasse P., Tan P. Kolmogorov and Zabih's Graph Cuts Stereo Matching Algorithm // Image Processing on Line. 2014. Vol. 4. P. 220–251.

УДК 004.93.1, 004.932, 519.7:004.8, 681.513.6/7, 528.8.04

Л.И. Лебедев

Институт информационных технологий, математики и механики ННГУ
имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия, e-mail: lebedev@pmk.unn.ru

РАСПОЗНАВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В работе пиксели гиперспектрального изображения (ГСИ) рассматриваются как спектральные образы. Решение задачи распознавания осуществляется построением классификаторов в разделяющих подпространствах или сводится к установлению сходства описаний формы кривых различных пикселей. Близость форм определяется корреляционно-экстремальным контурным методом (КЭКМ). По распознанным пикселям формируются границы объектов. Результаты работы продемонстрированы на ГСИ Moffett Field.

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, метод нахождения разделяющих подпространств, корреляционно-экстремальный контурный метод, эталон, сходство форм, распознавание, контур.

Введение. Обработкой космических снимков занимаются уже около двух десятков лет. Функционируют программы многоцелевого анализа снимков (например, MultiSpec [1]). С появлением гиперспектральных изображений интерес к исследованиям, направленным на получение мощного и надежного инструмента для анализа многозональных и гиперспектральных данных вырос многократно. Это следует из увеличивающегося потока публикаций. Появились такие стандарты описания гиперспектральных изображений, как ENVI Standard [2], и на его основе в MATLAB реализован широкий спектр функций доступа к данным и их обработке. Интерес к мульти- и гиперспектральным данным обусловлен все более широким использованием их в таких областях, как проведение разведки полезных ископаемых и мониторинга природных ресурсов, экологического мониторинга, мониторинга рисков, мониторинга в интересах сельскохозяйственных нужд и многих других областях.

Принято считать, что основную информацию о природе объектов на земной поверхности содержат их спектральные характеристики, поэтому в большинстве известных алгоритмов классификации используются спектральные образы (сигнатуры) типов покрытий [3].

Методы распознавания и векторизации. В данной работе решение задачи распознавания пикселей, а на его основе определение характеристик сканируемого объек-

© Лебедев Л.И., 2018

та, его отражательных особенностей, реализовано как на базе метода построения иерархических классификаторов (МПИК) в получаемых разделяющих подпространствах, размерностями существенно меньшими исходного описания, так и на базе КЭКМ в режиме автоматического распознавания спектральных образов пикселей изображения.

Решение задачи распознавания объектов ГСИ, как правило, осуществляется с целью получения областей определенного вида покрытия. Для этого необходимо сформировать две обучающие последовательности пикселей, одна из которых соответствует пикселям распознаваемого типа покрытия (множество $\mathbf{X}$), а вторая состоит из пикселей, соответствующих другим видам покрытий (множество $\mathbf{Y}$). В этом случае каждый пиксель рассматривается как точка в признаковом пространстве спектральных характеристик $\mathbf{R_n}$, где n – количество слоев (кадров) ГСИ. Построение иерархического классификатора для выделения точек множества $\mathbf{X}$ (распознавание типа покрытия) осуществляется в подпространствах $\mathbf{R_2}$ в диалоговом режиме. Подпространства $\mathbf{R_2}$ на каждом уровне иерархии получаются на основе собственных векторов $(\mathbf{u}^1, \mathbf{u}^2)$, соответствующих двум наибольшим собственным значениям (λ_1, λ_2) специальной матрицы межклассового разброса [4], вычисляемой по формуле

$$\mathbf{D} = \sum_{\mathbf{x}\in\mathbf{X}} \sum_{\mathbf{y}\in\mathbf{Y}} \frac{(\mathbf{x}-\mathbf{y})\cdot(\mathbf{x}-\mathbf{y})^T}{\|\mathbf{x}-\mathbf{y}\|^{\beta}}. \qquad (1)$$

Значение параметра β выбирается таким образом, чтобы получить разделяющее подпространство, наиболее лучшее, в смысле построения решающих правил классификации. На каждом уровне иерархии множества $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$ формируются из точек, принадлежащих зонам отказов. В зависимости от условий использования результатов распознавания построение решающих правил ведется либо в подпространстве коэффициентов сверток (c_1, c_2) пикселей по векторам $(\mathbf{u}^1, \mathbf{u}^2)$, либо в подпространстве информативных признаков (z_{ν_1}, z_{ν_2}), либо их сглаженных аналогов $(z^*_{\nu_1}, z^*_{\nu_2})$. Номера информативных признаков (ν_1, ν_2) определяются из условия

$$\mathbf{U} = (\mathbf{u}^1, \mathbf{u}^2), \quad (\nu_1, \nu_2) = \arg\max_{i,\,j} \begin{vmatrix} u_i^1 & u_i^2 \\ u_j^1 & u_j^2 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} u_{\nu_1}^1 & u_{\nu_1}^2 \\ u_{\nu_2}^1 & u_{\nu_2}^2 \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

Значения сглаженных (отфильтрованных) информативных признаков $(z^*_{\nu_1}, z^*_{\nu_2})$ тогда получаются как коэффициенты сверток пикселей по векторам $(\mathbf{g}^1, \mathbf{g}^2) = \mathbf{G}$, где $\mathbf{G} = \mathbf{U}\cdot\mathbf{V}^T$. Если ввести базис $\mathbf{K} = (\mathbf{k}^1, \mathbf{k}^2) = \mathbf{U}\cdot\mathbf{V}^{-1}$, то легко получить аналитическую зависимость коэффициентов сверток по базису $\mathbf{U}$ и сглаженных информативных признаков: $(c_1, c_2)^T = \mathbf{V}^{-1}\cdot(z^*_{\nu_1}, z^*_{\nu_2})^T$. Очевидно, что критерий выбора информативных признаков (2), обеспечивая наилучшее подавление шумов, не является единственным и, например, задавая другие номера линейно-независимых строк матрицы $\mathbf{U}$ можно решить задачу распознавания типа покрытия на базе спектральных образов, полученных от спектрометров с другими частотными характеристиками. Действительно, используя частоты из перекрывающихся диапазонов (γ_1, γ_2) в качестве номеров информативных признаков можно определить матрицу $\mathbf{V}_\gamma$ и получить аналоги коэффициентов сверток $(\tilde{c}_1, \tilde{c}_2)^T = \mathbf{V}_\gamma^{-1}\cdot(s_{\gamma_1}, s_{\gamma_2})^T$. Данный метод построения иерархическо-

го классификатора для распознавания типа покрытия наиболее эффективен, когда обучающие последовательности $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$ формируются на базе пикселей реальных ГСИ. Однако даже в этих условиях полнота представления всего многообразия спектральных образов в множествах $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$, как правило, является трудно разрешаемой задачей. Поэтому, если полнота представления не обеспечена, возможны ошибки классификации как первого, так и второго рода. Для их исправления необходимо воспользоваться визуализацией бинарной матрицы, полученной по результатам распознавания пикселей ГСИ. Для большей эффективности решения этой задачи осуществляется переход от растрового представления бинарной матрицы к векторному формату.

Для решения задач распознавания, когда задано только множество $\mathbf{X}$ (например, спектральные образы покрытий, полученные в лабораторных условиях), а формировать обучающую последовательность $\mathbf{Y}$ в силу различных причин нецелесообразно, требуется применять методы, базирующиеся на определении степени сходства с эталонными спектральными образами. Здесь предлагается использовать адаптированные к данному виду информации корреляционно-экстремальные контурные методы [5]. Особенность представления спектрального образа состоит в том, что его описание, по сути, является функцией одной переменной (частоты). Таким образом, совмещение какой либо сигнатуры с эталонным спектральным образом для оценки степени сходства этом случае заключается в параллельном переносе или параллельном переносе с масштабированием одной из кривых. При этом эти преобразования осуществляется только над амплитудными характеристиками пикселя (координата Y). С учетом сделанных замечаний оценка близости, инвариантная ортогональным преобразованиям (ОП), будет задаваться формулой

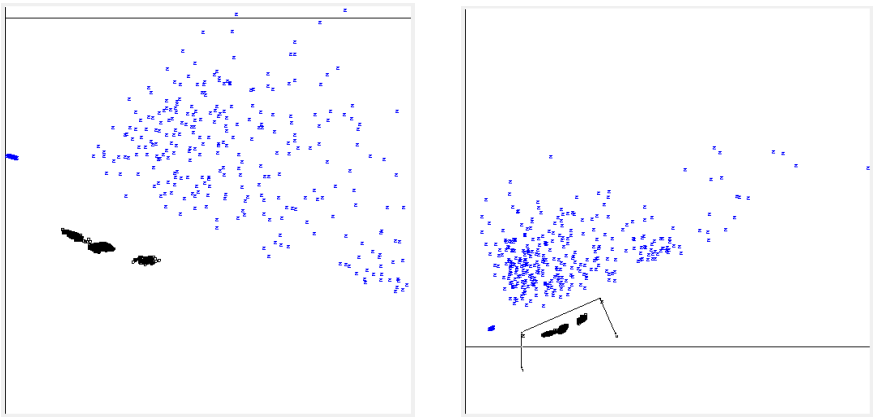
$$\varepsilon^{O} = \mathrm{D}\mathbf{y}^{\mathbf{e}} + \mathrm{D}\mathbf{y} - 2 \cdot \mathrm{cov}(\mathbf{y}^{\mathbf{e}}, \mathbf{y}), \qquad (3)$$

а оценка, инвариантная относительно аффинных преобразований (АП), формулой

$$\varepsilon^{a} = \mathrm{D}\mathbf{y}^{\mathbf{e}} - \mathrm{cov}(\mathbf{y}^{\mathbf{e}}, \mathbf{y}) / \mathrm{D}\mathbf{y}, \qquad (4)$$

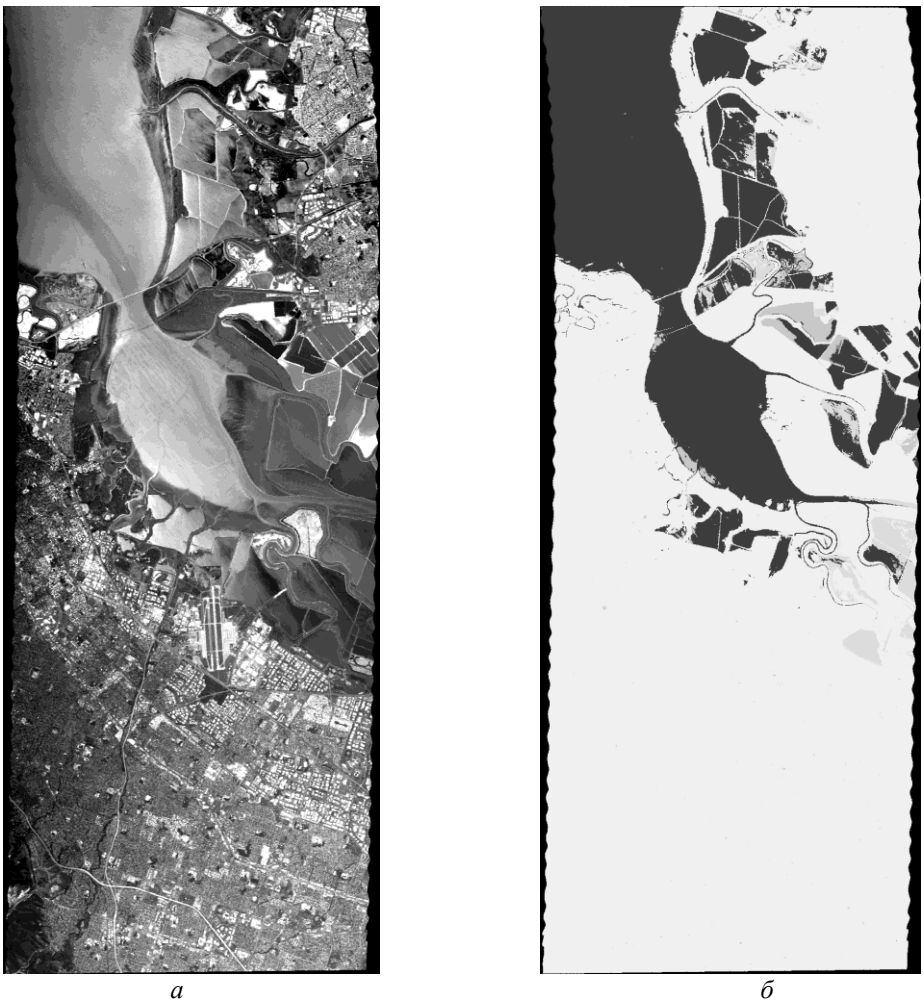
где $\mathrm{D}\mathbf{y}^{\mathbf{e}}$ и $\mathrm{D}\mathbf{y}$ – дисперсии эталонной и распознаваемой сигнатур; $\mathrm{cov}(\mathbf{y}^{\mathbf{e}}, \mathbf{y})$ – их ковариационный момент. Эталонные сигнатуры формируются на основе представления пикселей из множества $\mathbf{X}$. Если их количество велико (десятки и более тысяч), то в целях уменьшения вычислительной сложности распознавания предварительно проводится сокращение числа эталонных сигнатур. Для этого используются КЭКМ в режиме авто распознавания, применяемые к пикселям из множества $\mathbf{X}$. Эталонные сигнатуры в этих случаях формируются из числа нераспознанных спектральных образов. Отметим, что получаемые при использовании формул (3) и (4) множества эталонных сигнатур в общем случае будут различаться как по составу, так и по количеству. Следует также отметить, что распознанные данными методами сигнатуры будут иметь схожесть по форме кривой с каким либо эталонным образцом, что не характерно для метода построения классификаторов в разделяющих подпространствах. Поэтому КЭКМ можно также использовать в целях верификации полученных результатов распознавания.

Экспериментальные исследования. Эксперименты в области решения задач распознавания проводились на файле ГСИ Moffett Field спектрометра AVIRIS на основе 224 частот с длинами волн в диапазоне от 365,9298 до 2 497,036 нм. Исходное ГСИ было представлено матрицей размерами 753×1 924 пикселей с разрешением 17 м. Использовался двухбайтовый формат представления значений амплитуды спектра. Сначала была проведена фильтрация (коррекция значений) спектральных образов исходного ГСИ. Ее суть заключалась в замене отрицательных величин сигнатуры на данные, полученные при кусочно-линейной аппроксимации по ближайшим положительным значениям. Сигнатуры с полностью отрицательными или положительными значениями не корректировались.



а *б*

Рис. 1. Множества $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$ в подпространствах СВ (*а*) и СИП (*б*)



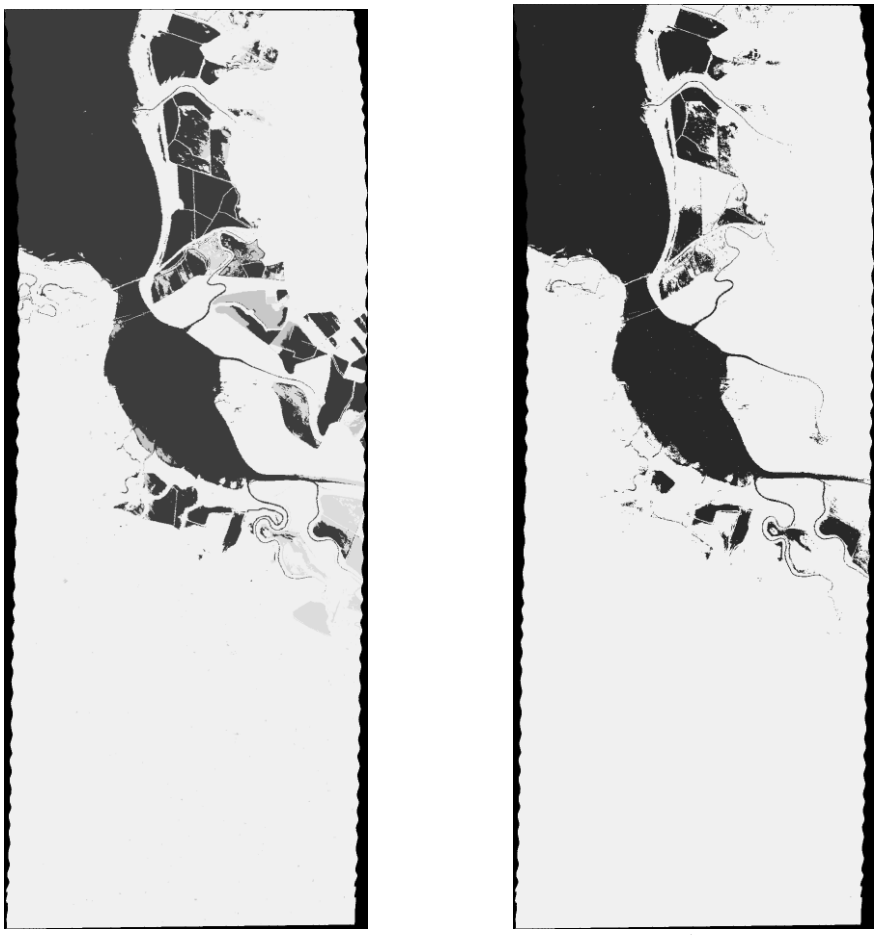
а *б*

Рис. 2. Исходное изображение (*а*) и результаты распознавания на базе МПИК (*б*). Снимок № 17

Для решения задачи распознавания областей водной поверхности в соответствии с предлагаемым методом были сформированы два множества пикселей. Обучающая последовательность $\mathbf{X}$ включала три фрагмента изображения водной поверхности (ВП) с разными градациями серого. На рис. 1, *а* в подпространстве собственных векторов (СВ), полученных при значении $\beta = 2$, отображены множества $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$. На рис. 1, *б* эти же множества отображены в подпространстве полученных сглаженных информативных признаков (СИП) со значениями (z_{15}^*, z_{46}^*) и приведен вариант кусочно-линейного решающе-

го правила выделения пикселей ВП. На рис. 2 приведено исходное изображение снимка № 17 и результаты распознавания пикселей ВП на основе полученного РП. Из визуального анализа изображений можно сделать вывод о достаточно высоком уровне распознавания областей водной поверхности с использованием только двух информативных признаков, которые соответствуют снимкам № 15 и 46. Для более качественного распознавания необходимо уточнить на основе полученных результатов обучающие последовательности обоих классов и получения РП следующего уровня.

Для распознавания этого же ГСИ сначала, с использованием КЭКМ в режиме самообучения, на той же обучающей последовательности пикселей $\mathbf{X}$ была решена задача получения множества эталонов. На основе оценки близости, инвариантной АП (4), это множество было представлено только двумя сигнатурами. Сами результаты распознавания пикселей ВП изображения на базе КЭКМ представлены на рис. 3, *б*. Сравнение результатов распознавания ГСИ предлагаемыми двумя методами показывает их высокую корреляцию. Необходимо отметить, что классификация пикселей ГСИ на данном этапе будут характеризоваться в основном ошибками второго рода при использовании МПИК и ошибками первого рода при КЭКМ распознавании.



а *б*

Рис. 3. Результаты распознавания на базе МПИК (*а*) и на базе КЭКМ(ИАП) (*б*)

Заключение. Приведены методы и технологии их использования для решения задачи распознавания пикселей ГСИ. Проведенные исследования и полученные результаты экспериментов показывают высокую эффективность применения предлагаемых методов и алгоритмов для решения задач распознавания типов покрытий на базе ГСИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 16-11-00068 и гранта РФФИ № 18-07-00715.

Список литературы

1. URL: http://gis-lab.info/qa/multispec-sat.html.
2. URL: http://www.harrisgeospatial.com/docs/ENVI_FILE_TYPE.html.
3. URL: http://e-lib.gasu.ru/eposobia/gis/7.html.
4. Васин Ю.Г., Лебедев Л.И. Алгоритмы построения простых решающих правил в задачах распознавания образов // Кибернетика и вычислительная техника. Киев: Наукова Думка, 1979. Вып. 45. С. 58–65.
5. Лебедев Л.И. Корреляционно – экстремальные контурные методы распознавания. Теоретические основы: учеб. пособие. Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2013. 113 с.

УДК 528.8.04, 528.88

Е.А. Мальцев, Ю.А. Маглинец, Г.М. Цибульский

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: mtorrero@mail.ru, YMaglinets@sfu-kras.ru, gtsybulsky@sfu-kras.ru

ОБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Наряду с субъективной оценкой качества изображений *mean opinion score* (MOS), на данный момент развиваются объективные оценки, к ним можно отнести Structural SIMilarity (SSIM), Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) и др. В данной работе предлагается объективная оценка качества изображения на основе вычисления геометрической концентрации дефектов, искажающих изображение.

Ключевые слова: обработка изображений, дистанционное зондирование, объективная оценка, геометрическая концентрация, облачность.

Введение. При обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в процессе создания тематического продукта одним из критериев поиска и подбора исходных изображений является наличие дефектов искажающих спутниковый снимок. Фотометрические искажения космических изображений могут быть различной природы и возникать из-за помех вносимых аппаратурой съемочной системы, помех, связанных с оптикой атмосферы, а также помех, вызванных наличием препятствий в тракте приема между сенсорами, принимающими излучение и исследуемыми объектами. К таким примерам можно отнести перекрытие плотной облачностью исследуемых объектов. В региональных центрах или федеральных банках данных ДЗЗ объемы накапливаемых спутниковых изображений возрастают с каждым годом, это обусловливает разработку новых критериев и метрик для поиска и фильтрации колоссального количества данных, не только ограничиваясь пространсвенно-верменными характеристиками спутниковых изображений, но и переходя на уровень реляционных структур, использовать семантику и отношения между объектами на изображении.

Измерение качества изображения. Для оценки качества изображений могут применяться субъективные оценки с привлечением групп экспертов, по этим данным могут строиться объективные оценки, основанные на усредненных показателях (*mean opinion score* – MOS) [1], однако наибольший интерес сейчас представляют объективные оценки качества изображений без привлечения экспертов. К последним можно от-

© Мальцев Е.А., Маглинец Ю.А., Цибульский Г.М., 2018

нести следующие метрики объективной оценки качества изображений: пиковое значение сигнал/шум PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) [2], определяемое через среднеквадратичное отклонение MSE (Mean Square Error); норма минковского; метрика структурного сходства SSIM (Structural SIMilarity) и др.

Анализа качества изображений в данных метриках основан на результатах сопоставления числовых мер различий эталонного и искаженного дефектами изображения, однако эти оценки слабо коррелируют с физиологией человеческого восприятия, а также затруднительно использование таких оценок как критерия поиска спутниковых изображений ввиду необходимости сравнения двух изображений на одну и ту же территорию с одинаковыми условиями съемки, а это не представляется возможным.

В данной статье предлагается объективная оценка качества спутниковых изображений без использования эталона на основе расчета геометрической концентрации сегментированных объектов, представляющих собой дефекты искажающие изображение, на примере облачности.

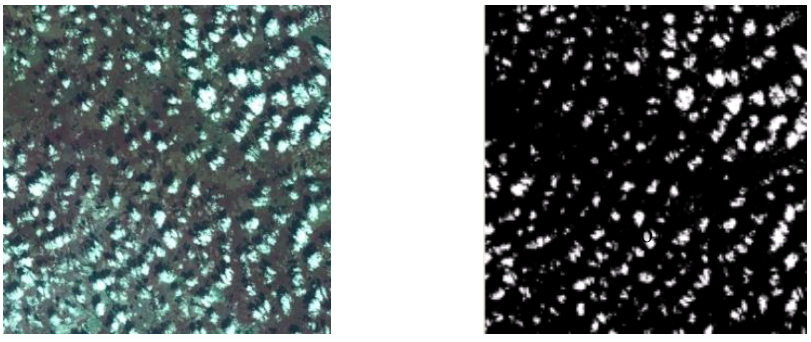
Объективная оценка качества изображения на основе расчета геометрической концентрации. В работах [3–7] описан алгоритм оценки качества изображений на основе выделения облачности как дефектов искажающих спутниковые снимки с использованием геометрической концентрации.

На базе него возможно построение объективной оценки для критерия поиска и фильтрации изображений в каталоге спутниковых снимков, позволяющей объективно оценить качество изображения, в том числе с точки зрения визуального восприятия и привлекательности снимков для дальнейшей тематической обработки.

Для оценки характера расположения дефектов в виде облачности на спутниковом снимке (рис. 1) выполняется расчет коэффициента геометрической концентрации объектов на плоскости $c_i(t^i)$ (1) [7]:

$$c_i(t^i) = \frac{\Delta NS_i}{NS_i}, \quad (1)$$

где t^i – цель анализа (класс объектов); ΔNS_i – площадь треугольной области, образованной тремя геометрическими центрами областей, представляющих целевые объекты, находящихся на минимальном евклидовом расстоянии друг от друга; NS_i – сумма площадей областей (объектов), представляющих вершины треугольной области.



а *б*

Рис. 1. Исходное спутниковое изображение (*а*),
процент облачности 11 %; полученная маска облачности (*б*)

Измерение элементов триангуляции с помощью (1) позволяет выделить области изображения, где наблюдается высокая, средняя или низкая (фоновая) геометрическая концентрация объектов (рис. 2).

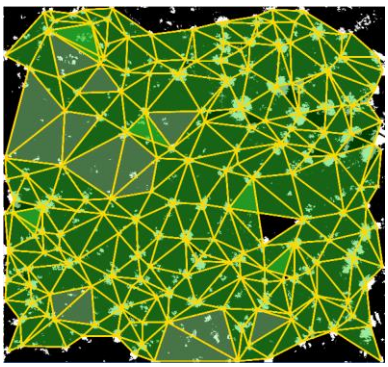


Рис. 2. Построеннная триангуляция Делоне (веделено желтым) по маске облачности (выделено белым) с рассчитанной геометрической концентрацией (низкой, средней, высокой – отмечены в градациях зеленого цвета соответственно), фон – черный

Следующие значения порогов для расчета геометрической концетрации были получены опытным путем после анализа множества изображений в каталоге ДЗЗ [7]: 0–0,05 – низкая геометрическая концетрация *С*1; 0,05–1 – средняя геометрическая концетрация *С*2; 1–max – высокая геометрическая концетрация *С*3.

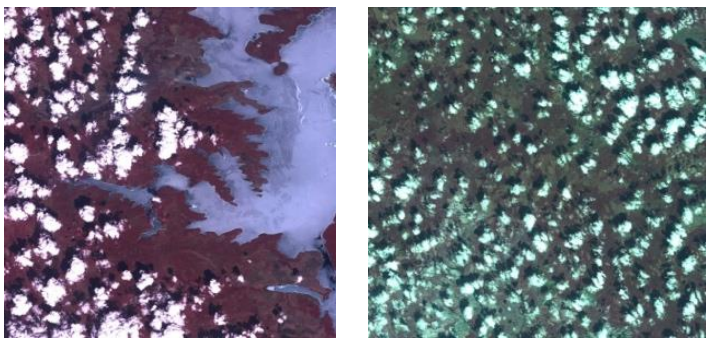
Для построения объективной оценки для критерия поиска изображений в каталоге ДЗЗ будем рассматривать процент занимаемой площади средней и высокой концентрации облачности на изображении к общей площади всего изображения:

$$K = \frac{S_{c2} + S_{c3}}{S_a} * 100\% \qquad (2)$$

где S_{c2} – площадь средней концентрации; S_{c3} – площадь высокой концентрации; S_a – площадь всего изображения.

Данная оценка показывает степень искажения дефектами изображения.

На примере двух спутниковых изображений с одинаковым процентом облачности (P = 11 %), но разным характером ее расположения (рис. 3) произведем расчет оценки K по соотношению (2).



а *б*

Рис. 3. Спутниковые изображения; процент облачности 11 %

Для изображения на рис. 3, *а* K = 77 %, для изображения на рис. 3, *б* K = 43 %.

Выводы. Данная оценка, характеризующая расположение объектов, искажающих изображение, коррелирует с человеческим восприятием изображения и показывает, что рис. 3, *а* менее искажен дефектами и более предпочтителен как в визуальном восприятии, так и для дальнейшей тематической обработки.

Список литературы

1. ITU-T. Recommendation P.800.1. Methods for objective and subjective assessment of speech and video quality. Mean opinion score (MOS) terminology, 2006.

2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006.

3. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, E.P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Т. 2, вып. 4. С. 600–612.

4. Сай С.В., Сорокин Н.Ю. Метод оценки четкости фотореалистичных изображений без использования эталона // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь: докл. ТУСУРа. Декабрь 2012. Ч. 1, № 2 (26).

5. Extracting a Cluster of Clouds in the SPOT 4 Satellite Images / Е.А. Мальцев, Э.Е. Сиротин, Д.А. Перфильев, Г.М. Цибульский // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications: междунар. журн. 2011. Т. 21, вып 2. С. 501–504.

6. Измерение облачности на снимках, полученных со спутника SPOT-4 / Е.А. Мальцев, Д.А. Перфильев, Э.Е. Сиротин, Г.М. Цибульский // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2011. Т. 2, вып. 5. С. 229–242.

7. Мальцев Е.А. Разработка алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования Земли для распознавания пространственных объектов сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой: дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2017.

УДК 528.852.8:528.8.044.1

Л.С. Миков

Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемерово, Россия
e-mail: mikov@ict.sbras.ru

ТОЧЕЧНАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА УСТОЙЧИВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Рассмотрены вопросы обработки многопроходных серий спутниковых радарных изображений с космических аппаратов Sentinel-1A/1B методом устойчивых отражателей. Проводится тестирование данного метода на территориях городов Кемерово и Новосибирск.

Ключевые слова: радарные данные, метод устойчивых отражателей, радарная интерферометрия, Sentinel-1A/1B.

Введение. В настоящее время для оценки деформаций земной поверхности на больших площадях (несколько сотен квадратных километров) активно используются спутниковые радарные данные. Обработка таких данных осуществляется, как правило, классическим методом дифференциальной радарной интерферометрии (DinSAR).

Принцип радарной интерферометрии заключается в следующем. Каждый пиксел спутникового снимка содержит информацию о действительной и мнимой части волны, отраженной от участка земной поверхности и принятой спутником. Таким образом, спутниковый снимок имеет две составляющие: действительную и мнимую часть, – которые могут быть преобразованы в амплитудную (яркостную) и фазовую

© Миков Л.С., 2018

составляющие изображения. Отметим, что типичный размер участка земной поверхности в одном пикселе изображения превышает квадратный метр, что делает невозможным определение миллиметровых смещений по яркостной составляющей изображения. Для этой цели используется анализ фазовых составляющих набора снимков.

На основе набора фазовых составляющих SAR-изображений, полученных спутником в разные моменты времени (с периодичностью, например, один снимок в сутки), рассчитывается изменение фазовой составляющей с течением времени. Изменение фазовой составляющей связано линейной зависимостью с разностью хода волны, отраженной от поверхности и, таким образом, появляется возможность измерять вертикальные смещения объектов земной поверхности, сравнимые с длиной волны сигнала спутника, имеющей порядок нескольких сантиметров [1].

Дальнейшим развитием метода DinSAR стали методы, использующие для обработки серии радарных снимков за длительный период времени – несколько месяцев. Одним из таких методов является метод устойчивых отражателей (Persistent Scatterer, или PS).

Метод PS – это метод расчет смещений точечных целей, являющихся постоянными отражателями для радиолокационного спутника. Позволяет измерить детальные смещения на объектах инфраструктуры. Применяется, как правило, для территорий с городской местностью.

Метод устойчивых отражателей основан на анализе серии парных интерферограмм, построенных относительно одного фиксированного снимка, называемого «мастером». За счет конечной разрешающей способности антенны значение в каждом пикселе интерферограммы является векторной суммой отражений спутникового сигнала от всех объектов, попавших в ячейку разрешения. Если отражающие объекты в пределах пикселя смещаются хаотически, например, если область покрыта густой растительностью, то суммарное отражение будут меняться случайным образом и суммарная фаза не будет коррелированной. Если же в пределах ячейки находится объект с более сильным отражением (например, скальный выступ, крыша дома, ствол дерева или просто открытое пространство между деревьями), то его вклад будет доминировать над случайными отражениями от остальных объектов, например, от растительности. Если такое соотношение сохраняется на протяжении всего периода съемки, то данный пиксель может быть идентифицирован как «устойчивый отражатель» [2].

Район исследования. Исследование проводилось на территории городов Кемерово и Новосибирск (Советский район).

Исходные данные. В качестве исходных данных были отобраны 28 радарных изображений с космического аппарата Sentinel-1A/1B за период с 11 ноября 2016 г. по 7 октября 2017 г. для Кемерово и 34 изображения за период с 28 ноября 2016 г. по 4 января 2018 г. для Новосибирска. Интервал между съемками составил 12 дней. Данный космический аппарат осуществляет съемку в С-диапазоне с разрешением 5×20 м/пиксель (в режиме Interferometric Wide Swath). Обработка производилась в программном комплексе SARscape 5.2 с параметром когерентности 0,75. Такой высокий порог когерентности был выбран для уменьшения зашумленности результатов расчета.

Результаты расчетов. В ходе обработки исходного массива данных методом PS были построены карты средних скоростей изменения вертикальных смещений (рис. 1, 2), представляющие собой точечные векторные файлы. Карты содержат 77 572 точки для Кемерово и 27 714 точек для Новосибирска, каждая из которых является устойчивым отражателем и имеет набор атрибутов, таких как географические координаты, средние скорости смещений, дата, значение когерентности и др.

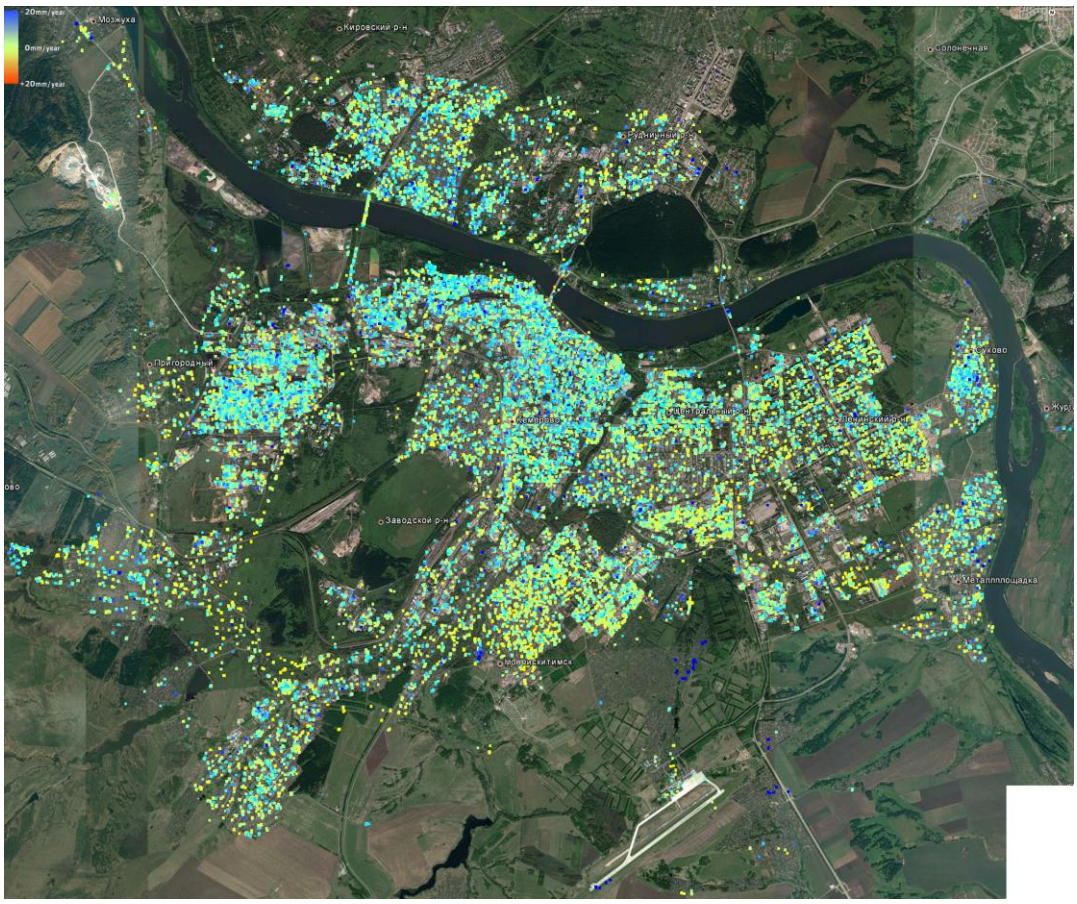


Рис. 1. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений, Кемерово

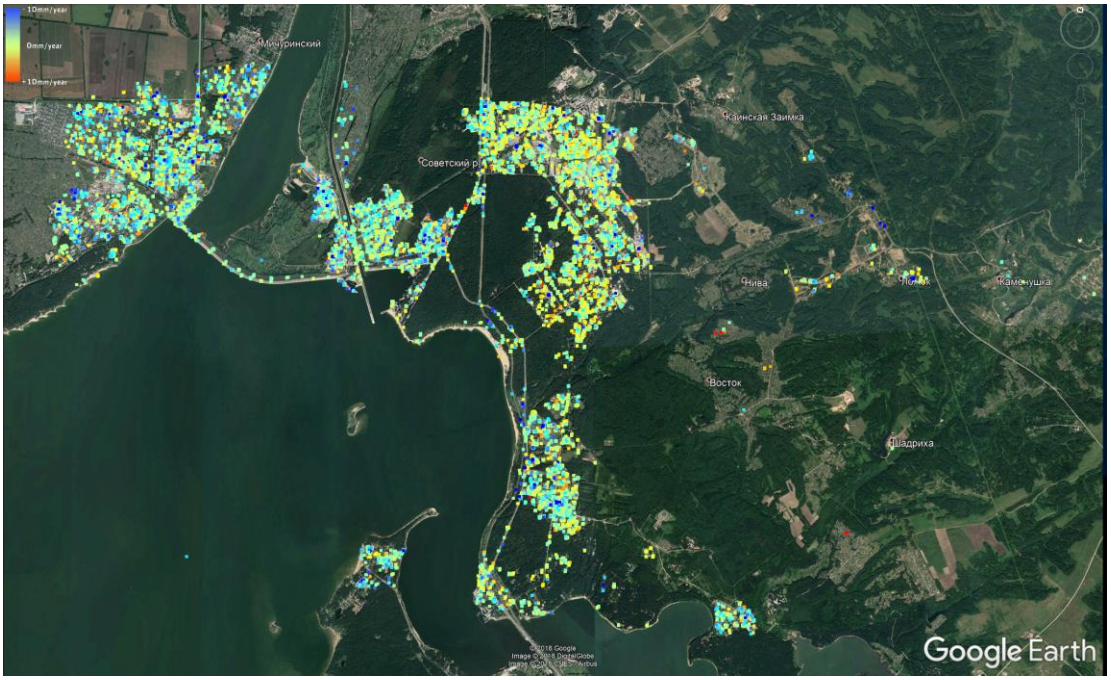


Рис. 2. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений, Новосибирск

Итоговые средние скорости вертикальных смещений составили от –7 (синие точки, обозначающие опускание земной поверхности) до 41 мм/г. (красные точки, обозначающие поднятия) для Кемерово и от –24 до 24 мм/г. для Новосибирска. Большая часть

исследуемой территории является стабильной с минимальными оседаниями. Основная часть опускания земной поверхности отмечается на территории, где строятся новые дома, и на участках возле водных объектов.

Список литературы

1. Рудаков К.В., Сандуляну Д.Н., Токмакова А.А. Определение движений объектов на земной поверхности методами SAR-интерферометрии // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. С. 1–16.

2. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И. Мониторинг оползневых процессов на участке Северокавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя // Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 4. С. 5–22.

УДК 629.7.005:551.510.42

О.В. Непомнящий, Д.В. Попов, С.Л. Лещенко

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: 2955005@gmail.com, Juuuis92@gmail.com, lsl24@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАССЫ ЛИДАРА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЗАМЕРОВ ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Выполнен анализ существующих решений в области обнаружения предельно малых концентраций углеводородов в приземном слое методом дистанционного лазерного зондирования. Сформулированы цели и задачи разработки перспективной технологии подобного зондирования. Выявлена необходимость математического описания трассы лидара для получения высокоточных результатов. Разработана модель и проведено тестовое моделирование в пакете прикладных программ Matlab.

Ключевые слова: лидар, дистанционное зондирование, лидарное уравнение, математическая модель, природный газ.

Введение. Технологии дистанционного зондирования применяется в различных областях исследования параметров компонентов окружающей среды, в том числе и при поиске и разведке мест добычи полезных ископаемых (минералы, нефть, природный газ).

Одним из таких, наиболее перспективных, методов зондирования является лазерное дистанционное зондирование посредством лидара – лазерного локатора [1]. По результатам измерения, величина рассеяния и поглощения регистрируемого на датчике лазерного излучения, испускаемого лидаром и отраженного от земной поверхности, позволит судить о молекулярном составе атмосферы. Применение данного метода для поиска утечек углеводородов позволяет решать многие задачи, встающие при геофизических исследованиях, например, фиксировать локальные выходы природного газа, наблюдать пространственную динамику поверхностных утечек в реальном масштабе времени и осуществлять топологическую привязку предполагаемых мест выхода к местности.

© Непомнящий О.В., Попов Д.В., Лещенко С.Л., 2018

Анализ показал, что большая часть разработок в данной области используется для зондирования приземного слоя с целью обнаружения средних и высоких утечек углеводородов (более 20 ppm), которые возникают, например, при прорыве нефте- и газопроводов. Такие решения не отвечают современным требованиям по точности при разведке месторождений природного газа.

Как правило, существующие решения основаны на использовании лазеров, функционирующих в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах [2–4]. Но для повышения качества обнаружения утечек это ведет к необходимости использования лазеров высокой мощности (более 50 Вт) ввиду низкой поглощательной способности углеводородов в данных спектрах [5]. Такой подход приводит к увеличению массово-габаритных характеристик и собственного энергопотребления измерительной аппаратуры и неприменим для использования на малых и сверхмалых летательных аппаратах.

Таким образом, в большинстве известные решения неприменимы для локализации вероятностных месторождений нефти и газа в труднодоступных местах, например, в условиях Сибири и арктических зон, поскольку для этих задач определяемая концентрация углеводородов в приземном слое предельно мала (до 0,01 ppm). При этом наиболее выгодным является применение лидара в составе пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, что накладывает ограничения по массе и габаритам изделия. В таком случае встает задача повышения чувствительности метода определения концентрации углеводородов, при меньшей мощности самого лидара.

С целью разработки технологии дистационного, лидарного зондирования, определения граничных условий и характеристик проектируемой аппаратуры требуется адекватное математическое представление трассы прохождения светового пучка, т.е. необходимо определить модель атмосферы, сформировать перечень критических параметров и учесть максимально возможное количество факторов, вносящих искажения в принятый датчиком сигнал.

Математический аппарат. Принцип функционирования разрабатываемого комплекса основан на методе дифференциального поглощения, подразумевающего сравнение обратно рассеянных лазерных сигналов: одного на частоте поглощения, а другого – вне нее. Комплекс включает два источника лазерного луча. Генерируемые ими импульсы, отражаясь от зондируемой поверхности, попадают на приемные фотоэлементы. При этом мощность первого лазера на порядок выше, нежели мощность второго и поглощается исследуемым газом. Дальнейшая обработка и сравнение двух сигналов после регистрации собранного приемным объективом излучения дает меру интегрального содержания газа вдоль оптического пути [6].

По результатам данных зондирования формируется перечень обнаруженных концентраций углеводородов в приземном слое с привязкой к местности, указывающий на наиболее вероятное расположение месторождения.

Для разработки технических и адаптационных требований к аппаратуре лидара предложен математический аппарат, описывающий трассу прохождения лазерного луча. Лидарное уравнение для рассеяния, описывающее основные принципы лазерного зондирования приземного слоя, имеет вид [7]

$$P_\lambda(R) = P_0 \cdot \eta \cdot c \cdot \tau \cdot A(R) \cdot \frac{\beta_\lambda(R)}{R^2} \cdot e^{-2\int_0^R \alpha_\lambda(x)dx}, \quad (1)$$

где R – расстояние до рассеивающего объема (м); $P_\lambda(R)$ – мощность рассеянного излучения, Вт; $\beta_\lambda(R)$ – объемный коэффициент обратного рассеяния атмосферы; $\alpha_\lambda(x)$ – объемный коэффициент ослабления (экстинкции) атмосферы; c – скорость света, м/с; τ – длительность лазерного импульса, с; P_0 – мощность лазера (Вт); η – числовое значение КПД приемника; $A(R)$ – эффективная площадь приемника, м^2.

Объемный коэффициент обратного рассеяния атмосферы определяется суммой вкладов от газовой составляющей атмосферы и от содержащихся в ней частиц:

$$\beta_\lambda(R) = \beta_a + \beta_b, \quad (2)$$

где β_a – коэффициент рассеяния на газах; β_b – коэффициент рассеяния на частицах.

Коэффициенты обратного рассеяния атмосферы можно рассчитать с использованием конкретной модели атмосферы [8]. Для корректной оценки пропускания лазерного излучения атмосферой необходимо иметь информацию о физических и оптических моделях атмосферы.

По мнению авторов, одной из наиболее полных для решения задач дистанционного зондирования в данной области исследований представляется физическая модель атмосферы, разработанная в Институте оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН [9]. В ней, кроме профилей температуры, давления, концентрации H_2O и O_3 для различных климатических зон содержится информация о высотном распределении CO_2, CO, CH_4, N_2O, NO, NO_2, а также сведения об их стандартных отклонениях для различных высот.

Ввиду того, что разрабатываемый комплекс предполагается устанавливать на летательный пилотируемый или беспилотный аппарат, в целях экономии массы и электроэнергии предложено использовать два гелий-неоновых лазера с низкими мощностями (до 1 Вт). Для компенсации низких мощностей в состав аппаратуры вводится многокаскадный усилитель для усиления принятого на приемный элемент сигнала.

Моделирование трассы лидара. С целью модернизации и определения адекватности представления результатов выбранного представления трассы, разработана математическая модель и проведено моделирование трассы прохождения светового пучка в пакете прикладных программ Matlab.

Согласно [10], коэффициент плотности взвешенных частиц воды в атмосфере для различных погодных условий составляет от 0 до 0,128 (от чистого воздуха до плотного тумана соответственно). Варьируя величиной R, с шагом в 1 м и коэффициентом плотности взвешенных частиц в соответствии с вышеуказанной информацией, были получены предварительные результаты моделирования замеров предельно малых концентраций углеводородов в приземном слое (см. рисунок).

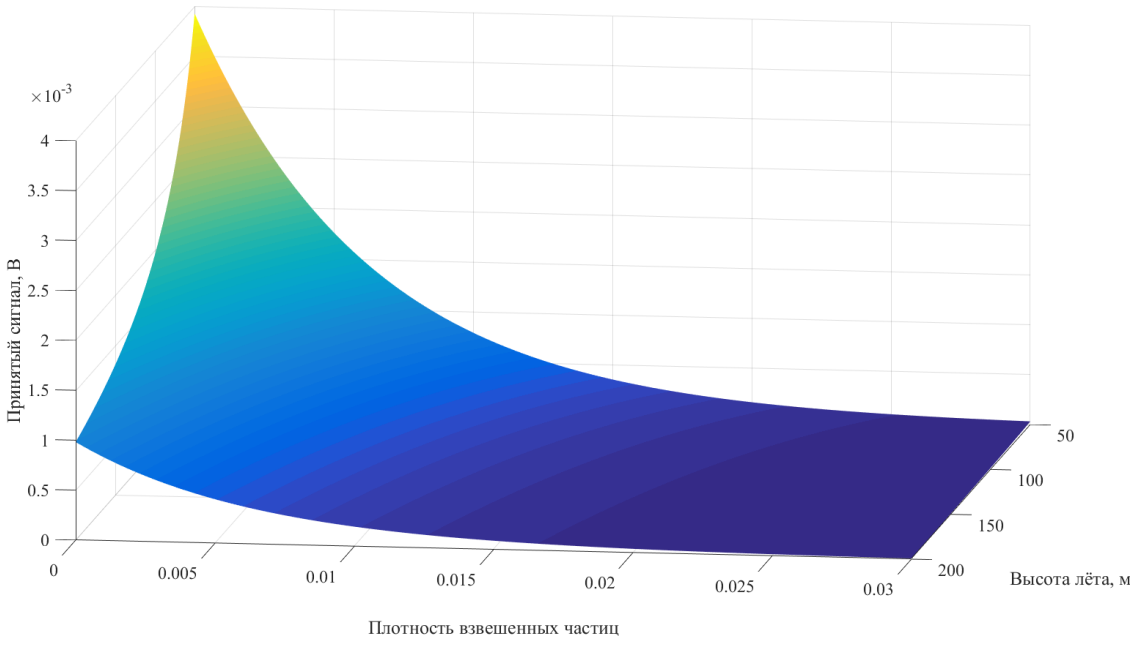


Рисунок. Результаты моделирования трассы лидара

Предварительные результаты анализа полученного сигнала показывают, что обработка сигнала с высотой лета аппарата от 150 до 200 м возможна только при ясной погоде (плотность взвешенных частиц должна составлять не более 0,005). При высоте лета не более 100 м допускается применение лидара в дымке, при более высоких плотностях использование разрабатываемого комплекса является нецелесообразным ввиду невозможности обработки принятого сигнала.

При этом необходимо учитывать, что частотные характеристики усилителя вносят искажения в форму сигнала, и всякий раз, когда возникает собственный шум усилителя, он приводит к случайным возмущениям на выходе. Исходя из этого, в дальнейшем необходима проработка вопроса о разработке аппаратуры, устойчивой к большинству помех, возникающих при проведении замеров в составе летательных аппаратов (например, помеха по питанию).

Заключение. Изложенный в статье подход к определению предельно малых концентраций природного газа подразумевает создание эффективного программно-аппаратного комплекса, позволяющего локализовать с топологической привязкой к местности предполагаемые месторождения нефти и газа с достаточно высокой точностью. При этом предложенная математическая модель трассы лидара и применяемый метод дифференциального поглощения позволяют сформировать основные технические требования, определить условия эксплуатации и разработать аппаратуру для поиска предельных концентраций газа.

Список литературы

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

2. Heba S. Marey, Sattelite Remote Sensing of Air Quality in the Oul Sands Region // University of Alberta. 2014. 112 p.

3. Michael Wojcik, Blake Crowther, Robert Lemon Development of Differential Absorption Lidar (DIAL) for Detection of CO2, CH4 and PM in Alberta // Chemical and Biological Sensing Technologies XII. 2015. 212 p.

4. Jarett Bartholomew, Philip Lyman, Carl Weimer and Lyle Ruppert, Airborne Active Sensing for Pipeline Leak Survey // AIAA SciTech Forum. 2017.

5. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.

6. Oleg Nepomnyashcy, Evgeny Veicov, Vladimir Kopilov, Vitalii Khabarov, Dmitry Popov The LIDAR Technology and Earth Remote Sensing for Small Space Vehicles // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. P. 306–311.

7. Попов Д.В. Математическая модель дистанционного зондирования атмосферы для определения малых концентраций углеводородов // Наукоемкие технологии. 2016. С. 48–51.

8. Непомнящий О.В., Тэн С.Ф., Хабаров В.А. Математическое и аппаратное обеспечение комплекса геофизических исследований для дистанционного, авиационного зондирования земной поверхности // Авиакосмическое приборостроение. 2011. С. 38–43.

9. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 256 с.

10. Roberto Nebuloni Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog // Applied Optics. 2005. P. 3795–3804.

УДК 004.932, 517.443

М.В. Носков[1], В.С. Тутатчиков[1],
М.П. Лапчик[2], М.И. Рагулина[2]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия
e-mail: mvnoskov@yandex.ru, vtutatchikov@mail.ru,
lapchik@omsk.edu, lapchik@omsk.edu

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АНАЛОГА АЛГОРИТМА КУЛИ – ТЬЮКИ ДВУМЕРНОГО БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В современных системах дистанционного зондирования Земли широкое распространение получило двумерное быстрое преобразование Фурье (БПФ) для обработки космоснимков и последующей фильтрации изображений. Рассмотрим подробнее двумерный аналог алгоритма Кули – Тьюки вычисления БПФ и его параллельную реализацию на примере снимка поверхности Красноярска и его окрестностей.

Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, цифровая обработка сигналов.

Введение. В настоящее время дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) тесно связано с цифровой обработкой изображений, так как получаемые аэрокосмические снимки представлены в цифровой форме в виде растровых изображений. Для улучшения изображений обычно применяют изменение яркости и контрастности, пространственную фильтрацию, преобразование Фурье и последующую частотную фильтрациюм[1]. Традиционно применяемый алгоритм вычисления двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) представляет собой последовательное применение одномерного БПФ сначала для всех строк, затем для всех столбцов. В статье рассмотрен вариант применения аналога алгоритма Кули – Тьюки вычисления двумерного БПФ, в котором уменьшено число комплексных операций по сравнению с традиционно применяемым алгоритмом, показан вариант распараллеливания этого алгоритма для ускорения вычислений, а также приводятся примеры обработки изображений указанным алгоритмом.

Процедура фильтрации состоит из нескольких этапов:

- чтение данных и перестановка;
- параллельный вариант вычисления алгоритма Кули – Тьюки;
- применение фильтров к полученному преобразованию Фурье;
- вычисление обратного БПФ;
- получение изображения.

Подробнее этапы описаны в [1]. Двумерный аналог алгоритма Кулис– Тьюки дается в [2], его многомерный вариант – в [3], более подробное описание алгоритма – в [4]. Здесь приведем параллельный двумерный вариант алгоритма Кули – Тьюки.

Параллельный алгоритм Кули – Тьюки. Для тестирования времени работы алгоритма вычисления двумерного преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули – Тьюки была написана программа на языке программирования C++ [4]. Распараллеливание алгоритма производилось в двух вариантах: для систем с общей памятью при

© Носков М.В., Тутатчиков В.С., Лапчик М.П., Рагулина М.И., 2018

помощи библиотеки OpenMP и систем с распределенной памятью с библиотекой MPI. Тестирование проводилось на узле кластера суперкомпьютера СФУ с IBM HS21 XM Xeon Quad core E5450 3.0 GHz, 64 Gb ОЗУ. В случае с распределенной памятью тестирование проводилось на нескольких узлах.

Двумерный аналог алгоритма Кули – Тьюки обрабатывает сигнал с числом отсчетов $2^s \times 2^s$ за s итераций. При этом в первой итерации за счет предварительной перестановки элементов данные сигнала разбиваются на четверки связанных (по вертикали и горизонтали) элементов, отстоящих друг от друга на один элемент; во второй итерации – на четверки элементов, отстоящих друг от друга на два элемента; в третьей – на 2^2 элемента; в последней *s*-й итерации – на 2^{s-1} элемента. При такой реализации алгоритма распараллеливание в системе с общей памятью производится за счет разбиения массива данных в каждой итерации на наборы связанных между собой наборов элементов для каждого отдельного потока. В системе с распределенной памятью происходит аналогичное разбиение на наборы связанных данных в каждой итерации и последующая пересылка данных между процессами для независимых вычислений.

Результат тестирования для системы с распределенной памятью на одном узле кластера представлен в таблице.

Таблица

Результат тестирования двумерного параллельного аналога алгоритма Кули – Тьюки в системе с распределенной памятью, с

Размер	Число процессов	2D БПФ по строкам и столбцам	2D БПФ Кули-Тьюки
1 024×1 024	1	0,490	0,310
	2	0,310	0,310
	4	0,220	0,270
	8	0,180	0,270
	16	0,180	0,350
2 048×2 048	1	2,300	1,330
	2	1,550	1,260
	4	1,060	0,950
	8	0,840	0,850
	16	0,850	1,000
4 096×4 096	1	9,880	5,850
	2	6,240	4,590
	4	4,370	3,590
	8	3,430	3,060
	16	3,740	3,390
8 192×8 192	1	43,210	25,190
	2	26,990	19,160
	4	18,550	14,870
	8	14,520	13,130
	16	14,090	11,700

Наглядно данные представлены на рис. 1, где алгоритм БПФ по строкам и столбцам обозначен БПФ СС, аналог алгоритма Кули – Тьюки – БПФ КТ.

Фильтрация изображений. В качестве тестового сигнала использовался снимок Красноярска и его окрестностей со спутника LandSat-8 от 07.04.2016 [5] на рис. 1, *а*. Исходное разрешение снимка составляет 8 081×8 171 пикселей, оно было преобразовано до ближайшей степени двойки: 2^{13} = 8 192, а затем масштабировано для степеней 10–15. На рис. 2, *б* представлен результат высокочастотной фильтрации изображения. В данном случае более контрастно заметны контуры: река, границы скалистых участков.

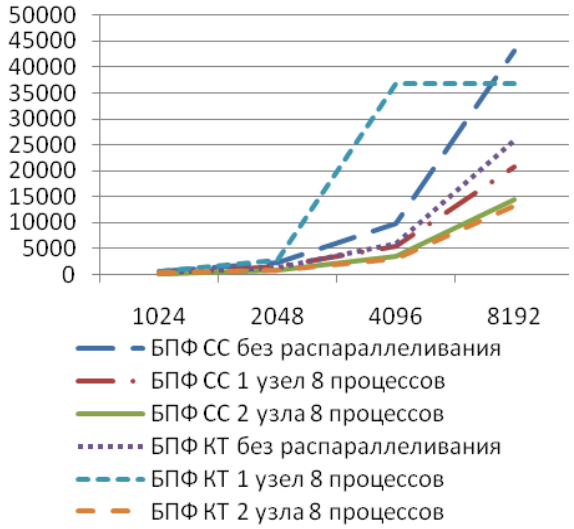
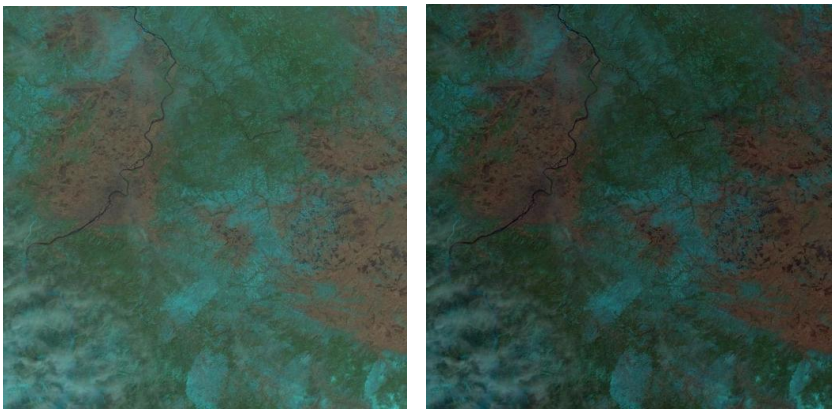


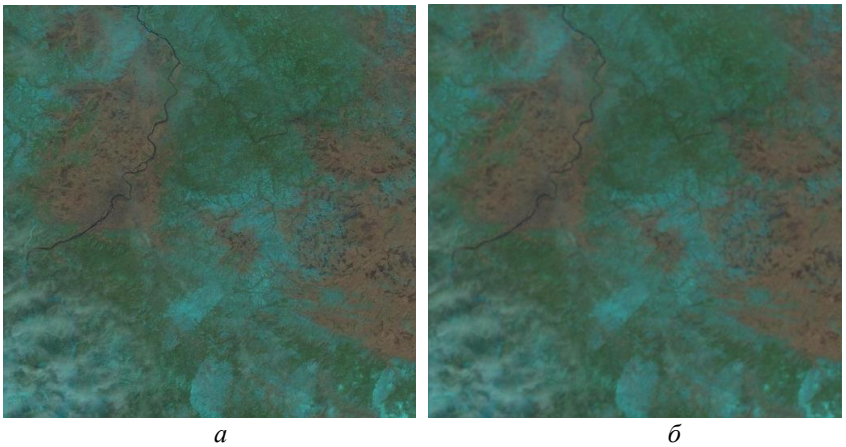
Рис. 1. Сравнение времени работы различных алгоритмов



а *б*

Рис. 2. Исходное изображение (*а*) и результат высокочастотной фильтрации (*б*)

На рис. 3, *а* показано исходное изображение, на рис. 3, б – результат низкочастотной фильтрации. В данном случае небольшие резкие изменения гористой местности не так заметны на общем фоне, т.е. убраны мелкие детали.



а *б*

Рис. 3. Исходное изображение (*а*) и результат высокочастотной фильтрации (*б*) (без деталей)

Заключение. В статье показано, что параллельный аналог алгоритма Кули – Тьюки вычисления двумерного БПФ выполняется в среднем в четыре раза быстрее стандартного способа вычисления двумерного быстрого преобразования Фурье по строкам и столбцам.

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М: Техносфера, 2012. 1104 с.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 448 с.
3. Tutatchikov V.S. Kiselev, O.I., Noskov M.V. Calculating the n-Dimensional Fast Fourier Transform // Pattern Recognition and Image Analysis. 2013. Vol. 23, № 3. P. 429–433.
4. Tutatchikov V.S. Two-dimensional fast Fourier transform // Proceeding of 11th International Forum on Strategic Technology. 2016. P. 495–498.
5. Снимок Красноярска и его окрестностей от 07.04.2016 URL: http://earthexplorer.usgs.gov/.
6. Суперкомпьютерный комплекс СФУ. URL: http://cluster.sfu-kras.ru/.

УДК 004.932

А.И. Пахирка, А.Г. Зотин, М.В. Дамов

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
e-mail: pahirka@sibsau.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТАЛИЗИРОВАННОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ АЭРОФОТОСНИМКОВ

Рассмотрен подход к формированию панорамных снимков, представляющих детализированные изображения местности. Для получения панорамных изображений высокого качества требуется специализированное оборудование и по возможности максимальная высота съемки. Эти факторы можно исключить, если использовать сшивку изображений, получаемых с камер, расположенных на недорогих беспилотных летательных аппаратах – квадрокоптерах.

Ключевые слова: детекторы особых точек, FAST, SURF, панорамный аэрофотоснимок.

В настоящее время широко распространены беспилотные летательные аппараты (БПЛА) различного назначения, например, квадрокоптеры и другие дроны, которые активно используются для съемки на малых и сверхмалых высотах. Такие БПЛА находят применение при репортажной съемке, а также в сфере удаленного мониторинга объектов, обследовании сооружений и оценке состояния земель. При выполнении подобных работ актуальной задачей является создание высоко детализированных панорамных снимков с изображением местности или объекта. Однако зачастую такие снимки невозможно получить в виде цельной фотографии [1].

Создание композитного снимка из последовательных изображений, полученных с БПЛА, является частным случаем построения панорамного снимка из набора произвольных изображений. В соответствии с условиями задачи необходимо построить последовательность планарных изображений, учитывая траекторию полета БПЛА. Линейка БПЛА представляет широкий класс устройств с различными летными и нагрузочными характеристиками, причем чем ниже такие характеристики, тем БПЛА более подвержен влиянию воздушных потоков, что приводит к наличию размытых кадров из-за сложных условий съемки. Напротив, бюджетная легковесная съемочная аппаратура означает получение изображений низкого разрешения.

© Пахирка А.И., Зотин А.Г., Дамов М.В., 2018

Сведения о траектории полета БПЛА позволяют определить, какие изображения должны быть задействованы на текущем этапе создания панорамного снимка (рис. 1). На этом этапе выполняется построение графа пронумерованных изображений, при этом используются все имеющиеся соседние изображения. Такая процедура позволяет избавиться от дорогостоящего сопоставления случайных пар неотсортированных изображений [2].

Совмещение изображений, которые в общем случае получены при различных углах наклона камеры, является одной из основных процедур создания панорамного снимка. Известны два основных подхода: непосредственное совмещение изображений и совмещение с использованием точечных дескрипторов [3]. Считается, что первый подход обеспечивает большую точность совмещения, однако имеет ограничения по параметрам съемки (они должны быть практически такими же, как параметры съемки исходного снимка). Более общим является подход на основе точечных дескрипторов SURF, FAST, FAST-ER [4].

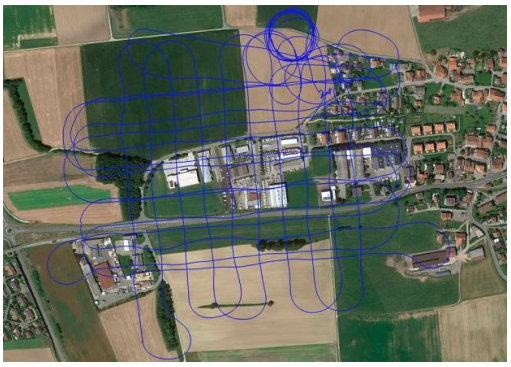
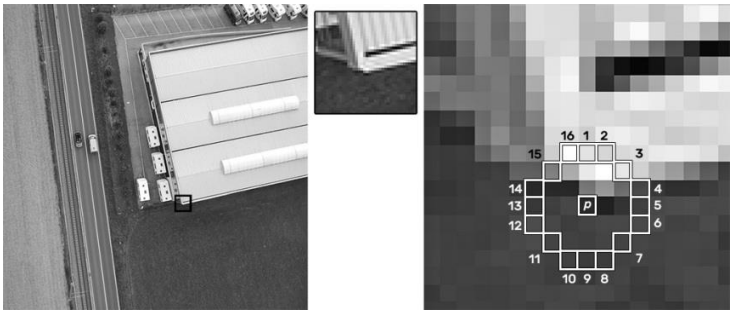


Рис. 1. Траектория движения БПЛА на Google Maps

В данной работе параллельно рассчитываются быстрые дескрипторы FAST и FAST-ER [5], предназначенные для обнаружения углов, и дескриптор SURF, учитывающий фактор масштабирования. Данные алгоритмы применяются для решения проблемы вычислительной сложности слияния изображений. В дескрипторе FAST происходит проверка пиксела p на то, является ли он углом, осуществляется сравнением значения его яркости со значениями яркостей 16 пикселов $\{x_1, x_2, \ldots, x_{16}\}$ с радиусом 3 вокруг проверяемого пиксела p (рис. 2).



а *б* *в*

Рис. 2. Нахождение углов: *а* – исходное изображение;
б – увеличенный фрагмент; *в* – детектор FAST

Для ускорения работы алгоритма вначале рассматриваются пикселы с номерами 1, 5, 9 и 13. Если, по крайней мере, три из четырех пикселов удовлетворяют пороговому критерию, то пиксел p считается углом. Если хотя бы три из четырех значений находятся ниже порогового значения $I_p + T_{FAST}$, то пиксел p не является точкой интереса и отбрасывается. В противном случае проверяются все 16 значений окружающих пикселов в виде вектора $S_{p \to x}$, принимающего соответственно темное, подобное и светлое значения в соответствии с выражением (1)

$$S_{p\to x}=\begin{cases} d, & I_{p\to x}\le I_p - T_{FAST} \\ s, & I_p - T_{FAST} < I_{p\to x} < I_p + T_{FAST} \\ b, & I_p + T_{FAST} \le I_{p\to x} \end{cases}, \quad (1)$$

где I_x – яркость пиксела на окружности вокруг проверяемого пикселя; I_p – яркость проверяемого пикселя; T_{FAST} – пороговое значение для дескриптора FAST, например, 20 % значения яркости.

Далее строятся подмножества P_d, P_s, P_b и определяется переменная K_p, которая в соответствии с классификатором дерева решений определяет, является ли проверяемый пиксел углом или нет. Для снижения влияния шумов на результат работы алгоритма перед его применением рекомендуется произвести размытие изображения фильтром Гаусса.

На рис. 3 представлен пример обнаружения особых точек на изображении с применением алгоритмов FAST, FAST-ER и SURF.

а *б* *в*

Рис. 3. Нахождение особых точек: *а* – алгоритм FAST;
б – алгоритм FAST-ER; *в* – алгоритм SURF

Бесшовное смешивание изображений, как правило, является необходимым после построения панорамного снимка в связи с возникающими локальными артефактами освещенности, рассогласования текстурной мозаики и т.д. Известны четыре категории методов, а именно: дискретные цветовые методы, методы на основе построения пирамиды изображений, градиентные методы и многополосное смешивание. Многополосное смешивание относится к высокоэффективным, но наиболее затратным методам устранения артефактов сшивки. Результатом многополосного смешивания является суммирование изображений по всем поддиапазонам.

Для проведения экспериментов использовался набор изображений Swiss dataset [6], полученный дроном eBee RTK, имеющим следующие характеристики: масштаб: 4 см/px, область: 0,18 км^2, высота полета: 169 м, число изображений 32. Пример создания панорамного аэрофотоснимка на основе многополосного смешивания для набора из 32 изображений представлен на рис. 4.

Заключение. Применение алгоритмов FAST и FAST-ER позволяет организовать сопоставление изображений (с разрешением до 1 920×1 080 пикселов) для формирования панорамного снимка в реальном режиме времени, а слияние изображений с применением технологии многополосного смешивания обеспечивает качественную визуализацию в местах сшивки. Основным недостатком рассмотренных алгоритмов является использование в расчетах яркостной составляющей пиксела, что может приводить к некорректным результатам сшивки при наличии на изображениях областей с повышенной яркостью или больших фрагментов, содержащих блики.

а *б*

Рис. 4. Панорамный аэрофотоснимок в сравнении с изображением Google Maps:
а – панорамный аэрофотоснимок: *б* – изображение с Google Maps

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-07-00121 А.

Список литературы

1. Bold S., Sosorbaram B., Lee S.R. Implementation of Autonomous Unmanned Aerial Vehicle with Moving-Object Detection and Face Recognition // Information Science and Applications (ICISA). 2016. Vol. 376. P. 361–370.

2. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints // In Computer Vision (ICCV), IEEE International Conference. 2011. P. 2548–2555.

3. Зотин А.Г., Пахирка А.И., Дамов М.В. Сравнение алгоритмов получения точечных особенностей для системы сопоставления кадров видеопоследовательности // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV Междунар. науч. конф. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. С. 112-115.

4. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski // Computer Vision (ICCV), IEEE International Conference. 2011. P. 2564–2571.

5. Video completion in digital stabilization task using pseudo-panoramic technique / M.N. Favorskaya, V.V. Buryachenko, A.G. Zotin, A.I. Pakhirka // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W4. 2017. P. 83–90.

6. Example Datasets. URL: https://www.sensefly.com/drones/example-datasets.html.

УДК 004.932.2

Д.А. Перфильев

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: perfilyev7775@yandex.ru

СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЪЕКТА НА ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Предложена стратегия сегментации объекта на изображении, основанная на восходящих и нисходящих процессах формирования правила сегментации. В восходящем режиме сегментации предлагается использовать функционально-параметрический признак ξ_r, позволяющий представить особенность формы границы области, выделенной на основе значения градиента: $\nabla f(a)$ от яркости. Анализ особенности дополнения области позволяет сформировать классы объектов. Для оценки однородности классов формируется правило сегментации на основе нисходящего анализа, плотности ξ_r.

Ключевые слова: сегментация свойств, правило сегментации, стратегия сегментации.

© Перфильев Д.А., 2018

Введение. Задача сегментации – ключевая среди задач анализа и интерпретации изображения [1–4]. Многогранность задачи определяется рядом аспектов, основными из которых являются:

- цель интерпретации (область изображения или свойства объекта);
- физическая особенность отображения феноменологических свойств в модели изображения.

Для детерминированной модели решением задачи сегментации функции $f(a)$ является разбиение изображения P на $S = \{s_1, s_2, ..., s_\kappa\}$, непустых связных областей, для которых правило LP принимает истинные значения тогда и только тогда, когда любая пара элементов из любого подмножества $s_i \in S$ удовлетворяет цели интерпретатора.

В альтернативных условиях цель ограничивается оценкой динамики плотности распределения флуктуации свойств.

В общем случае сегментацию можно рассматривать как

$$\text{Seg: } f(a) \xrightarrow{Lp} S^{(Sem)},$$

где $S^{(Sem)}$ – семантические отношения.

В частности $s_i^{(Sem.)}$ – имя области $s_i \in S$, а $LP(s_i^{Sem})$ – указание на модель «соседства».

В работах [5–7] выделены основные формы синтаксических отношений соседства характерные для области изображения.

Для модели «Область» изображения $|s_i|>1$ [5]:

$$s_{10} = < P_i, \{b_i\}^1 \cup \{b_1–b_3, b_5\}^2 >,$$

где b_i^1 – признак области s_i включающей подмножество P_i; $b_1^2–b_3^2$, b_5^2– возможные отношения соседства граничных элементов области.

Удовлетворительный результат сегментации при заданном множестве S является идеальным случаем и подходит для «классического» синтаксиса детерминированного отображения вида:

1) модель позволяет априори задать значение иконической функции $f(a)$ для области «Фон». Область «Фон» заполняет все изображение, в котором расположены области S, представляющие свойства объекта. Область «Фон» определяется наиболее контрастным значением яркости относительно сегментируемых областей, обычно близким к максимальному (минимальному) значению;

2) сегментированные области s_i имеют отличия по унарным признакам (обычно по градиенту: $\nabla f(a)$) и соседству, также справедливо относительно области «Фон», т.е. области имеют границу в виде замкнутого внешнего и возможно внутреннего контуров.

В детерминированных условиях работа правила LP представляет собой комплексную оценку «расстояния» (близости) $\nabla f(a)$ текущего $p_i \in P$ и соседства (смежности) некоторого $p_j \in s_i$ вида

$$|p_i: \nabla f(a) – s_i| \to min., \text{ и } p_i \cap p_j=1, \text{ где } p_j \in s_i. \quad (1)$$

Так, всякий текущий $p_i \in P$ относится только к одной, некоторой области $s_i \in S$. Следовательно, сегментация выполняется на основе однородности и связности p_i.

Вне идеальных условий отображения свойств объекта возникают закономерные нарушения формы сегментированных областей за счет искажений в виде незаконченных, ложных, утолщенных контуров, «наложения» областей и иных известных ошибок [1; 8; 9].

Один из способов борьбы с ошибками является модернизация правила (1) семантической составляющей как настраиваемого «радиуса», что позволяет улучшить качество сегментации. Такое правило имеет следующий вид

$$|p_i: \nabla f(a) - LP(s_i^{Sem})| < r_i^{Sem} \text{ и } p_i \cap p_j = 1, \text{ где } p_j \in s_i, \quad (2)$$

где r_i^{Sem} – радиус однородности для s_i^{Sem}.

Так, оценка однородности класса, может быть изменена в процессе сегментации [10; 11] путем изменения r_i^{Sem} относительно анализа однородности смежных классов. Кроме этого, может быть выполнена корректировка мощности S на основе анализа однородности s_i^{Sem} и мощности области «фон».

Использование принципа адаптации (2), с одной стороны, улучшает качество, с другой – закономерно ограничивает возможности применения правила $LP(s_i^{Sem})$ для работы систем анализа изображений с иными свойствами и в иных физических условиях отображения. Причем $LP(s_i^{Sem})$ обычно представляет собой априорные знания [8–15], основанные на иконической информации, что ограничивает практическое использование формализации [1–4] в решении задачи интерпретации.

Сегментация. Предлагаемая в статье концепция сегментации основывается на предположении о семантической скудности отношений соседства [5] предоставляемых иконическим уровнем цифровой матрицы изображения, применение которой приводит к традиционным ошибкам. Поэтому полагается, что влияние ошибки и цели сегментации минимизируется при переходе к более сложной семантической модели отношений соседства характерных феноменологии объекта.

В качестве содержания отношения соседства b_i^2 предлагается использовать один из функционально-параметрических признаков [1]

$$\xi_r = r_i / r_{\max},$$

где r_i – текущие расстояние от центра тяжести области до граничного пикселя; $r_{\max}$ – максимальное расстояние от центра тяжести области до граничного пикселя.

Характеристика функции ξ_r позволяет оценить топологическую особенность формы выпуклости области рисунка.

В качестве унарного признака граничных пикселей используется значение $\nabla f(a)$ как правила выполнения низкоуровневой сегментации области на изображении. Следовательно, в качестве правила высокоуровневой сегментации такой признак, как выпуклость формы области.

Эксперимент. Целью эксперимента является сегментация части изображения, представляющей феноменологию объекта. В качестве данных эксперимента использовались эталонные микроструктурные металлографические изображения деформируемого алюминиевого сплава АМг6, удовлетворяющие условиям детерминированной модели.

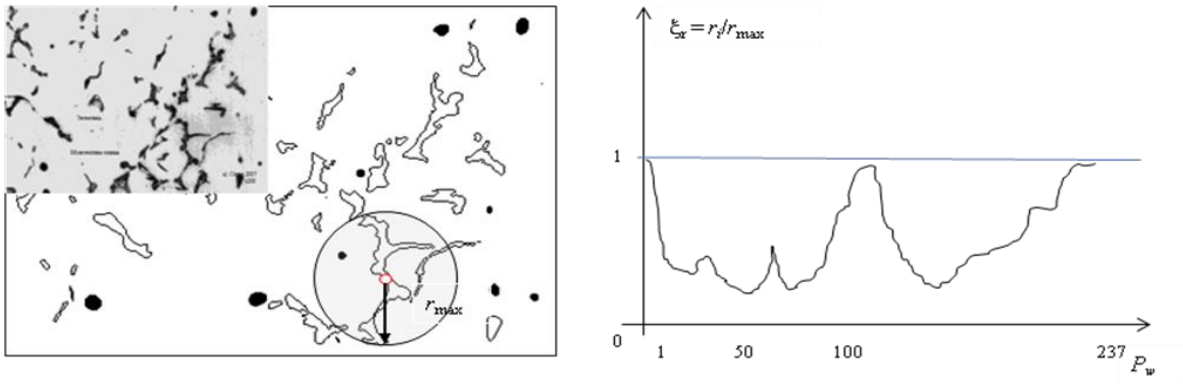


Рисунок. Функционально-параметрическая оценка эвтектики, расположенной вблизи микротрещины

На восходящем этапе сегментации использовался метод пространственного дифференцирования. В автоматическом режиме выполнялось выделение областей относительно оценки функции ξ_r и связности пикселей соответствующей модели «Область» (b_4^2). В результате низкоуровневой сегментации были формированы цепочки (подмножества) граничных пикселей $P_w \in s_i$ с характерным значением $\nabla f(a)$.

В задачу нисходящей сегментации входила выработка принципа определения оптимального радиуса правила $LP(s_i^{Sem})$ с целью сегментации части изображения с характерной однородностью свойства объекта. В результате оценка плотности амплитудной характеристики (изрезанности границы) позволило сформировать классы областей изображения с характерными свойствами.

Так, комбинированное правило сегментации имеет следующий вид:

$$\left| s_i(b_4^2)\colon P(\xi_r) - LP\,(s_i^{Sem}) \right| < r_i^{Sem} \qquad (3)$$

где r_i^{Sem} – радиус свойства позволяющий интерпретировать объект.

Оценка r_i^{Sem} может быть изменена в процессе сегментации за счет анализа ξ_r и относительно оценки однородности смежных классов.

Заключение. Предлагается математическая постановка задачи сегментации, учитывающая относительно более сложную модель соседства, выраженную функцией $P(\xi_r)$.

Пусть задано $s_i(b_i^2)$ – множество отношений соседства компонент плоскости изображения (модели), признаки которых отображены некоторой функцией $P(\xi_r)$, а также предикат $LP(s_i^{Sem})$, определяющий радиус однородности r_i^{Sem}.

Для детерминированной модели решением задачи сегментации является разбиение s_i на N классов, для которых $LP(s_i^{Sem})$ принимает истинные значения, удовлетворяющие цели.

В этом случае сегментацию объекта можно рассматривать как комбинированную стратегию

$$\text{Seg: } \nabla f(a) \xrightarrow{Lp(s_i^{sem})} n_i^{(Sem)},$$

где $n_i^{(Sem)} \in N$ – семантическое отношение (имя объекта), определенное при анализе однородности границы области.

Предполагается, что синтаксис правила (3) будет дополнен оценкой компактности области и геометрическими измерениями концентрации классов. Это позволит не только сегментировать область изображения с целевыми свойствами, но и анализировать влияние контекста.

Список литературы

1. Денисов Д.А. Компьютерные методы анализа видеоинформации: монография. Красноярск, 1993. 192 с.

2. Денисов Д.А., Дудкин А.К., Пяткин В.П. Структурные методы описания объектов изображений: препринт. Новосибирск, 1988. 35 с.

3. Борисенко В.И., Златопольский А.А., Мучник И.Б. Сегментация изображений (состояние проблемы) // Автоматика и телемеханика. 1987. № 7. С. 3–56.

4. Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Варновицкий И.Э. Сегментация изображений: методы пороговой обработки // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С. 54–61

5. Перфильев Д.А. Классификация сегментов металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов // Вестн. СибГАУ. 2007. № 1 (14). С. 118–122.

6. Харинов М.В. Модель локализации объектов на цифровом изображении // Вестн. Бурят. гос. ун-та (Улан-Удэ). 2013. № 9. С. 182–189.

7. Чочиа П.А. Пирамидальный алгоритм сегментации изображений // Информационные процессы. 2010. Т. 10, № 1. С. 23–35.

8. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: в 2 т. М.: Мир, 1982. 790 с.

9. Яншин В.В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. М.: Машиностроение, 1994. 112 с.

10. Коулмен Г.Б., Эндрюс Х.С. Сегментация изображений при помощи автоматической классификации // ТИИЭР. 1979. № 5. С. 82–97.

11. Brian L. DeCost, Elizabeth A. Holm A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data // Computational Materials Science 110. 2015. P. 126–133.

12. Khodaskar A., Ladhake S. Semantic Image Analysis for Intelligent Image Retrieval International Conference on Intelligent // Computing, Communication & Convergence (ICCC-2014) Institute of Management and Technology. India. 2014. P. 193–197.

13. S. Banerjee S.K. Ghosh S. Datta S.K. Saha Segmentation of dual phase steel micrograph: An automated approach // Measurement. 2013. P. 2435–2440.

14. Combined in situ X-ray radiographic observations and post-solidification metallographic characterisation of eutectic transformations in Al–Cu alloy systems / A.G. Murphy, D.J. Browne, W.U. Mirihanage, R.H. Mathiesen // Acta materialia 2013. № 61. P. 4559–4571.

15. Effect of solution heat treatment on the internal architecture and compressive strength of an AlMg4.7Si8 alloy / D. Tolnai, G. Requena, P. Cloetens [et al.] // Materials Science & Engineering A 585. 2013. P. 480–487.

УДК 537.86

В.Г. Подопригора[1, 2], А.В. Сорокин[2, 3]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия
[3]Сибирский государственный университет наук
и технологий имени М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
e-mail: podoprigora46@gmail.com; sorav@iph.krasn.ru

СТАТИСТИКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНОГО ПОКРОВА, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО СО СПУТНИКОВЫМИ СИГНАЛАМИ L-ДИАПАЗОНА

Исследовано ослабление и рассеяние сигналов навигационных спутников в диапазоне частот 1,2–1,6 ГГц в лесном массиве. Предложена электрофизическая модель леса, устанавливающая связь между биометрическими свойствами лесных покровов и характеристиками радиоизлучения. Измеренные значения коэффициента погонного ослабления удовлетворительно согласуются с расчетными.

Ключевые слова: сигналы спутников, лесной массив, электрофизические параметры, коэффициент ослабления, сечение рассеяния.

В настоящее время все большую актуальность приобретает мониторинг лесных покровов земли с помощью технологий космического зондирования в СВЧ-диапазоне радиоволн. Для определения состояния лесных массивов необходимо решить обратную задачу, основанную на установлении функциональных и статистических зависимостей между электрофизическими параметрами леса и принимаемых радиосигналов. Нахождение связи биометрических и лесотаксационных свойств лесного покрова с характеристиками спутникового радиоизлучения возможно на базе построения соответствующей электрофизической модели леса.

© Подопригора В.Г., Сорокин А.В., 2018

Для описания ослабления, рассеяния и поглощения радиоизлучения растительными покровами используются модели растительности в виде сплошной среды и дискретной совокупности объектов (см. например, $[1-3]$). Применение этих с моделей диктуется условиями малости размеров элементов леса по сравнению с длиной λ радиоволн. В наиболее общей дискретной модели часто используются классические приближения Рэлея – Ганса (РГ) и точечных диполей – для очень малых частиц и аномальной дифракции (АД) – для достаточно больших рассеивателей. В СВЧ-диапазоне размеры элементов растений соизмеримы с длиной электромагнитной волны ($\lambda \approx 1$ – 30 см), поэтому вычисление сечений ослабления σ_o, рассеяния σ_p и поглощения $\sigma_п$ должно проводиться на основе дифракционных моделей, учитывающих форму и размеры элементов. Строгого решения дифракционной задачи для дисков и полос (листья), цилиндров (стволы, ветви, иглы) не существует, поэтому основные характеристики древостоя могут быть найдены только при некоторых допущениях.

В настоящей работе предложена модель леса, описывающая совокупность крон как систему квазисферических «капсул» радиусом R, расположенных хаотически в воздушной матрице и имеющих различную (в зависимости от породы деревьев) внутреннюю структуру расположения ветвей. Поскольку для крон в дециметровом диапазоне волн величина $kR = \dfrac{2\pi}{\lambda} R >> 1$ при R = 1,5–2,0 м, а относительный показатель преломления кроны близок к единице, для расчета сечений рассеяния было использовано приближение АД.

Для вычисления сечений ослабления и рассеяния на стволах и толстых ветвях были использованы выражения, полученные в [2; 3] из решения дифракционной задачи для бесконечных круговых цилиндров. Они представляются в виде рядов, содержащих функции Бесселя и Ханкеля. Расчет сечения σ_o и σ_p показывают, что эффекты резонансного взаимодействия радиоволн L-диапазона со стволами и ветвями весьма значительный. Совокупность стволов представлена статическим ансамблем, характеризующимся нормальным распределением параметров деревьев (высот, диаметров, расстояний между ними). Среднюю ориентацию толстых ветвей, вносящих вклад в величину сечения рассеяния, описывает параметр порядка $[4]$, определяемый через косинусы углов наклона веток относительно вертикали.

Эффекты множественного рассеяния в лесном массиве учитывались при расчете дифференциального сечения рассеяния $\left(\dfrac{d\sigma_p}{d\Omega}\right)_N$ системы N сфер, которое может быть записано в виде

$$\left(\frac{d\sigma_p}{d\Omega}\right)_N = N\left\{\frac{d\sigma_p}{d\Omega}\left[1 + N_v \cdot g\left(k_p, \eta, R\right)\right]\right\} = N\,\frac{d\sigma_p^{эф}}{d\Omega}, \qquad (1)$$

где Ω – телесный угол; N_v – средняя плотность сфер; $g(k_p, \eta, R)$ – Фурье образ радиальной функции распределения, зависящей от волнового вектора рассеяния k_p, радиуса сфер R; объtма занимаемого сферами крон $\eta = N_v \cdot \left(\dfrac{4}{3}\pi R^3\right)$; $\dfrac{d\sigma^{эф}}{d\Omega}$ – эффективное дифференциальное сечение рассеяния. Выражение (1) состоит из двух частей: 1) дифференциального сечения рассеяния изолированной сферы, умноженной на N; 2) корреляционного члена $N_v g \dfrac{d\sigma_p}{d\Omega} \cdot N$, зависящего от разности фаз между рассеянными по-

лями и положения сфер в ансамбле. Наиболее реалистической формой учета корреляционных эффектов в рассеянии является корреляционная функция, предложенная в работе [5] и пригодная для описания сред с высокой концентрацией частиц.

Расчитанные по формуле (1) зависимости $d\sigma_p / d\Omega$ от угла рассеяния при разных концентрациях деревьев η показывают, что эффекты множественного рассеяния радиоволн на кронах заметно проявляются на малых углах наблюдения. При увеличении концентрации крон эффективное сечение рассеяния $\sigma_p^{эф}$ уменьшается по сравнению с σ_p. При $\sigma_p^{эф} << \sigma_p$ смесь «кроны – воздух» приближается по своим свойствам к сплошной однородной среде, причем степень однородности зависит от радиусов R сфер.

Экспериментальные исследования были проведены с помощью разработанного в [6] метода определения локального коэффициента погонного ослабления γ сигналов навигационных спутников в лесу. Величины γ измерены в варианте радиопросвечивания для сосновых и березовых древостоев вблизи Красноярска. Расчетные значения коэффициента погонного ослабления удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что позволит развивать методику определения электрофизических свойств лесных покровов с помощью спутникового зондирования.

Список литературы

1. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия Телеком, 2005. 392 с.

2. Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачёв С.П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 11. С. 1285–1311.

3. Новик С.Н., Завьялов А.С., Тельпуховский Е.Д. Электрофизические и рассеивающие свойства элементов хвойного древостоя // Изв. вузов. Серия «Физика». 2006. Т. 49, № 7. С. 57–67.

4. Сомин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. М.: Наука, 1983. 320 с.

5. Eyring H., Henderson D., Stover B.J. Statistical Mechanics and Dynamics. New York: Willy, 1982.

6. Сорокин А.В., Подопригора В.Г., Фомин С. Эволюция характеристик сигналов навигационных спутников в лесу // Изв. вузов. Серия «Физика». 2017.

УДК 630*58

Ю.А. Полевщикова

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия
e-mail: polevshikovaya@volgatech.net

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В СРЕДНЕМ ПОВОЛЖЬЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

В центре научного исследования находится проблема мониторинга состояния лесных насаждений в условиях меняющихся климатических факторов с применением данных дистанционного зондирования. В работе приведена методика экспериментальных исследований по моделированию лесных насаждений на основе спутниковых снимков в среде ГИС на примере территории Среднего Поволжья.

Ключевые слова: лесные насаждения, мониторинг, моделирование, спутниковые снимки, дистанционное зондирование, ГИС.

© Полевщикова Ю.А., 2018

Моделирование состояния лесных насаждений является одним из ключевых факторов при исследовании глобальных изменений. Возможность прогнозирования состояния лесного покрова ограничивается пониманием того, как влияют основные климатические факторы [1; 2]. Стремительное развитие технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) как важного инструмента мониторинга и моделирования лесного покрова способствует решению серьезных проблем по оценке и анализу состояния лесных насаждений [3–6].

Ключевым моментом при оценке влияния факторов на оценку состояния лесных насаждений является пространственное моделирование лесообразовательных процессов и их изменений во времени. Глобальная оценка лесного покрова с учетом социально-экономических, экологических и климатических факторов проводится многими учеными [7–9]. В геостатистике построение моделей обеспечивает описание масштабов и структуры пространственной изменчивости лесного покрова. Ряд ученых занимались данным вопросом [10–15]. Например, в Бразилии в связи с динамикой растительного покрова проводилось исследование, направленное на оценку пространственного распределения биомассы лесов с применением методов геостатистики. В другом исследовании [16] предложена методика оценки пространственного варьирования свойств растительности. В основу методики положен принцип моделирования рельефа [17] и использования вегетационных индексов с применением данных ДЗЗ. Классы растительного покрова включали в себя земли травянистого покрова, заболоченные участки и хвойные лесонасаждения. По результатам исследования определены процентные соотношения основных типов растительности (95 % – хвойные леса), анизотропное распределение структуры индекса NDVI, представлена методика улучшения оценки растительного покрова на региональном и глобальном уровнях.

Такие исследования представляют интерес для ученых и специалистов по лесному хозяйству, имеют важное практическое значение для отраслей народного хозяйства в Среднем Поволжье.

Целью исследования было разработать методику моделирования состояния лесных насаждений на примере территории Среднего Поволжья с использованием данных спутниковой съемки.

Для решения данной цели были поставлены следующие **задачи исследования**:

- разработать алгоритм моделирования пространственной динамики лесов;
- провести многофакторный регрессионный анализ динамики лесного покрова;
- выявить закономерность динамики лесного покрова с использованием методов множественной регрессии в среде ArcGIS.

Объектом исследования явились лесные насаждения на территории Среднего Поволжья.

Разработка алгоритма моделирования пространственной динамики лесов. Воснове разработки алгоритма оценки распределения и пространственной взаимосвязи (автокорреляции) объектов лесного покрова лежит использование многофакторного анализа зависимости интегрированного показателя динамики лесного покрова исследуемой территории от ее пространственных параметров [18]. Анализ проводился в программном комплексе ArcGIS 10.3 в два этапа с помощью следующих методов:

1) двумерный статистический анализ (*Bivariate Statistical Analysis*);

2) статистический многофакторный анализ пространственных данных с построением модели линейной множественной регрессии.

Многофакторный регрессионный анализ. Для моделирования и пространственной динамики лесного покрова был использован многофакторный регрессионный анализ (*Multicriteria Decision Analysis*). Комбинирование разновременных спутниковых данных Landsat и классических статистических приемов позволило провести пространственно-временной анализ взаимосвязи объектов наземного покрова, а также выявить

и описать факторы, влияющие на динамику лесного покрова. Пространственный анализ динамики лесного покрова может служить также важной основой для принятия решений при планировании и проведении работ по защите и воспроизводству лесов.

Выявление закономерности динамики лесного покрова с использованием методов множественной регрессии в среде ArcGIS. Для анализа степени нарушенности (или состояния) лесного покрова в Среднем Поволжье были использованы следующие факторы:

- биотические:
  - гари (нарушенные участки лесов в результате пожаров 2010 г.),
  - растровыелесорастительные карты на территорию исследования, представленные основными тематическими классами наземного покрова.
- комплексные (абиотические и биотические):
  - тематическая карта нарушенности, куда вошли участки лесохозяйственной деятельности (контуры рубок) за исследуемый период времени.

Решение задачи по оценке пространственных закономерностей динамики лесного покрова выполнялось с использованием методики «Географически взвешенной регрессии» (ГВР), учитывающей территориальные изменения [19–24].

Заключение. В основе разработки методики моделирования состояния лесных насаждений лежит многофакторный анализ зависимости интегрированного показателя нарушенности (состояния) лесного покрова исследуемой территории от ее пространственных параметров. Мультиколлинеарность разработанной методики подтверждается положительными результатами с использованием статистических методов пакета инструментов ArcGIS.

Полученная пространственная модель ГВР по разработанному алгоритму может расширить и углубить наше понимание взаимосвязи факторов окружающей среды и сложных природных процессов при оценке динамики лесных насаждений. Следует отметить, что пространственное распределение факторов, влияющих на динамику лесного покрова, указывает на то, что процесс обезлесения выражается на полученных картах намного заметнее, чем обычные процессы лесовосстановления. На разновременных спутниковых изображениях это обстоятельство выражается в резком изменении спектрально-отражательных свойств лесных ландшафтов в результате нарушений (пожаров, ветровалов, вырубках). Это приводит к дальнейшей кластеризации положительных отклонений оцениваемого фактора на изучаемом участке.

Разработанный алгоритм моделирования пространственной динамики лесов позволит получать закономерности пространственных моделей изменения лесного покрова с учетом условно принятых независимых факторов. Полученные статистические данные могут быть использованы в качестве достоверных моделей, представляющих изучаемые процессы в пространстве и во времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-675.2018.5).

Список литературы

1. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada’s boreal forests / C. Peng, Zh. Ma, X. Lei [et al.] // Nature Climate Change. 2011. № 1. P. 467–471.

2. Penuelas J., Canadell J.G., Ogaya R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth // Global Ecology and Biogeography. 2011. № 20. P. 597–608.

3. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев [и др.] // Вестн. Поволж. гос. тех. ун-та. Серия «Лес. Экология. Природопользование». 2014. № 1 (21). С. 18–32.

4. Полевщикова Ю.А., Воробьев О.Н. Мониторинг нарушенности лесного покрова по спутниковым снимкам // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сб. науч. ст. 2016. С. 70–79.

5. Слинкина О.А., Сухинин А.И., Буряк Л.В. Картографирование текущего состояния лесов Красноярского края с использованием данных дистанционного // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва. 2008. № 1. С. 70–75.

6. Sonnenschein R. Differences in Landsat-based trend analyses in drylands due to the choice of vegetation estimate / Ruth Sonnenschein, Tobias Kuemmerle, Thomas Udelhoven, Marion Stellmes, Patrick Hostert // Remote Sensing of Environmental. 2011. № 115. P. 406–420.

7. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing / J. Xiao, Y. Shen, J. Ge [et al.] // Landscape and Urban Planning. 2006. Vol. 75. P. 69–80.

8. Socio-economic driving forces of land-use change in Kunshan, the Yangtze River Delta economic area of China / H. Longa, G. Tangc, X. Lia, G. K. Heilig // Journal of Environmental Management. 2007. Vol. 83. P. 351–364.

9. Suzanchi K., Kaur R. Land use land cover change in National Capital Region of India: a remote sensing GIS based two decadal spatial-temporal analyses // Procedia Social and Behavioral Sciences. 2011. Vol. 21. P. 212–221.

10. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondonia, Brazil / M.H. Sales, C.M. Souza Jr., P.C. Kyriakidis [et al.] // Ecological Modelling. 2007. № 205. P. 221–230.

11. Meng Q. Geostatistical Prediction and Mapping for Large Area Forest Inventory Using Remote Sensing Data / Qingmin Meng // UCGIS (University Consortium for Geographic Information Science) Summer Assembly. 2006. 20 p.

12. Hepinstall-Cymerman J., Coe S., Alberti M. Using Urban Landscape Trajectories to Develop a Multi-Temporal Land Cover Database to Support Ecological Modeling // Remote Sensing. 2009. № 1. P. 1353–1379.

13. Геостатистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета *R*): учеб. пособие / А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, А.Г. Пилюгин, Н.А. Чижикова. Казань, 2012. 120 с.

14. Чумаченко С.И., Коротков В.Н., Паленова М.М. Исследование динамических процессов лесных экосистем средствами имитационного моделирования как метод мониторинга лесных объектов // Мониторинг состояния лесных и городских экосистем: монография. М.: МГУЛ, 2004. С. 132–157.

15. Шарая Л.С. Количественный анализ пространственной изменчивости некоторых параметров состояния экосистемы Жигули // Самарская Лука. 2007. Т. 16, № 4 (22). С. 639–659.

16. Characterizing spatial representativeness of flux tower eddy-covariance measurements across the Canadian Carbon Program Network using remote sensing and footprint analysis / B. Chen, N.C. Coops, D. Fu [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2012. № 124. P. 742–755.

17. Ticehurst C., Phinn S., Held A. Using multitemporal digital elevation model data for detecting canopy gaps in tropical forests due to cyclone damage: An initial assessment // Australian ecology. 2007. Iss. 32. P. 59–69.

18. Dorman C. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data // Global Ecology and Biogeography. 2007. № 16. P. 129–138.

19. Fotheringham S.A., Brunsdon C., Charlton M. Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships // John Wiley & Sons. 2002. 284 p.

20. Andy M. The ESRI Guide to GIS Analysis: Modeling suitability, movement, and interaction // ESRI Press. 2005. Vol. 3. 419 p.

21. Gao J. Detecting spatially non-stationary and scale-dependent relationships between urban landscape fragmentation and related factors using Geographically Weighted Regression // Applied Geography. 2011. № 31. P. 292–302.

22. Mennis J. Mapping the Results of Geographically Weighted Regression // The Cartographic Journal. 2006. Vol. 43, № 2. P. 171–179.

23. Хлюстов В.К., Устинов М.М., Хлюстов Д.В. Многомерные закономерности текущей актуализации таксационных показателей древостоев. Лесотаксационный справочник: учеб. пособие. М.: Изд-во РГАУ-МСХА. 2013. 141 с.

24. Шалабанов А.К., Роганов Д.А. Эконометрика: учеб.-метод. пособие. 2008. 198 с.

УДК 630*43; 528.88

Е.И. Пономарев[1, 2], К.Ю. Литвинцев[3], Е.Г. Швецов[1, 2], О.И. Пономарев[2], Н.Д. Якимов[2]

[1]Институт леса имени В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[3]Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
evg@ksc.krasn.ru

АДАПТИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОЖАРНЫХ ЭМИССИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Впервые для территории Сибири предложен и апробирован инструментальный метод определения эмиссий лесных пожаров, учитывающий интенсивность горения на основе спутниковой (Terra/MODIS) регистрации мощности теплоизлучения (FRP). Средняя величина эмиссий лесных пожаров в Сибири составила 83 ± 21 Тг С/год (2002–2016 гг.), что существенно ниже существующих эмпирических оценок (112 ± 25 Тг С/год). Получены прогностические тренды пожарных эмиссий в связи с ростом температурных аномалий в Сибири до конца XXI в. при реализации климатических сценариев RCP2.6, RCP4.0 и RCP8.5.

Ключевые слова: лесные пожары, дистанционный пирологический мониторинг, мощность теплоизлучения, интенсивность, пожарные эмиссии.

Пожары в бореальной зоне Сибири – важнейший фактор нарушенности лесов, определяющий значимый вклад в статистику углеродных эмиссий в планетарном масштабе. Согласно прогнозам, современный уровень пожарных эмиссий (120–140 Тг С/год), может увеличиться вдвое во второй половине XXI в. [1–3]. Для оценки и прогнозирования масштабов таких процессов актуально развитие методов инструментального мониторинга, основанного на спутниковых данных [4; 5]. Цели данной работы – разработка инструментального метода определения прямых пожарных эмиссий с учетом интенсивности горения. Предложенный подход также был использован для анализа динамики прямых эмиссий от лесных пожаров в Сибири на интервале 2002–2017 гг. и в прогнозе до конца XXI в.

Анализ проведен на основе банк пожаров, фиксируемых спутниковыми средствами (Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, 1996–2017 гг.). Исходные материалы получены посредством обработки съемок Terra/MODIS за более чем 20-летний период и представленные в формате векторного слоя в геоинформационной системе (ГИС). Дополнительно вычисляли мощность тепловыделения пожаров из продукта MOD14/MYD14 (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/) с использованием методики Fire Radiative Power (FPR). Данный показатель связан с интенсивностью горения [6]. Дополнительно для оценки климатических аномалий в 2002–2016 гг. использована база данных Climatic Research Unit (CRU) (http://www.cru.uea.ac.uk). В численном моделировании использовали обобщенный показатель, характеризующий запасы напочвенного покрова (1,4–6,0 кг/м^2) в различных древостоях Сибири.

Расчеты количества сгоревшей фитомассы и оценки прямых эмиссий углерода выполняли по методике [7]:

$$M = A \cdot \beta \cdot B, \quad (1)$$

© Пономарев Е.И., Литвинцев К.Ю., Швецов Е.Г., Пономарев О.И., Якимов Н.Д., 2018

где M – масса растительных горючих материалов, сгоревших при пожаре, кг; A – площадь, пройденная огнем, м^2; β – коэффициент полноты сгорания; B – допожарный запас фитомассы, кг/м^2;

$$C = A \cdot B \cdot CE \cdot \beta, \quad (2)$$

где A – площадь, пройденная огнем, м^2; B – допожарный запас, кг/м^2; CE – коэффициент, определяющий долю углерода, г/кг; β – коэффициент полноты сгорания.

Предварительно проводилась классификация пожаров в соответствии с интенсивностью горения, оцениваемой на основе теплоизлучения (FRP). На основе этого в соотношениях (1) и (2) параметр A, м^2, был представлен в виде суммы площадей всех зафиксированных спутниковыми съемками фаз пожара с учетом интенсивности горения ($A_i(FRP_i)$)

$$A = \sum_i A_i(FRP_i) \cdot \quad (3)$$

Пороговые значения для категорий интенсивности пожаров определяли из статистических параметров распределения мощности теплоизлучения, рассчитанных по всем пожарным пикселям. Квантили интенсивности были заданы на основе стандартного отклонения (σ) от среднего ($FRP_{ср}$). В I квантиль интенсивности были отнесены участки пожаров со значениями FRP < $FRP_{ср}$–σ, II квантиль – $FRP_{ср}$–σ < FRP < $FRP_{ср}$+σ, III квантиль – FRP > $FRP_{ср}$+σ. На основе квантилей интенсивности выделяли области пожарных полигонов, соответствующие участкам низко-, средне- и высокоинтенсивного горения. Для каждого участка была выполнена оценка количества сгоревшей фитомассы с учетом переменных коэффициентов полноты сгорания β.

Относительную величину, уточняющую оценки количества сгоревшей фитомассы в зависимости от категории пожара по интенсивности, определяли из соотношения

$$\Delta M_{отн} = 100{,}0\ \% \cdot (M - M_d) / M, \quad (4)$$

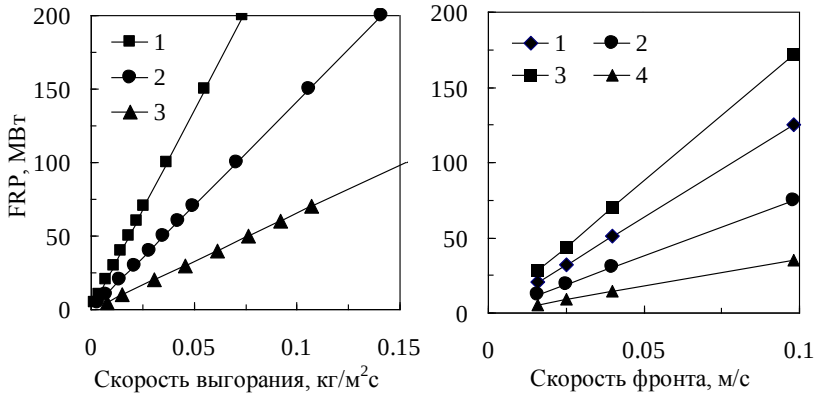
где $\Delta M_{отн}$ – относительное отклонение; M – количество сгоревшей фитомассы, рассчитанное с использованием методики (1); M_d – запасы горючих материалов, рассчитанные с учетом (3).

На основе соотношений (2) и (3) выполняли также оценки прямых пожарных эмиссий C и относительной разницы $\Delta C_{отн}$ аналогично (4).

Основные результаты. На основе численных экспериментов показано, что величина регистрируемой мощности излучения составляет от 10 до 30 % от интегральной мощности тепловыделения активной зоны пожара. Проявляется также тенденция роста доли FRP при увеличении скорости распространения фронта пламени и скорости выгорания горючих материалов (рис. 1, *а, б*).

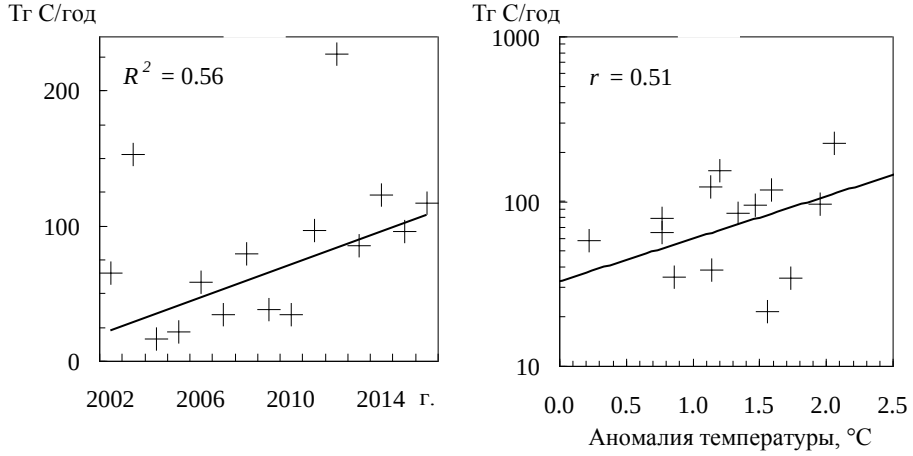
Впервые для пожаров Сибири инструментально классифицированы участки низко-, средне- и высокоинтенсивного горения в привязке к преобладающим древостоям. В среднем площади пожаров низкой интенсивности в Сибири составляют 42–47 % в год, пожары средней интенсивности зафиксированы на площадях 41–46 %, доля высокоинтенсивных пожаров – 10–13 % общей площади. Дисперсия значений σ составляла 6–15 %. Ранее в [8] было установлено, что на основе метода FRP уверенно детектируются верховые высокоинтенсивные пожары, площадь которых составляет 8,5 % площади пожарных повреждений в лесах Сибири.

Дифференциальный учет площадей, пройденных пожарами переменной интенсивности, существенно уточняет объемы прямых пожарных эмиссий углерода C. По нашим оценкам [9], прямые эмиссии углерода составляли в среднем 83 ± 21 Тг С/год, что на 17 % ниже, чем приводимые эмпирические оценки (112 ± 25 Тг С/год) [1; 10]. В условиях Сибири это определяется преобладанием низовых пожаров низкой интенсивности. Многолетние данные эмиссий от пожаров Сибири варьировали от 20–40 Тг С/год (2004, 2005, 2007, 2009, 2010 гг.) до 227 Тг С/год в 2012 г. (рис. 2, *а*). Это значительно ниже приводимых экстремальных оценок как для пожаров Сибири (> 500 Тг С/год), так и для Канады (> 300 Тг С/год) [1; 10].



а *б*

Рис. 1. Вариация FRP в зависимости от параметров пожара в модельных уравнениях: *а* – FRP в зависимости от скорости выгорания фитомассы, кг/м^{2}с, с учетом площади активного горения в пикселе (1 – 1 000 м^2; 2 – 500 м^2; 3 – 250 м^2); *б* – зависимость от скорости распространения фронта и запасов фитомассы в активной зоне пожара, кг/м^2 (1 – для 1,5 кг/м^2 и β = 0,55; 2 – для 1,5 кг/м^2 и β = 0,4; 3 – для 2,5 кг/м^2 и β = 0,55; 4 – для 0,7 кг/м^2 и β = 0,4)



а *б*

Рис. 2. Вариация прямых углеродных эмиссий от пожаров Сибири на временном интервале 2002–2016 гг.: *а* – тренд на основе многолетнего ряда (p < 0,05); *б* – связь с аномалиями температуры воздуха

В представленной за период 2002–2016 гг. динамике пожарных эмиссий наблюдается значимый тренд (рис. 2, *а*; R^2 = 0,56, p < 0,05), соответствующий установленному ранее [11–13] росту площадей лесных пожаров в различных субрегионах Сибири. В условиях устойчивого положительного тренда возрастания температур воздуха в летний период следует ожидать корреляции пожарных эмиссий с климатическими и метеорологическими аномалиями. Количественно это формализовано экспоненциальным уравнением вида С(Таномал) = 32,7exp(0,59×Таномал) (рис. 2, *б*; r = 0,51), позволяющим оценить вероятный уровень эмиссий при реализации различных климатических сценариев [14].

Согласно оптимистическому сценарию RCP2.6 [14], в конце текущего столетия средняя температура воздуха может повыситься на 0,3–1,7 °С; при реализации «жесткого» сценария (RCP8.5) следует ожидать роста температуры до 2,6–4,8 °С. Таким образом, обобщая установленные тренды (рис. 2), можно прогнозировать, что пожарные эмиссии в Сибири в конце XXI в. достигнут от 220 до 700 Тг С/год, а при «жестком» сценарии – 2 300 Тг С/год.

Полученные результаты и возможность их более широкого внедрения в практику спутникового экологического мониторинга, включая решение задачи мониторинга пожарных эмиссий в режиме, приближенном к реальному времени, важны для понимания фундаментальных процессов планетарного масштаба, в которых критически необходим учет вклада пожаров Сибири.

Работа выполнена по теме базового проекта № 0356–2016–0707 и при поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края (№ 17-41-240475, № 18-05-00432).

Список литературы

1. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998–2002) / A.J. Soja, W.R. Cofer, H.H. Shugart [et al.] // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109.

2. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепащенко, Е.А. Ваганов [и др.] // Докл. РАН. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.

3. Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Выбросы черного углерода от природных пожаров на землях лесного фонда Российской Федерации в 2007–2012 // Метеорология и гидрология. 2015. № 7. С. 5–17.

4. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С.А. Барталев, Ф.В. Стыценко, В.А. Егоров, Е.А. Лупян // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

5. Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссии углеродосодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследования Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.

6. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release / M.J. Wooster, G. Roberts, G.L.W. Perry, Y.J. Kaufman // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110 (D24311). DOI: 10.1029/2005JD006318.

7. Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Clim. Change. 1980. № 2. P. 207–247. URL: https://doi.org/10.1007/BF00137988.

8. Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Усатая Ю.О. Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исследования Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11. DOI: 10.7868/S0205961417040017.

9. Remote Sensing Data for Calibrated Assessment of Wildfire Emissions in Siberian Forests / E.I., Ponomarev, E.G. Shvetsov, K.Y. Litvintsev [et al.] // Proceedings. 2018. Vol. 2, № 7 (348). 7 p. DOI: 10.3390/ecrs-2-05161.

10. A comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes / W.J. de Groot, A.S. Cantin, M.D. Flannigan [et al.] // For. Ecol. and Manage. 2013. Vol. 294. P. 23–34. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.07.033.

11. Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Ranson K.J. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // Forests. 2016. № 7 (125). P. 1–9. DOI: 10.3390/f7060125.

12. Пономарев Е.И., Харук В.И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // Сибирский экологический журнал. 2016. № 1. С. 38–46. DOI: 10.15372/SEJ20160104.

13. Харук В.И., Пономарев Е.И. Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири // Экология. 2017. № 6. С. 413–419. DOI: 10.7868/S0367059717060026.

14. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Field C.B., Barros V., Dokken D.J. [et al.]; World Meteorological Organization. Geneva, 2014. 190 p.

УДК 004.042

С.Е. Попов, М.А. Костылев

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: popov@ict.sbras.ru, 5999ft@gmail.com

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА БАЗЕ МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАДАРНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрена задача разработки программного комплекса обработки радарных снимков с возможностью визуализации, конфигурирования и запуска алгоритмов основных этапов процессинга интерферометрических данных методом Persistent Scatterer в интеграции с MPP-системой (*Massive Parallel Processing*) для высокопроизводительного мониторинга смещений земной поверхности участков аэрокосмической съемки. Даны основные схемы маршрутизации потоков данных исполнения заданий. Представлена программная реализация в виде веб-портала на базе компонентов ReactJS, включая автоматизированную загрузку и обновлений базы данных радарных снимков Sentinel-1A посредством технологии RESTful API. Проведены тесты производительности программного комплекса, показано низкое время исполнения расчетных заданий на основе массово-параллельной обработки на программной платформе Apache Spark.

Ключевые слова: мониторинг смещений земной поверхности, радарная интерферометрия, системы с массово-параллельным исполнением заданий, высокопроизводительная обработка пространственных данных.

Введение. Изображения, получаемые с помощью космических средств дистанционного зондирования Земли, играют исключительно важную роль в научных исследованиях, связанных с мониторингом смещений земной поверхности.

Метод дифференциальной радарной интерферометрии незаменим для своевременного выявления сдвигов земной поверхности над районами подземной добычи полезных ископаемых, картирования деформаций бортов и уступов карьеров, а также для мониторинга природных и техногенных смещений и деформаций сооружений. Радарная интерферометрия выявляет малейшие смещения – вплоть до нескольких миллиметров, сводит к минимуму риск возникновения чрезвычайных ситуаций и значительно уменьшает их возможные последствия.

Основное преимущество радарной интерферометрии — независимая дистанционная оценка изменений по всей площади снимка. Для расчета используется массив спутниковых радарных данных, полученных с периодичностью до 8 раз в месяц [1; 2].

Активное развитие методов дифференциальной интерферометрии и средств дистанционного зондирования требует создания проблемно ориентированных программных комплексов обработки больших объемов поступающих данных. При этом зачастую основная ценность космической информации, поступающей при мониторинге земной поверхности, заключается в возможности ее оперативной постобработки и анализа результатов. Для получения точных и непротиворечивых результатов требуется исходный массив данных радарных наблюдений, состоящий в среднем из 30 радарных съемок за 30 разных дат. Причем постобработка может включать в себя повторные этапы (формирование интерферограм, расчет когерентности и оценка ее значений сигнал/шум и т.п.) для составления корректного временного стека сцен съемки с последующим расчетом методами SBAS или Persistent Scaterers [3; 4]. Таким образом, на отдельных ста-

© Попов С.Е., Костылев М.А., 2018

диях расчетов может возникать резкая деградация производительности. Экспериментальные расчеты показывают время от 3 до 5 ч для 12 пар снимков небольшого разрешения в 3 000×1 000 пикселей, для выявления динамики вертикальных смещений с погрешностью разности высот ЦМР не более чем ±3 мм/пиксел.

Мониторинг и анализ геодинамической ситуации отличаются высоким уровнем ответственности и сложности решаемых задач, так как наряду с мощными возмущениями из известных очаговых зон анализировать и классифицировать приходится разнородный поток событий, среди которых промышленные взрывы различной мощности и глубины заложения, горные удары и оползни [5–7].

На сегодняшний день реализовано большое количество различных систем мониторинга, основанных на данных дистанционного зондирования земли [8–13; 24], использующих различные типы и форматы ДДЗ как мульти- и гиперспектральные, так и радарный данные. Многие из них носят преимущественно информационный характер с набором ретроспективных данных и отчетов, и по факту не предоставляют интерактивной расчетной части процессинга ДДЗ.

В области комплексной обработки радарных данных, наиболее развитой в плане программного обеспечения, набора функционала и доступа к базам данных космоснимков является веб-портал Geohazard Tep [14]. Построенный на базе облачной архитектуры Amazon Web Service (AWS), содержит широкий пул процессинговых сервисов, ориентированных на различные прикладные направления радарной интерферометрии, обеспечивает PaaS (Platform as a Service) модели облачных вычислений. Однако представленные веб-службы портала не дают имплементации именно realtime-обработки в потоковом представлении предметных данных. Сервисы функционируют по модели доступа On-demand Processing Service, большая часть из них использует коммерческое программное обеспечение (ENVI, SARScape и т.п.).

Реализация и широкое внедрение большого количества программных алгоритмов технологических этапов обработки радарных данных показывают целесообразность применения их совместно в инфраструктуре, предоставляющей массово-параллельное исполнения расчетных заданий, где программный каркас (фреймворк) такой инфраструктуры выступает как интегратор распределенного исполнения программного кода на данных, получаемых в потоковом режиме, что является актуальной задачей современной радарной интерферометрии.

Постановка задачи. Разработать информационно-вычислительную системы полного цикла процессинга радарных снимков (методом Persistent Scatterer) в контексте мониторинга смещений земной поверхности участков аэрокосмической съемки с возможностью массово-параллельного исполнения расчетных заданий в потоке поступающих предметных данных как основной функциональной характеристикой в парадигме распределенных технологий.

Концепция программного комплекса мониторинга смещений земной поверхности. Концепцию построения программного комплекса можно представить в виде полного цикла обработки радарных снимков в контексте мониторинга смещений земной поверхности участков аэрокосмической съемки с возможностью массово-параллельного исполнения расчетных заданий в потоке поступающих предметных данных, которая является основной функциональной характеристикой в парадигме распределенных технологий. По сравнению с традиционными подходами к обработке радарных данных, при которых высокопроизводительные вычисления не применяются, оптимизация программной составляющей алгоритмов достигается за счет использования стандартных библиотек параллельных вычислений. Предлагаемое концептуальное решение (рис. 1.) ориентировано на использование как собственных расчетных пакетов модулей, так и привлечение сторонних разработок за счет гибкой программной инфраструктуре кластера (Apache Spark), позволяющего использовать изолированные контейнеры объектов с возможностью запуска в среде JVM.

Анализ различных технологий параллельных, распределенных и облачных вычислений [14-26] показал, что на сегодняшний день де-факто стандартом прикладной разработки, в том числе и в области геоинформатики, являются программные каркасы (API) компонентов массово-параллельной архитектуры на базе экосистемы Apache Hadoop. Данная архитектура относится к классу SN-систем, которая предполагает модель разделения ресурсов, когда у каждого вычислительного узла своя собственная оперативная память, дисковые массивы и процессорные единицы.

В плане выбранного подхода, где каждое задание является изолированным контейнером вычислений над распределенным набором данными, определяемыми значениями точек одного или несколькими радарных снимков, преимущество отдаются компоненту с поддержкой пакетной модели (batch-proccessing framework). Исходя из проведенного анализа, данному условию удовлетворяют компоненты Spark, Tez и Flink.

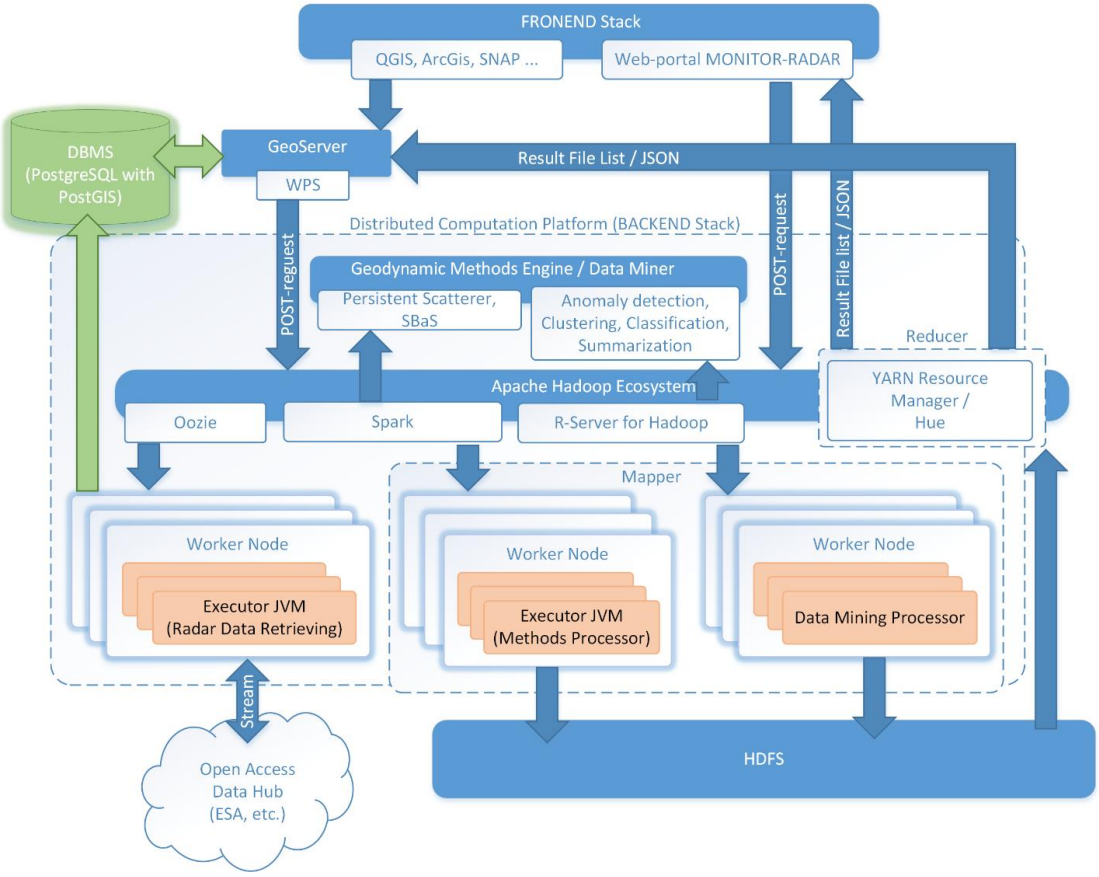


Рис. 1. Концептуальная модель распределенного программного комплекса мониторинга геодинамической ситуации на базе модели расчета смещений

Согласно [21–23; 27–29] каждый из выбранных компонентов имеет свои преимущества, однако в пользу выбора фреймворк Apache Spark указывают: высокая масштабируемость, достигаемая за счет добавления новых узлов в вычислительный кластер, без необходимости внесения изменений в применяемые алгоритмы; встроенная возможность работы в режиме реального времени, позволяющая построить алгоритмы потоковой обработки радарных данных; большое количество вспомогательных программных решений, необходимых для организации системы (с системами управления контентом) и их постоянная поддержка разработчиками, поддержка Data Mining функционала на базе компонентов R-Server и GraphX.

Таким образом, в рамках выбранной парадигмы распределенного программирования Apache API разрабатываемый комплекс логически может быть представлен двумя компонентными составляющими: графической частью (**FRONTEND**) и вы-

числительным ядром с массово-параллельным функционалом (**BACKEND**). Отдельно от стандартных требований, предъявляемых к клиент-серверным распределенным архитектурам (прозрачность, открытость, масштабируемость, аудит, логгирование и др.), необходимо указать специфические в контексте имплементации методы обработки радарных данных и функциональности разрабатываемой системы следующим образом:

1. Запуск, процессинг и корректное завершение заданий в массово-параллельном стиле для многопользовательских запросов, в том числе в потоковом режиме и с использованием стандартов спецификации Web Processing Service (WPS).

2. Автоматическая маршрутизация вычислительных потоков SN-системы в пуле поступающих заданий.

3. Автоматическое разделение заданий на основе аппаратной конфигурации кластера по узлам системы, их идентификация и логирование процесса выполнения. Поддержка возможности указания количества требуемых ресурсов (CPU Cores, JMV memory) для конкретных заданий, запускаемых пользователем.

4. Поддержка распределенной файловой системы доступной со всех узлов.

5. Возможность комплексного управления заданиями в удаленном режиме посредством RESTful запросов через протокол HTTP.

6. Поддержка компонентной модели структуры графических элементов интерактивного пользовательского интерфейса (WebGUI). Представление и взаимодействие с радарными данными посредством электронной карты, таблицы параметров и методов, составляющих backend, базы данных космоснимков. Настройка графических объектов согласно профилю аутентифицированного пользователя.

7. Поддержка контейнера модели состояние для веб-приложения, отслеживание и изменение визуальных частей компонентов, запуск заданий на стороне backend и, в зависимости от результата их выполнения, формирование нового состояния веб-приложения, без перезагрузки последнего.

Модели и схемы маршрутизации потоков. Согласно сформулированным требованием разрабатываемый комплекс поддерживает следующий режим работы: пользователь **FRONTEND**-приложения задает параметры требуемого метода расчетной схемы (рис. 2) и запроса SELECT к базе данных космоснимков.

Все заданные значения метода сохраняются в конфигурационном файле в распределенной файловой системе HDFS. Пользователь посредством HTTPS-протокола отправляет POST-запрос менеджеру заданий Spark на запуск соответствующего расчетного метода, получает уведомление, содержащие уникальный идентификационный номер задания, по которому впоследствии система ассоциирует аутентифицированного пользователя со своим заданием (Task). Расчетный метод исполняется системой Spark, как независимый процесс на кластере, координируемый объектом **SparkContext** в основной программе, называемой программой драйвером (**Driver Program**) (рис. 3). Для запуска на кластере **SparkContext** подключаться к объекту **Resource Manager**, который распределяет ресурсы между приложениями. После подключения Spark **Resource Manager** инициализирует объект **Executor** на свободном узле кластера (**Worker Node**). Executor является процессом, который запускает вычисления и хранит данные для пользовательского приложения. После создания **Executor** система Spark отправляет ему Java-код расчетного метода (JAR-файл), переданный объектом **SparkContext**. **SparkContext** отправляет задание (Task) объекту **Executor** для запуска JAR-файла в виртуальной машине Java (JVM, изолированный JVM-контейнер). Максимальное количество заданий на один объект **Executor** определяется параметром **spark.executor.cores** (рис. 1) в конфигурационном JSON-файле каждого расчетного модуля, равно как и другие параметры, передаваемые POST-запросом менеджеру заданий Spark.

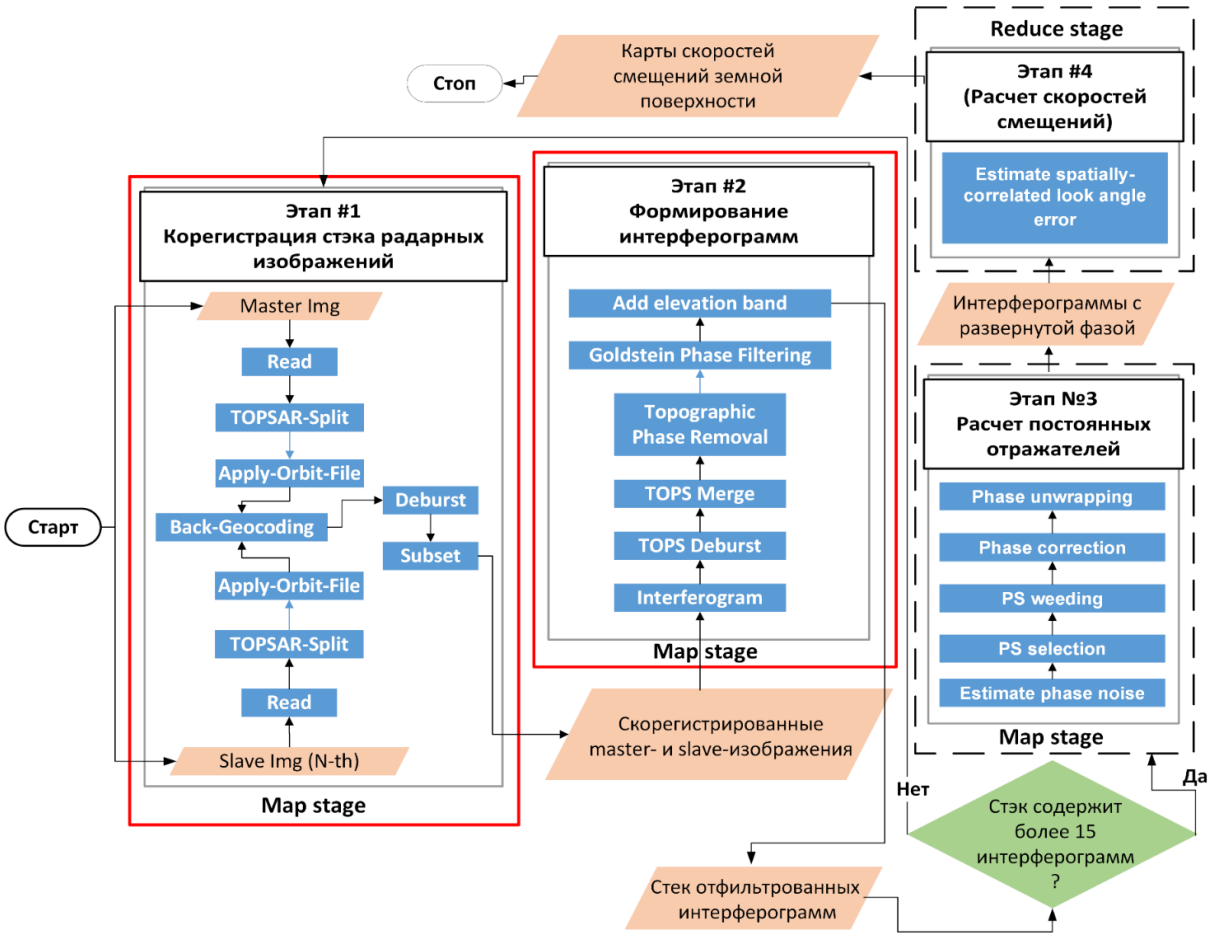


Рис. 2. Блок-схема полного процесса постобработки радарных снимков
и расчета карты смещений земной поверхности методом Persistent Scaterers

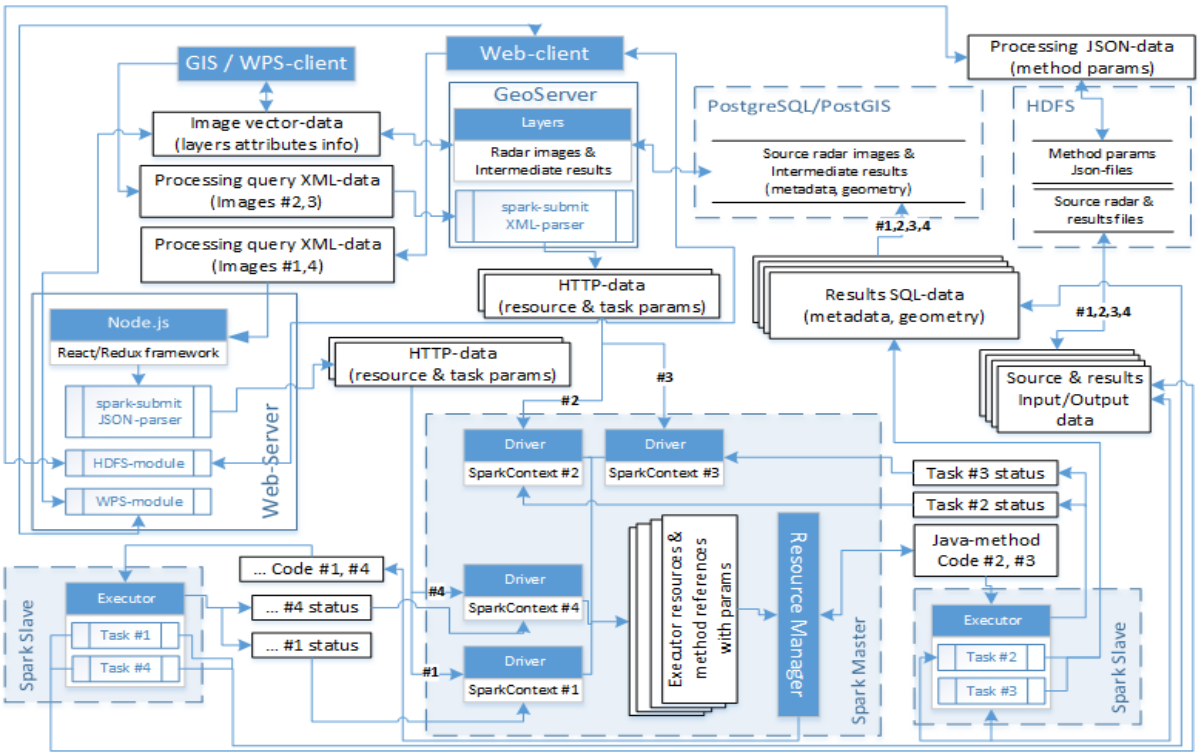


Рис. 3. Схема маршрутизации потоков данных исполнения задания (FRONTEND и BACKEND)
в кластерной архитектуре Apache Spark

Каждое задание получает свои собственные процессы-исполнители (**Executors**), которые остаются активными на все время жизни приложения (JAR-файла) и запускают задания (Task) в нескольких потоках. Это дает преимущество изолировать приложения друг от друга как на стороне драйвера, так и каждое из них на стороне исполнителя (Executors из разных приложений выполняются в разных JVM).

Таким образом, согласно блок-схеме (рис. 2) задание Task 1 может быть запущено в стиле массово-параллельного исполнения путем установки параметра spark.executor. cores, равному количеству пар, образуемых MASTER- и SLAVE-снимками (например, исходя из условия не менее 15 интерферограм). Аналогичным способом имплементируется запуск задания Task 2 (рис. 3). Следовательно, подобная схема исполнения расчетных методов блок-схемы (рис. 3) дает возможность модифицировать логику ее функционала из последовательного в частично параллельный вариант исполнения, значительно сократив время работы всего алгоритма построения карты смещений земной поверхности.

FRONTEND-составляющая разрабатываемого комплекса построена с применением технологий React (библиотека для создания компонентов графического интерфейса) и Redux (фреймфорк для управления состоянием приложения). В качестве среды выполнения используется платформа NodeJS. Архитектура веб-приложения основана на парадигме однонаправленного потока данных (Flux), взаимодействует с распределенной файловой системы HDFS, с Apache Spark и базой данных метаописаний космоснимков PostGIS происходит через интерфейсы REST API. Распределенная файловая система используется как для хранения обрабатываемых данных, так и для размещения вычислительных модулей отдельных этапов процессинга. Каждый модуль представлен в виде JAR файла, исполняемого в системе Spark, а также конфигурационного файла в формате JSON. Веб-приложение поддерживает функцию аутентификации посредством API модуля Apache Hue. Аутентифицированные пользователи получают доступ к конфигурациям вычислительных модулей из распределенной файловой системы, дифференцируемых по профилю пользователя. На основе файлов конфигураций в веб-интерфейсе создаются соответствующие элементы для настройки и запуска алгоритмов.

Запуск заданий обработки выполняется при помощи POST запроса к Spark REST API с передачей выбранных пользователем параметров (обрабатываемые изображения, координаты территории и т.д.). Предоставляется возможность мониторинга исполняемых заданий, а также просмотра результатов обработки и их дальнейшего использования (рис. 4). Новизну данного подхода предполагает возможность хранение всех необходимых для работы приложения данных в едином хранилище состояния в виде дерева объектов, а также описания всех возможных действий в программном комплексе и их воздействия на текущее состояние. Компоненты графического веб-интерфейса создаются как функция от состояния, которая возвращает заданное представление. Такой подход позволяет отделить логику работы комплекса от ее отображения, упростить внесение изменений и дальнейшее масштабирование (рис. 4).

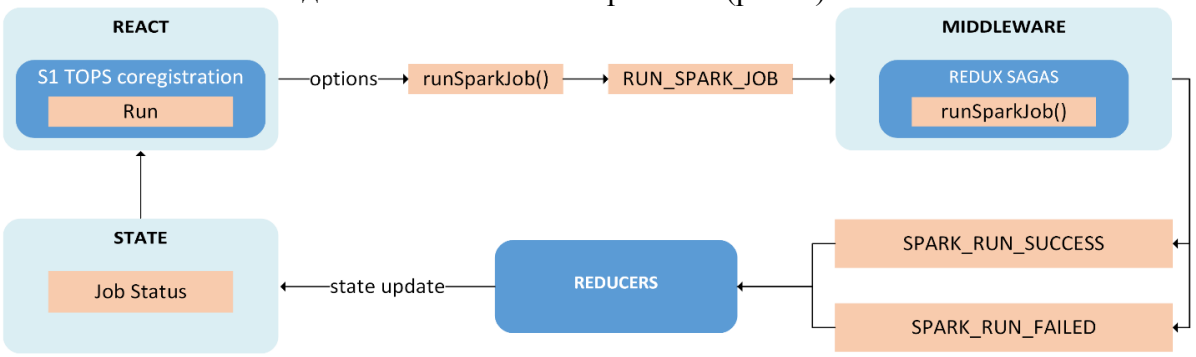


Рис. 4. Схема взаимодействия компонентов FRONTEND и BACKEND
в процедурах запуска заданий

Возможность инициализация потока поступающих радарных снимков исследуемой территории посредством координаторов заданий в среде Apache Hue и комплексного управления ими в удаленном режиме на основе RESTful запросов через протокол HTTP построена согласно схеме (рис. 5). Каждый отдельный элемент координатора рабочего процесса (workflow) позволяет запустить spark-задание на любом из доступных в данный момент времени узлов. Метаданные каждого нового снимка размещаются в базе данных (рис. 6) в виде записей в таблице, содержащей основные идентифицирующие элементы (id, product, swath, burst, geo coordinates, orbit и пр.). Отметим, полного скачивания снимка не происходит, для расчетов в схеме (рис. 3) используется только те фрагменты (burst), которые заданы расчетным заданием согласно выбранной географической территории. Расчетный модуль, инкапсулированный в задании, инициирует скачивание необходимой полосы (swath) и размещает ее в распределенной файловой системе HDFS, тем самым уменьшая как общий объем хранимой информации, так и время повторного использования данных другими расчетными заданиями. Любая метаинформация по текущему снимку может быть получена посредством RESTful-запроса к источнику данных (Data Hub (рис. 5)), обработана и передана в виде параметров расчета по схеме (рис. 2) следующим модулям.

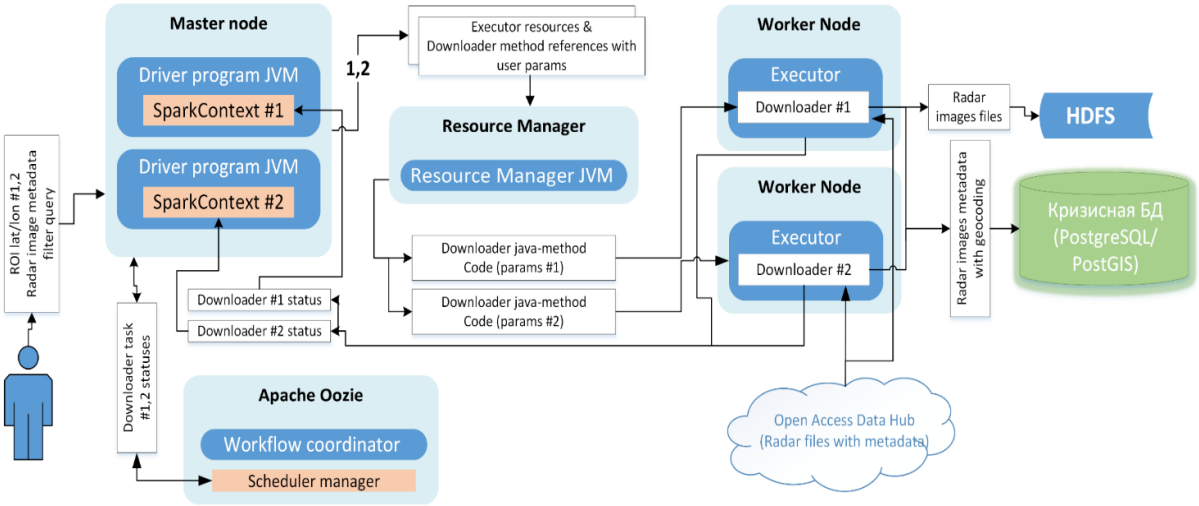


Рис. 5. Схема маршрутизации информационных потоков в процессе исполнения задания на получение радарных данных из открытых источников (Data-hub)

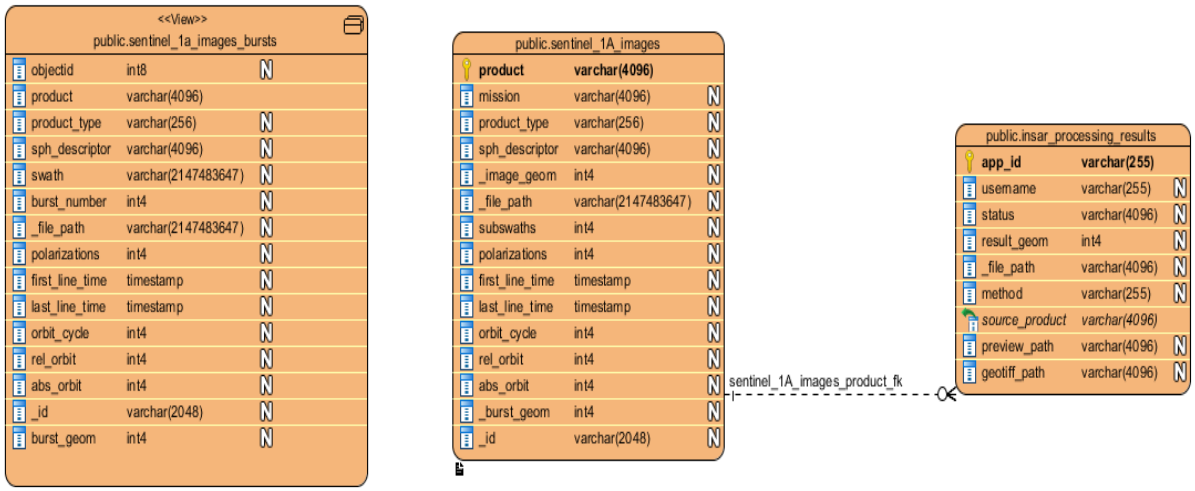


Рис. 6. Схема базы данных получаемых радарных снимков из открытых источников

Программный комплекс. На основе предложенной концепции реализован программный комплекс (рис. 7–9) полного цикла процессинга радарных снимков (метода Persistent Scatters) в контексте мониторинга смещений земной поверхности участков аэрокосмической съемки с возможностью массово-параллельного исполнения расчетных заданий в потоке поступающих предметных данных, как основной функциональной характеристикой в парадигме распределенных технологий.

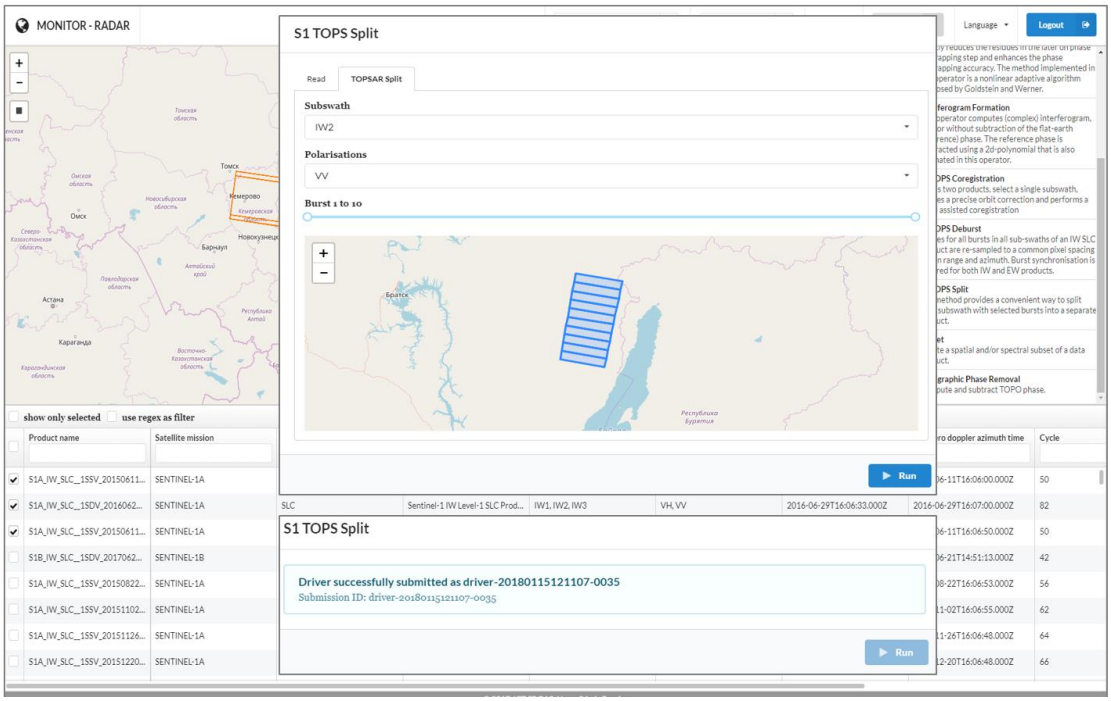


Рис. 7. Графический интерфейс программного комплекса мониторинга смещений (Модуль S1 TOPS Split)

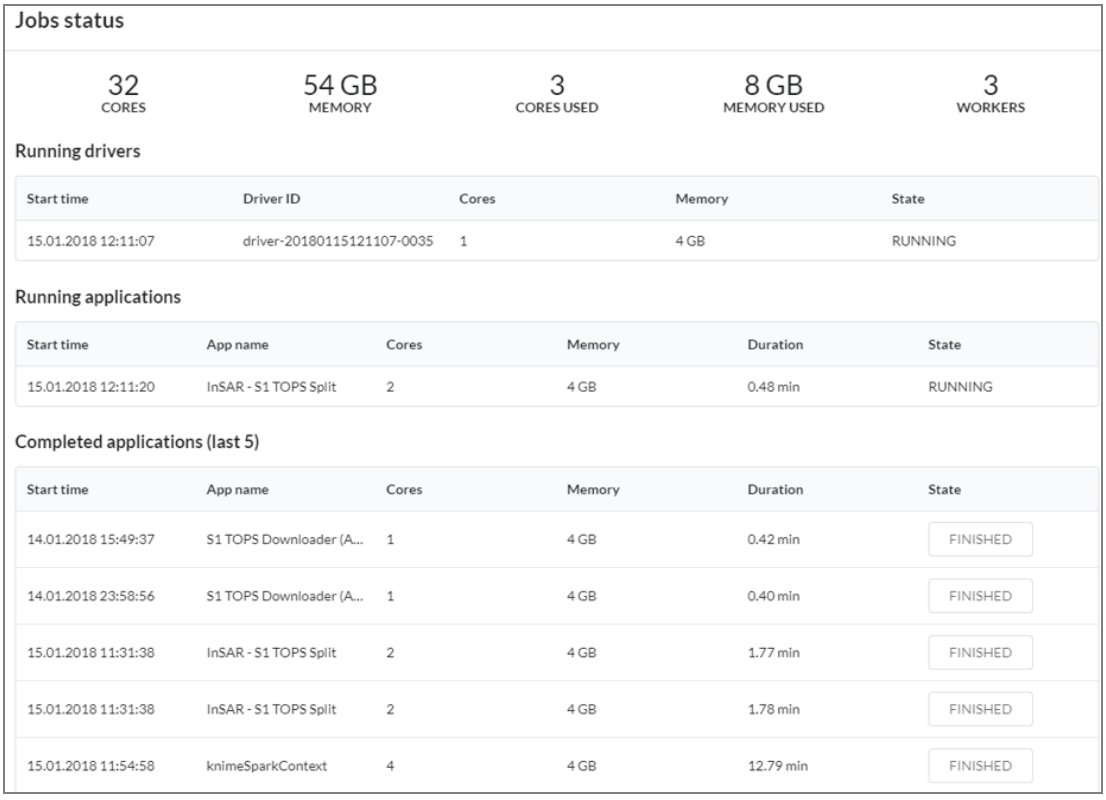


Рис. 8. Графический интерфейс программного комплекса мониторинга смещений (Модуль Spark Job Status)

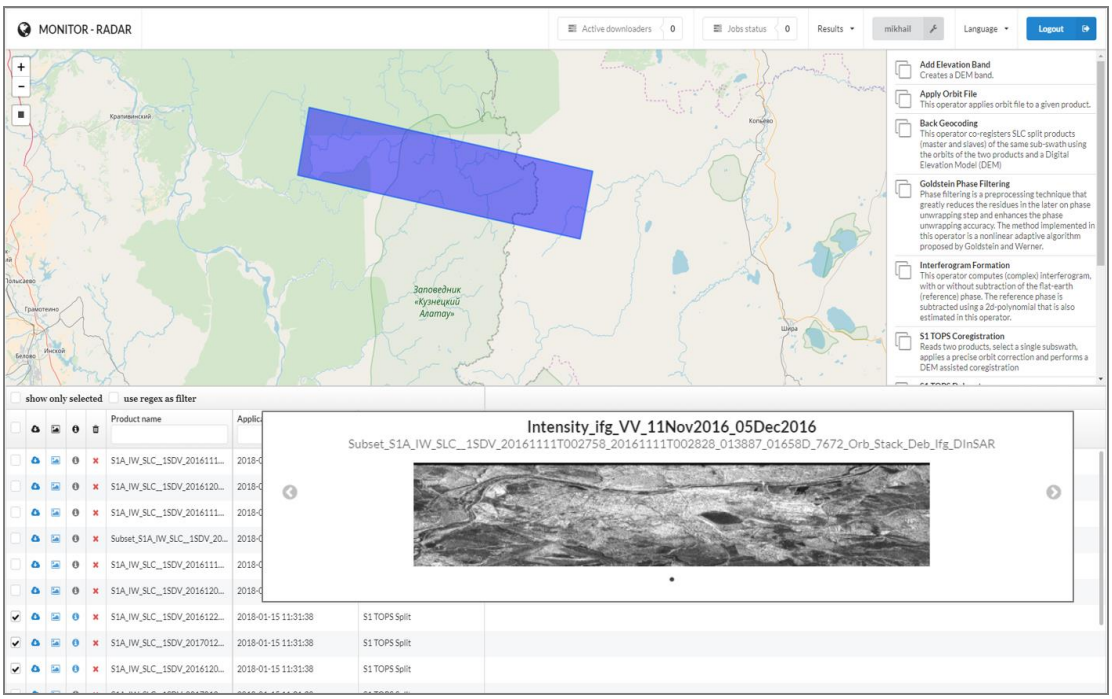


Рис. 9. Графический интерфейс программного комплекса мониторинга смещений (Модуль «Результаты»)

На данный момент программный комплекс поддерживает радарные изображения, поступающие с космического аппарата Sentinel-1A. Доступ к данным Sentinel-1A осуществляется через открытый ресурс Copernicus Open Access Hub (OAHub) (https://scihub.copernicus.eu/userguide/WebHome) посредством RESTful-запросов согласно пользовательским параметрам региона интересов (ROI – Region of Intrest). В зависимости от режима работы комплекса доступны: опция выбора из базы данных (PostGIS) предварительно загруженных снимков либо загрузка по расписанию из OAHub.

Тестирование программного комплекса. Проведено тестирование (таблица) по методам расчетной схемы для построения карты смещений земной поверхности (рис. 2).

Таблица

Результаты тестирования системы в сравнении с программным комплексом ESA SNAP 6.0 на некоторых методах расчетной схемы Persistent Scatterer

Метод	Apache Spark API (время расчета, мин)	ESA SNAP Toolbox (время расчета, мин)
	Количество пар снимков: 27	
Размер снимка 24027x1517		
Apply-Orbit-File	2,27	24,85
Back-Geocoding	3,50	62,21
Deburst	1,20	13,61
Subset	0,41	8,21
Размер снимка 6 101×1 091		
Interferogram Formation	0,81	18,90
Topo Phase Removal	0,66	5,51

Примечание. Аппаратные характеристики кластера: Cloudera-master: VMWare (Intel 2xXeon E5-2650 8@2.00GHz) guest-host (20xCores, 18 Gb RAM). Cloudera-node1: VMWare (8xXeon E5-2620v2 6@2.10GHz) guest-host (8xCores, 18 Gb RAM). Cloudera-node2: Intel Core i5-2400K@3.5Ghz, 16Gb RAM. HDFS поверх системы NAS Dell PowerVault MD3800f (SAS 12x4Tb и 12x600Gb). Сетевые интерфейсы: 1Гбит/с. ПО ESA SNAP 6.0 запускалось на узле Cloudera-master, без поддержки Apache Spark API.

Заключение. В результате анализа различных подходов, применяемых при обработке радарных данных, а также обзора технологий распределенных вычислений был предложен и реализован распределенный программный комплекс на базе архитектуры массово-параллельного исполнения заданий экосистемы Apache Hadoop (компонент Apache Spark) для потоковой постобработки радарных снимков и построения карты смещений. Программная реализация содержит многофункциональный веб-интерфейс, позволяющий пользователю взаимодействовать с кластером, получая доступ к распределенной файловой системе HDFS, взаимодействовать с открытыми ресурсами космоснимков посредством RESTful API, создавать и исполнять существующие задания, ориентируясь на схемы полного цикла процессинга интерферометрических данных методам Persistent Scatterer.

Разработанный программный комплекс на использование как собственных расчетных пакетом модулей, так и привлечение сторонних разработок за счет гибкой программной инфраструктуре кластера Spark, позволяющего использовать изолированные контейнеры объектов **Executors** с возможностью запуска в среде JVM.

Новизной предложенного решения является взаимодействие разработанных алгоритмов на основе изолированного контекстного запуска заданий с данными в HDFS во время процедуры подготовки и на этапе полного цикла расчета смещений методом Persistent Scatters, где впервые применен интегральный подход к разработке масштабируемых FRONTEND- и BACKEND-составляющих программного комплекса на базе компонентов ReactJS + Redux и фрэймворк Apache Spark API и запуска заданий на основе RESTful API с поддержкой стандарта спецификации WPS, что дает возможность использования предлагаемого решения в практически любой ГИС, поддерживающей данный стандарт.

Результаты оценки технического уровня рассматриваемой работы показали высокие характеристики в плане производительности разработанного программного комплекса с сохранением требуемой точности результатов. В частности, адаптированные и интегрированные в систему Apache Spark модули комплекса и ПО ESA SNAP Toolbox возвращали идентичные массивы обработанных интерферометрических данных в попиксельном сравнении при скорости работы первых в несколько раз быстрее.

Предлагаемое комплексное решение, веб-портал и MPP-кластер могут быть развернуты на большом количестве узлов с гибридной аппаратной архитектурой, не требующих дорогостоящих систем хранения данных и вычислительных серверов, за счет применения распределенной файловой системы и менеджера ресурсов отдельно функционирующих рабочих узлов (Worker Nodes).

Список литературы

1. Бондур В.Г., Савин А.И. Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70–78.

2. Кантемиров Ю.И. Космический радарный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности и сооружений // Вест. СибГАУ. 2013. № 5 (51). С. 52–54.

3. Sbas Tutorial // Sarmap tutorials. URL: http://sarmap.ch/tutorials/sbas_tutorial_V_2_0.pdf.

4. Persistent Scatterer InSAR: A comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria / J.J. Sousaa, J.A. Hooperc, R.F. Hanssenc [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115, № 10. P. 2652–2663.

5. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / В.Н. Опарин, А.Д. Сашурин, А.В. Леонтьев [и др.]; отв. ред. Н.Н. Мельников. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 632 с.

6. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 3–28.

7. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 2. С. 3–46.

8. Simmons A.D., Kerekes J.P., Raqueno N.G. Hyperspectral monitoring of chemically sensitive plant sentinels // Proceeding SPIE 7457. Imaging Spectrometry XIV, 74570G, San Diego, CA. 2003. P. 45–51.

9. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности (Вега) / Е.А. Лупян, И.Ю. Савин, С.А. Барталев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 190–198.

10. See the Sea – Multi-User Information System Ocean Processes Investigations Based on Satellite Remote Sensing Data // Bollettino di Geofisica teorica ed applicata. An International Journal of Earth Sciences / O.Yu. Lavrova, E.A. Loupian, M.I. Mityagina [et al]. 2013. Vol. 54. P. 146–147.

11. Изучение продуктов извержений вулканов Камчатки с помощью гиперспектральных спутниковых данных в информационной системе VolSatView / Е.И. Гордеев, О.А. Гирина, Е.А. Лупян [et al.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 113–128.

12. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, Д.В. Ершов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 222–250.

13. Takeuchi S., Yamada H. Monitoring of forest fire damage by using JERS-1 InSAR // Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '02). Toronto, Ontario, Canada. 2002. P. 3290–3292.

14. Geohazard Tep. URL: https://geohazards-tep.eo.esa.int/.

15. Маклин С., Нафтел Дж., Уильямс К. Microsoft.NET Remoting: пер. с англ. М.: Торгово-издательский дом «Русская редакция», 2003. 384 с.

16. Berman F., Wolski R. Application-Level Scheduling on Distributed Heterogeneous Networks // Supercomputing: Proceedings of the ACM/IEEE conference. Pittsburgh, Pennsylvania USA, May 25–28, 1996. IEEE Computer Society. 1996. P. 39–39.

17. Maheswaran M., Ali S. Dynamic Matching and Scheduling of a Class of Independent Tasks onto Heterogeneous Computing Systems // Journal of Parallel and Distributed Computing. 1999. Vol. 59, № 2. P. 107–131.

18. CoG Kits: A Bridge between Commodity Distributed Computing and High-Performance Grids / G. Laszewski, I. Foster [et al.] // Proceedings of the ACM Java Grande 2000 Conference. San Francisco, CA, USA, June 3–5, 2000. ACM Press. P. 97–106.

19. Yang T., Gerasoulis A. DSC: Scheduling Parallel Tasks on an Unbounded Number of Processors // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 1994. Vol. 5, № 9. P. 951–967.

20. Qusay H. Mahmoud. Distributed Java Programming with RMI and CORBA // Oracle Technology Network. URL: http://www.oracle.com/technetwork/articles/javase/rmi-corba-136641.html.

21. Reyes-Ortiz J.L., Oneto L., Anguita D. Big Data Analytics in the Cloud: Spark on Hadoop vs MPI/OpenMPI // INNS Conference on Big Data 2015: Conference proceedings. San Francisco, USA, 8–10 August 2015. P. 121–130.

22. Mavridis I., Karatza H. Performance evaluation of cloud-based log file analysis with Apache Hadoop and Apache Spark // Journal of Systems and Software. 2017. Vol. 125. P. 133–151.

23. Polato I., Ré R., Goldman A., Kon F.A comprehensive view of Hadoop research –A systematic literature review // Journal of Network and Computer Applications. 2014. Vol. 46. P. 1–25.

24. Chen Xu. Big Data Analytic Frameworks for GIS (Amazon EC2, Hadoop, Spark) // Comprehensive Geographic Information Systems. 2017. Vol. 1. P. 148–152.

25. Verbesselt. J. Big Data: Techniques and Technologies in Geoinformatics // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. Vol. 35. Part B. P. 368–369.

26. Utilizing Cloud Computing to address big geospatial data challenges / Yang Chaowei, Yu Manzhu, Hu Fei [et al.] // Computers, Environment and Urban Systems. 2017. Vol. 61. Part B. P. 120–128.

27. Hadoop, Storm, Samza, Spark, and Flink: Big Data Frameworks Compared // Digital Ocean. URL: https://www.digitalocean.com/community/tutorials/hadoop-storm-samza-spark-and-flink-big-data-frameworks-compared.

28. Spark vs. Tez: What's the Difference? // Xplenty. URL: https://www.xplenty.com/blog/2015/01/apache-spark-vs-tez-comparison/.
29. Feature wise comparison between Apache Hadoop vs Spark vs Flink // TheServerSide. URL: http://www.theserverside.com/blog/Coffee-Talk-Java-News-Stories-and-Opinions/Feature-wise-comparison-between-Apache-Hadoop-vs-Spark-vs-Flink.

УДК 004.932.2

А.С. Пятаев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
e-mail: pyataev.alex@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТЕГОРИЙ СОСТОЯНИЙ СОСНЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПО ВИЗУАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Выделены лингвистические переменные и их термы для определения категорий состояний сосны на основе нечеткой логики по данным визуального осмотра. Для изучения шести категорий состояний сосны факторами, оказывающими влияние на определение категории, являются степень плотности кроны, прирост, степень усыхания ветвей, отпад коры, цвет хвои.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткий логический контроллер, лесопатология, категория состояния.

В настоящее время для определения категории состояния деревьев при лесопатологическом мониторинге специалист-лесопатолог вынужден лично изучать каждое дерево, находясь на лесной территории, что требует значительных материальных и других затрат. В какой-то степени лесопатолог – это врач, который ставит диагноз лесному участку, качество постановки такого диагноза напрямую зависит от квалификации лесопатолога. Автоматизированная система оценки состояния дерева дает основу для принятия решений о состоянии леса на данном участке обследования. Сложность определения категории состояния дерева заключается в размытых, субъективных понятиях, на базе которых лесопатолог делает выводы об отнесении дерева к той или иной категории. Для оперирования такими понятиями используется нечеткая логика. В настоящее время нечеткая логика широко применяется в различных сферах человеческой деятельности. Так, в работе [1] представлен нечеткий контроллер для решения задачи установки желаемого микроклимата в помещении теплицы. При этом нечеткими значениями, обрабатываемыми логическим контроллером, являются температура внутри и снаружи теплицы, внутренняя и внешняя влажность. Авторы [2] нашли применение нечеткой логике для решения экологических проблем, связанных с ветровой эрозией в регионе Лагуат, Алжир. Рассматриваются шесть причинных факторов, получаемых путем применения нечеткой логики к каждому используемому параметру: почва, растительный покров, коэффициент ветра, сухость почвы, рельеф местности и чувствительность почвенного покрова. В работе [3] предложена методология оценки состояния зданий после землетрясений, позволяющая оценить уровень ущерба, рассматривая даже неточную или неполную информацию. Ущерб зависит от уровней повреждений, наблюдаемых на каждом из «несущих

© Пятаев А.С., 2018

элементов» (колонны, балки, стены, плиты перекрытия и др.) и «не несущих элементов» (лестницы, перегородки, фасад, балконы и т.д.).

В задачах лесопатологического мониторинга, согласно Постановлению Правительства РФ от 20.05.2017 № 607 «О Правилах санитарной безопасности в лесах» [4], для хвойных пород выделяется одиннадцать категорий состояния. Шесть рассмотренных в работе категорий состояния, их признаки приведены в табл. 1. Остальные пять категорий, к которым относятся ветровал, бурелом, снеголом и аварийные деревья, являются деревьями поваленными и выходят за границы интересов исследования.

Таблица 1

Характеристика категорий состояний хвойных пород

Категория	Признаки
1 – здоровые (без признаков ослабления)	Крона густая (для данной породы, возраста и условий местопроизрастания); хвоя зеленая; прирост текущего года нормального размера
2 – ослабленные	Крона разреженная; хвоя светло-зеленая; прирост уменьшен, но не более чем наполовину; отдельные ветви засохли
3 – сильно ослабленные	Крона ажурная; хвоя светло-зеленая, матовая; прирост слабый, менее половины обычного; усыхание ветвей до 2/3 кроны; плодовые тела трутовых грибов или характерные для них дупла
4 – усыхающие	Крона сильно ажурная; хвоя серая, желтоватая или желто-зеленая; прирост очень слабый или отсутствует; усыхание более 2/3 ветвей
5 – свежий сухостой	Хвоя серая, желтая или красно-бурая; кора частично опала
6 – старый сухостой	Живая хвоя отсутствует; кора и мелкие веточки осыпались частично или полностью; стволовые вредители вылетели; в стволе мицелий дереворазрушающих грибов, снаружи плодовые тела трутовиков

На рис. 1 приведены примеры сосны различных категорий состояния.

а *б* *в*

г *д* *е*

Рис. 1. Категории состояния хвойных деревьев на примере сосны: *а* – здоровая (без признаков ослабления); *б* – ослабленная; *в* – сильно ослабленная; *г* – усыхающая; *д* – свежий сухостой; *е* – старый сухостой

Для определения категории состояния дерева на базе нечеткой логики определены следующие лингвистические переменные: «степень плотности кроны», «прирост», «степень усыхания ветвей», «отпад коры», «цвет хвои» (табл. 2).

Таблица 2

Лингвистические переменные и их термы

Имя переменной	Термы
Степень плотности кроны	Густая, разреженная, ажурная, сильно ажурная
Прирост	Нормальный, уменьшен, слабый, очень слабый или отсутствует
Степень усыхания ветвей	Отсутствует, засохли отдельные ветви, усыхание до 2/3 кроны, усыхание более 2/3 кроны
Отпад коры	Отсутствует, частичный, полный
Цвет хвои	Зеленый, светло-зеленый, желто-зеленый, желтоватый, желтый, красно-бурый, серый

На основе эмпирических данных специалистов-лесопатологов центра защиты леса Красноярского края были выделены границы и вид термов полученных лингвистических переменных. Характеристические функции для лингвистических переменных заданы в табличном виде. В табл. 3 представлены значения термов лингвистической переменной «степень плотности кроны». Такие таблицы построены для каждой лингвистической переменной.

Таблица 3

Узловые точки значений термов лингвистической переменной «степень плотности кроны»

% густоты кроны	Густая	Разреженная	Ажурная	Сильно ажурная
100	1	0	0	0
95	0,8	0,2	0	0
90	0,3	0,6	0	0
85	0,1	1	0	0
80	0	1	0	0
75	0	0,6	0,3	0
70	0	0,2	0,6	0
65	0	0	1	0
60	0	0	1	0
55	0	0	0,6	0,2
50	0	0	0,3	0,3
45	0	0	0,2	0,6
40	0	0	0	0,8
35	0	0	0	1
30	0	0	0	1
25	0	0	0	1
20	0	0	0	1
15	0	0	0	1
10	0	0	0	1
5	0	0	0	1
0	0	0	0	1

На рис. 2 и 3 показаны примеры графиков термов лингвистических переменных «степень плотности кроны» и «прирост».

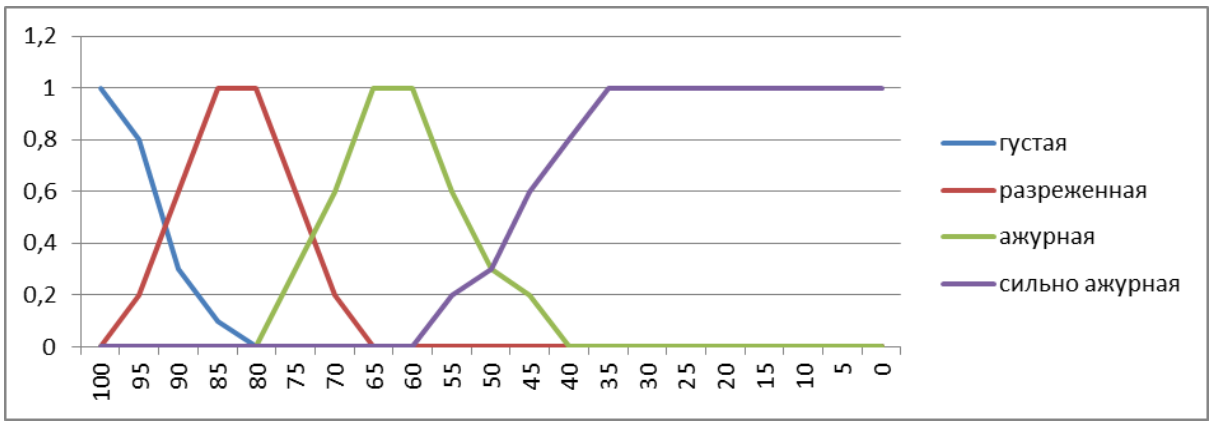


Рис. 2. График термов лингвистической переменной «степень плотности кроны»

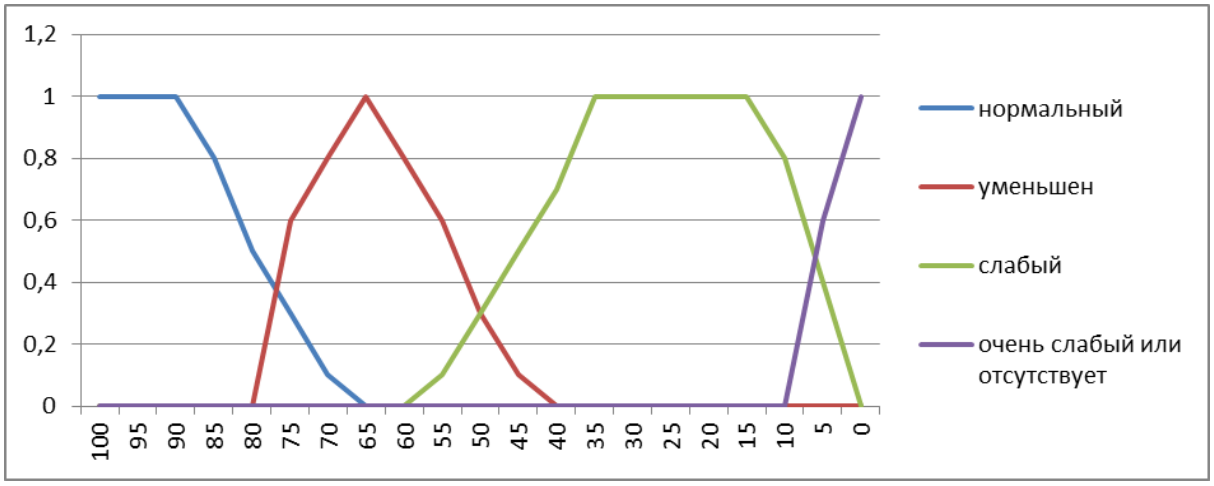


Рис. 3. График термов лингвистической переменной «прирост»

Для отнесения дерева к определенной категории состояния построена база нечетких правил.

Заключение. Особенностью лесопатологического обследования является использование размытых, субъективных понятий при отнесении дерева к той или иной категории состояния. Для оперирования такими понятиями в работе предложено использование теории нечетких множеств. Определены лингвистические переменные и на основе эмпирических данных выделены границы и вид термов полученных переменных.

Список литературы

1. Rim Ben Alia, Salwa Bouadilab. Abdelkader Mamia Development of a Fuzzy Logic Controller applied to an agricultural greenhouse experimentally validated // Applied Thermal Engineering. 2018. № 141. P. 798–810.

2. Guettouche Application of fuzzy logic approach for wind erosion hazard mapping in Laghouat region (Algeria) using remote sensing and GIS / Djouher Saadoud, Mohamed Hassani, Francisco José Martin Peinado, Mohamed Saïd // Aeolian Research. 2018. № 32. P. 24–34.

3. Sid Ahmed, Mohamed Abed. Ahmed Mebarki Post-earthquake assessment of buildings damage using fuzzy logic // Engineering Structures. 2018. № 166. P. 117–127.

4. Постановление правительства Российской Федерации о правилах санитарной безопасности в лесах от 20.05.2017 № 607. URL: http://docs.cntd.ru/document/436736467.

УДК 004.932.2

А.В. Пятаева, М.В. Верхотурова

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: adventuretime66@yandex.ru

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЛИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВИОЛЫ – ДЖОНСА

Предложен алгоритм выделения лиц по видеоизображениям с помощью метода Виолы – Джонса. При работе алгоритма вычисляются признаки Хаара, используется каскадная классификация. Экспериментальные исследования, проведенные на видеопоследовательностях из баз данных Labeled Faces in the Wild Home и Aberdeen, подтверждают эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: обнаружение лиц, метод Виолы – Джонса, примитивы Хаара.

Введение. Распознавание лиц является активно разрабатываемой областью научных исследований как минимум пять десятилетий [1]. Подходы к решению задачи распознавания лиц эволюционировали от сопоставления геометрических признаков [2; 3] и учета текстурных особенностей [4] до применения технологий глубокого обучения [5; 6]. При этом выполняется распознавание лиц не только людей, но и обезьян [7], свиней для решения задачи идентификации животных на ферме [8] и даже статуй Бодхисаттвы [9]. Первым этапом распознавания лиц является обнаружение лица на видеопоследовательности или изображении, т.е. классификация «один против всех». В таком случае объекты изображения делятся на два класса «лицо», «не лицо». Для решения задачи детектирования лиц в настоящей работе использован метод Виолы – Джонса.

Метод Виолы – Джонса для обнаружения лиц. Метод Виолы – Джонса разработан и представлен Полом Виолой и Майклом Джонсом [10]. Особенностью этого метода является обработка видеопотока в режиме реального времени. Алгоритм Виолы – Джонса позволяет классифицировать различные объекты, но основной областью его применения в настоящее время является распознавание лиц [11; 12]. В основе работы метода Виолы – Джонса лежит выделение признаков, подобных признакам Хаара и использование каскадной модели классификации.

Вычисление признаков Хаара выполняется следующим образом. По полутоновому изображению перемещается сканирующее окно, состоящее из смежных прямоугольников – примитивов Хаара (рис. 1). Далее суммируются интенсивности пикселов в этих областях, вычисляется разность между суммами. Эта разность и определяет значение признака в заданной точке изображения. Известно, что для лица человека на изображении области в районе глаз темнее чем в районе щек. Выделяя такие характерные особенности изменения интенсивности пикселов для лица, становится возможным отделить его от других объектов изображения. Таким образом, путем перемещения сканирующего окна по всему изображению вычисляются признаки Хаара, дающие точечное значение перепада яркости пикселов области. Затем, по порогу выполняется отнесение исследуемой области к классам «лицо», «нет лица».

Признаки Хаара в алгоритме Виолы – Джонса организуются в каскадный классификатор. Идея каскадной классификации заключается в постепенном увеличении количества применяемых примитивов, что увеличивает скорость работы алгоритма, отсеивая регионы, в которых лицо не найдено на ранних этапах (рис. 2).

© Пятаева А.В., Верхотурова М.В., 2018

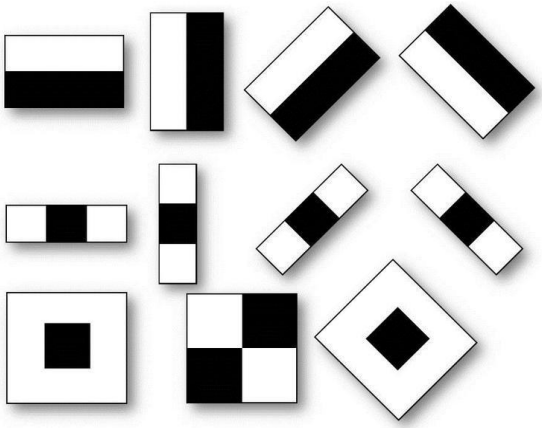


Рис. 1. Примитивы Хаара

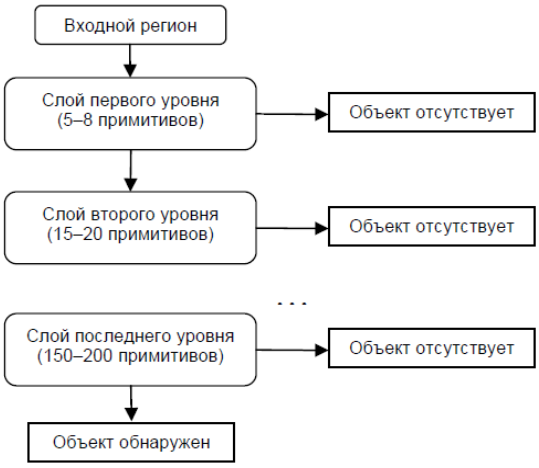


Рис. 2. Каскадная классификация в методе Виолы – Джонса

На основе полученных данных формируются векторы признаков. Далее представлены шаги разработанного алгоритма Виолы – Джонса для решения задачи обнаружения лиц.

Шаг 1. Получение видеопоследовательности (возможно использование данных с веб-камеры).

Шаг 2. Преобразование видеопоследовательности в серию видеоизображений с последующим выбором кадра для работы.

Шаг 3. Преобразование цветного изображения в полутоновое и выравнивание яркостей изображения с использованием метода эквализации гистограммы.

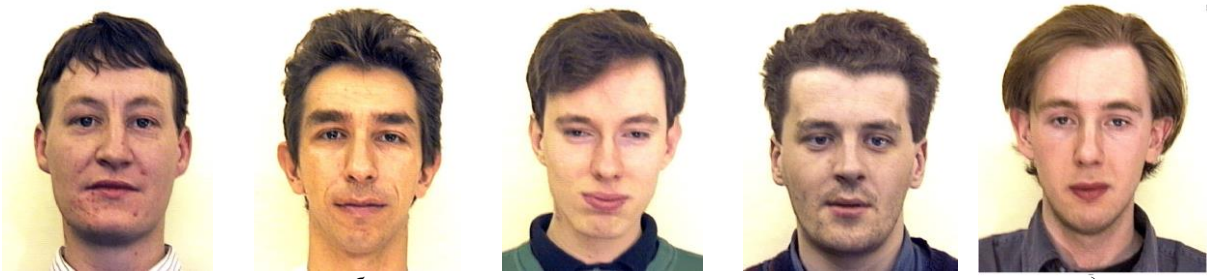
Шаг 4. Поиск лица путем выделения признаков Хаара методом вычисления характерных перепадов яркостей пикселов.

Шаг 5. На обнаруженном лице выполняется поиск глаз с использованием примитивов Хаара.

Шаг 6. Обозначение лица и глаз геометрической фигурой для вычисления показателей точности работы алгоритма.

Результатом работы алгоритма классификации Виолы – Джонса является набор признаков для каждой области, состоящий из 200 значений перепадов яркостей, позволяющий отделить изображения, содержащие лицо, от изображений без него.

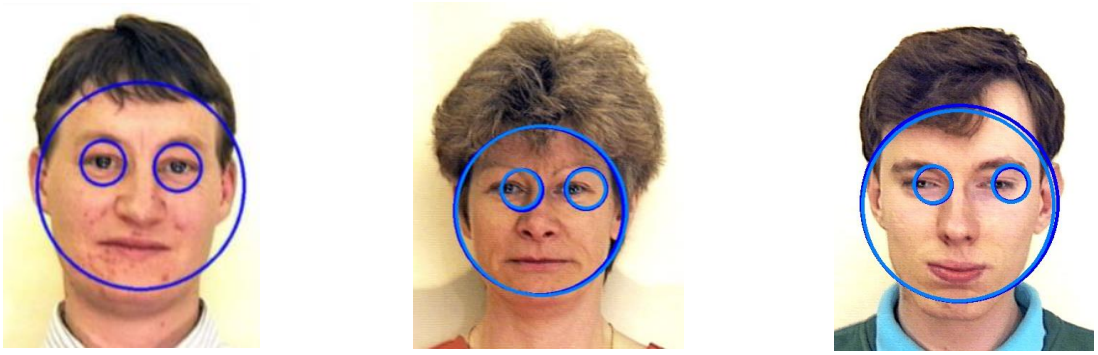
Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований использована выборка видеоизображений, включающая 4 916 примеров лиц и 8500 примеров с отсутствием лиц, взятых из хранилища данных Labeled Faces in the Wild Home [13] и набора данных Aberdeen [14]. Обучающая выборка составила 80 %, тестовая выборка – 20 % от общей выборки. Примеры изображений приведены на рис. 2. Кроме того, авторами проведены экспериментальные исследования с использованием данных, полученных с web-камеры.



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 3. Использованные изображения людей:
а – dhands.jpg; *б* – jim.jpg; *в* – iroy.jpg; *г* – paul.jpg; *д* – dpearson.jpg

Примеры из обучающей выборки содержали лица людей с различным наклоном и поворотом головы, в различных условиях освещения. Минимальный размер изображения обучающей выборки составил 24×24 пиксела, максимальный – 624×544. Результаты работы алгоритма Виолы – Джонса показаны на рис. 4.



а *б* *в*

Рис. 4. Результат обнаружения лица: *а* – dhands.jpg; *б* – irene.jpg; *в* – iroy.jpg

Для изображений, не содержащих лиц, предложенный алгоритм показал точность обнаружения, равную 100 % при полном отсутствии ложных срабатываний. Для изображений, содержащих лицо, точность обнаружения составила также 100 %. Алгоритм показывает устойчиво высокую точность обнаружения лиц при угле поворота головы на изображении от 0 до 30 градусов, так как маски Хаара используют прямоугольные классификаторы. Для обнаружения лиц при угле поворота головы на изображении более 30 градусов необходимо использование масок для лица в профиль. Также в ходе экспериментов установлено, что масштабирование и поворот самого изображения на точность обнаружения лица не влияют.

Заключение. В работе предложен алгоритм, позволяющий обнаружить лицо и глаза на видеоизображении. В основе этого алгоритма лежит метод Виолы – Джонса, использующий маски Хаара для вычисления характерных особенностей лица и глаз. Для обнаружения лица и глаз в режиме реального времени применяется каскадная классификация. Метод Виолы – Джонса на тестовой выборке, состоящей из 2 635 изображений, показал 100 % эффективность.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-07-000121 А.

Список литературы

1. Bledsoe W.W. Some Results on Multicategory Pattern Recognition // J. ACM. 1966. № 13. P. 304–316.

2. Turk M., Pentland A. Eigenfaces for recognition // J. Cognit. Neurosci. 1991. № 3 (1). P. 71–86.

3. Belhumeur P.N., Hespanha J.P., Kriegman D.J. Eigenfaces vs. fisherfaces: recognition using class specific linear projection // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1997. № 19 (7). P. 711–720.

4. Pose-robust face recognition with Huffman-LBP enhanced by Divide-and-Rule strategy / Li-Fang Zhou, Yue-Wei Du, Wei-Sheng Li [et al.] // Pattern Recognition. 2018. Vol. 78. P. 43–55.

5. Deepface: closing the gap to human-level performance in face verification / Y. Taigman, M. Yang, M. Ranzato, L. Wolf // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. P. 1701–1708.

6. Parkhi O.M., Vedaldi A., Zisserman A. Deep face recognition // Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC). 2015. Vol. 1. P. 41.1–41.12.

7. Witham Claire L. Automated face recognition of rhesus macaques // Journal of Neuroscience Methods. 2018. Vol. 300. P. 157–165.

8. Hansen Mark F., Melvyn Smith L., Lyndon N., Smith N., Salter Michael G., Baxter Emma M., Farish Marianne, Grieve Bruce Towards on-farm pig face recognition using convolutional neural networks Computers in Industry. 2018. № 98. P. 145–152.

9. Bodhisattva head images modeling style recognition of Dazu Rock Carvings based on deep convolutional network / Wang Haiyan, He Zhongshi, Huang Yongwen [et al.] // Journal of Cultural Heritage. 2017. Vol. 27. P. 60–71.

10. Viola P., Jones M.J. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features // Proceedings IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2001. Vol. 1. P. 511–518.

11. An efficient and cost effective FPGA based implementation of the Viola-Jones face detection algorithm / P. Irgens, C. Bader, T. Lé [et al.] // Hardware X. 2017. № 1. P. 68–75.

12. A software-based dynamic-warp scheduling approach for load-balancing the viola-jones face detection algorithm on gpus / T. Nguyen, D. Hefenbrock, J. Oberg [et al.] // J. Parallel Distrib. Comput. 2013. № 73 (5). P. 677–685.

13. Labeled Faces in the Wild Home database. URL: http://vis-www.cs.umass.edu/lfw/.

14. Aberdeen dataset. URL: http://pics.psych.stir.ac.uk/2D_face_sets.htm.

УДК 004.023, 519.688

А.П. Раевич

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: raevich.ap@yandex.ru

ПОСТРОЕНИЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АНАЛИЗА ФОРМАЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ

На основе изучения методов структурирования знаний о предметной области с использованием анализа формальных понятий выполняется построение модели представления качественной и количественной информации об объекте исследования на базе онтологического подхода. Статья посвящена рассмотрению подходов, направленных на формализацию предметной области.

Ключевые слова: анализ формальных понятий, рекомендательные системы, извлечение знаний, онтология

Введение. В настоящее время в области интеллектуального анализа данных ведутся интенсивные работы по разработке методов, моделей, алгоритмов и программных средств поддержки процессов обработки больших данных.

Эффективность анализа больших данных в значительной степени определяется возможностями современных компьютерных инфраструктур и применяемых программных средств по параллельной обработке больших объемов данных, включающих в себя программную платформу, управляющую декомпозицией задачи, параллельной обработкой подзадач и сборкой результатов.

В соответствии с описанными в [1] классификациями рекомендательных систем онтология как структура для представления всех компонент знаний рекомендательной системы должна объединить в себе знания о предметной области рекомендаций и о персональном профиле интересов пользователя.

Классификация рекомендательных систем. К рекомендательным системам относится такой класс систем принятия решений, которые, используя разнородную ин-

© Раевич А.П., 2018

формацию о предпочтениях человека в различных контекстах, пытаются спрогнозировать его предпочтения [1].

Модель первого поколения рекомендательных систем, описанная в [2], основана на трех матрицах. Первая матрица $U = \{u_{i,j}\}$ задает по строкам множество имен пользователей, а по столбцам – множество имен атрибутов пользователей. Вторая матрица $P = \{p_{i,j}\}$ задает по строкам множество имен товаров/услуг, а по столбцам – множество атрибутов (свойств) этих товаров/услуг. Третья матрица $R = \{r_{i,j}\}$ имеет в качестве строк имена пользователей, а в качестве столбцов – имена товаров/услуг. Таким образом, ее элемент $r_{i,j}$ задает значение рейтинга товара/услуги *j*, присвоенное ему пользователем *i*. Задача рекомендательной системы состоит в том, чтобы спрогнозировать значение рейтинга $r_{i,j}$, который будет присвоен пользователем новому для него товару/услуге в матрице R.

В [2] автором выделяются три базовых метода принятия решений для рекомендательных систем первого поколения:

- методы, основанные на фильтрации контента, где прогноз рейтинга пользователя формируется по рейтингам других товаров/услуг, которые пользователь ранее оценивал;
- методы коллаборативной фильтрации, основанные на предположении о том, что рейтинг пользователя для нового товара/услуги будет сходен с рейтингами других пользователей с похожими интересами по отношению к этому товару/услуге;
- гибридные методы, которые комбинируют методы фильтрации контента и коллаборативной фильтрации.

Важным отличием рекомендательных систем второго поколения является учет контекста, в котором пользователю предлагается тот или иной товар/услуга. Таким образом, рекомендательный рейтинг для пользователя будет зависеть не только от свойств товара/услуги, но и от дополнительной переменной C [3]: $R : U \times P \times C \to R$. В роли атрибутов могут выступать время, место, социальный контекст и т.д.

Формальное представление контекста данного вида систем реализуется в виде кубов OLAP, где каждое измерение контекста $D_1,...D_n$ рассматривается как размерность. Контекстно-зависимое пространство решений (рекомендаций) определяется как $S = D_1 \times D_2 \times ... \times D_n$, а рейтинг определяется как отображение $R : D_1 \times D_2 \times ... \times D_n \to R$.

Рекомендательные системы третьего поколения должны давать объяснения выбора пользователя, поэтому они должны учитывать экономические, психологические и другие факторы, определяющие выбор пользователя.

На первый план для рекомендательных систем третьего поколения выходит представление модели интересов и предпочтений пользователя в терминах семантических понятий естественного языка. Онтологии при этом рассматриваются в качестве семантической структуры для представления всех компонент знаний рекомендательной системы.

Применение метода анализа формальных понятий для извлечения знаний. Используемый для анализа собираемых данных метод анализа формальных понятий (АФП) был сформулирован Рудольфом Вилле, применение метода подробно описано в трудах [4–6]. С помощью данного метода анализа могут быть визуализированы объектно-признаковые зависимости, определенные с помощью соответствия Галуа. Формальные понятия, определяемые с помощью соответствия Галуа, представляют собой пары множеств вида (объем, содержание).

Формальным контекстом метода АФП называется тройка:

$$K =< G, M, I > \quad , \qquad (1)$$

где G – множество объектов; M – множество признаков, а отношение $I \subseteq G \times M$ говорит о том, какие объекты какими признаками обладают.

Для произвольных $A \subseteq G$ и $B \subseteq M$ определены операторы Галуа:

$$A' = \{m \in M \mid \forall g \in A(g\ \mathrm{Im})\}$$

$$B' = \{g \in G \mid \forall m \in B(g\ \mathrm{Im})\}$$

Оператор ", называемый двукратным применением оператора ', также является оператором замыкания: он идемпотентен ($A = A''$), монотонен ($A \subseteq B$ влечет $A'' \subseteq B''$) и экстенсивен ($A \subseteq A''$). Множество объектов $A \subseteq G$, такое, что $A'' = A$ называется замкнутым. Аналогично для замкнутых множеств признаков – подмножеств множества M .

Формальным понятием контекста K называется пара множеств (A, B) таких, что $A \subseteq G, B \subseteq M, A' = B, B' = A$. Множества A и B замкнуты и называются объемом и содержанием формального понятия (A, B) соответственно. Для множества объектов A множество их общих признаков A' служит описанием сходства объектов из множества A, а замкнутое множество A'' является кластером сходных объектов (с множеством общих признаков A').

Импликацией формального контекста $K =< G, M, I >$ в анализе формальных понятий называется признаковая зависимость вида $A \to B$, где $A, B \subseteq M$, при условии, что все объекты, обладающие A, также обладают всеми признаками из B, т.е. $A' \subseteq B'$. Импликация в АФП является частным случаем такой признаковой зависимости как ассоциативное правило в разработке данных, это в точности ассоциативное правило с достоверностью, равной 1.

Связь импликаций и функциональных зависимостей позволила использовать базис импликаций Дюкена-Гига для компактного представления функциональных зависимостей, используемых в теории баз данных в виде их ограниченного множества, из которого все оставшиеся функциональные зависимости данного многозначного контекста (таблицы данных) выводимы по правилам Армстронга [3].

Онтологическая модель предметной области. В работе [1] для структурирования знаний о предметной области авторами используется четырехуровневая модель представления знаний: онтология, представление общих (теоретических) знаний, представление эмпирических знаний и оценочных (вероятностных) знаний:

1) на первом уровне модели описывается онтология предметной области, содержащая набор ключевых понятий, на языке которых описывается данная предметная область, а также определения этих понятий;

2) второй уровень модели содержит универсальные – общие утверждения, законы и постулаты предметной области;

3) третий уровень модели состоит из эмпирических данных, содержащих описание конкретных прецедентов предметной области;

4) четвертый уровень содержит вероятностные и оценочные знания, которые порождаются из внешних источников или из информационных структур рассматриваемой области.

Таким образом, каждый профиль пользователя $\{a_i\}$ представляется набором значений параметров, для которых описывается множество признаков (сигнатурных предикатов), истинных для рассматриваемого человека.

Для каждого профиля возможно построить одноэлементную модель $a_i = (\{a_a\}, \sigma \cup c_{ai})$, называемую прецедентом предметной области, где $\sigma = \sigma_M$ – сигна-

тура предметной области, состоящая из признаков индивидуальных показателей пользователя; c_{ai} – персонифицированный идентификатор пользователя.

Заключение. В задачах построения рекомендательных систем большую важность приобретает проблема автоматизации построения онтологий. Так, в работе [1] используется алгоритм Apriori для поиска ассоциативных правил для произвольных наборов признаков и объектов поведенческой деятельности пользователей. Отбор признаков на этапе предварительного анализа данных позволяет улучшить точность классификаций.

Необходимо отметить, что специфика формируемой действительности определяется глубиной и границами человеческого познания, эмоциональным отношением и готовностью действовать в нем. Современная техническая и информационная функциональность, в свою очередь, определяют условия для процессов приема и обработки информации многих видов профессиональной и непрофессиональной деятельности.

Список литературы

1. Ricci F., Rokach L., Shapira B. Introduction to Recommender Systems Handbook. Springer. 2011. P. 1–35.

2. Tuzhilin A. Keynote presentation at International Conference on Data Mining (ICDM 2013) Dallas, Texas, December, 2012.

3. Incorporating contextual information in recommender systems using a multidimensional approach / G. Adomavicius, R. Sankaranarayanan, S. Sen, A. Tuzhilin // ACM Transactions on Information Systems (TOIS). 2005. No. 23(1). pp. 103–145.

4. Долгушева Е.В., Пальчунов Д.Е. Теоретико-модельные методы порождения знаний о предпочтениях абонентов мобильных сетей. // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия «Информационные технологии». 2016. № 2. С. 5–16.

5. Игнатов Д.И., Каминская А.Ю., Константинов А.В. Анализ данных в краудсорсинговых проектах // Открытые системы СУБД. 2013. № 1. С. 36–39.

6. Пульманс Й., Игнатов Д.И. Анализ формальных понятий и его приложения // Инженерия знаний и технологии семантического веба. 2011. № 2.

УДК 537.874, 528.88

А.В. Репин, О.В. Родионова, Е.С. Крошка

Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия
e-mail: repinrew@mail.ru

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ГЛИНАХ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ И ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Приведены экспериментальные данные измерения комплексной диэлектрической проницаемости каолиновой и бентонитовой глин при увлажнении дистиллированной водой в диапазоне частот от 10 до 8,5 ГГц при температурах от –15 до +25 °С. Проведено моделирование экспериментальных зависимостей моделью, учитывающей релаксацию связанной воды и релаксации, вызванные поляризацией на границах «связанная вода – минерал» и «связанная вода – воздух». Показано, что параметры модели, описывающие релаксационные процессы в каолиновой и бентонитовой глинах, могут существенно отличаться.

© Репин А.В., Родионова О.В., Крошка Е.С., 2018

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая релаксация, межслойная поляризация, каолиновая глина, бентонитовая глина, связанная вода.

Введение. В настоящее время для исследования свойств пород и грунтов применяется весь спектр электромагнитных волн. Из анализа спектров комплексной диэлектрической проницаемости $\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$ (КДП) в диапазоне частот от долей герц до десятков ГГц можно получать информацию о содержании воды, пористости, размерах пор и других физических параметрах. На частотах выше 1–2 ГГц КДП увлажненных пород определяется ориентационной поляризацией молекул связанной и свободной воды и зависит в основном от содержания воды и от содержания глины [1]. На частотах ниже 1 кГц основную роль играет поляризация двойного электрического слоя на границе вода-минерал [2; 3]. Благодаря высокой удельной поверхности глин поляризация двойного слоя на границе «вода – твердая фаза» проявляется в спектрах на частотах ниже 1 ГГц, приводя к сильному возрастанию действительной и мнимой частей КДП при уменьшении частоты.

В промежуточном диапазоне от 1 кГц до 1 ГГц, по мнению автора работы [4], основное влияние оказывает поляризация Максвелла – Вагнера, обусловленная поляризацией межфазных границ. Однако в работе [2] показано, что поляризация Максвелла – Вагнера не объясняет все процессы, происходящие на этих частотах.

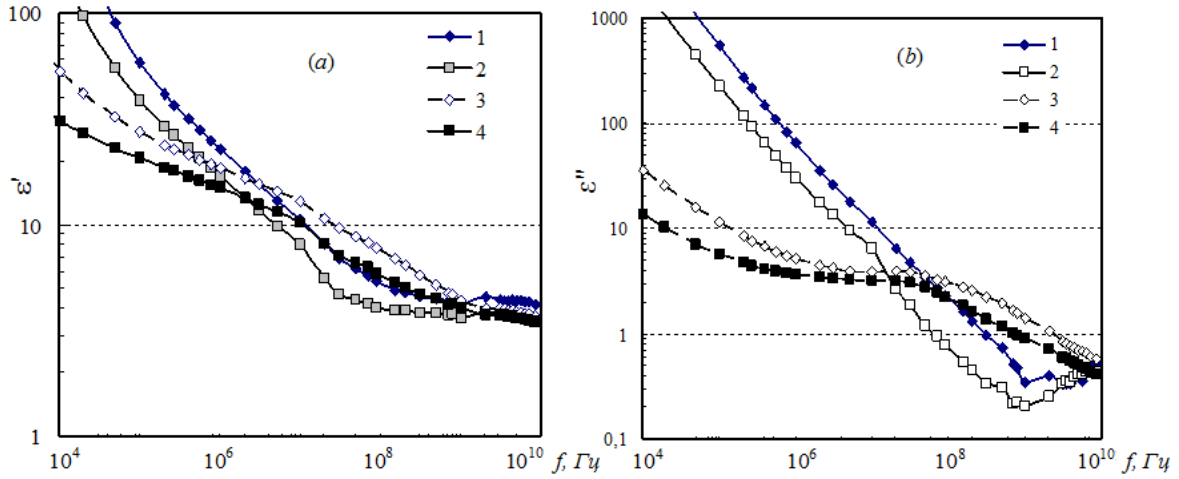
В работе [5], что на частотах ниже 100 МГц, диэлектрическая проницаемость ощутимо зависит от температуры и электрической проводимости вещества. Авторы [6] показали, что существенную роль оказывает и удельная площадь поверхности минерала. Ими же отмечено [6], что при частичном насыщении возникает еще один релаксационный процесс, предположительно обусловленный поляризацией на границе «вода – воздух».

Таким образом, для корректной интерпретации данных электромагнитных исследований в диапазоне частот от десятков килогерц до 1 ГГц необходимо учитывать различные механизмы поляризации на межфазных границах.

Экспериментальные результаты. Были проведены диэлектрические измерения каолиновой и бентонитовой (Na-форма) глин увлажняемых дистиллированной водой в диапазоне частот от 1 кГц до 8,5 ГГц и в диапазоне температур от –15 до 25 ºС. Измерения проводились в ячейке с использованием векторного анализатора цепей ROHDE&SCHWARZ ZNB8 и измерителя импедансов KEYSIGHT TECHNOLOGIES E4990. Методика измерения подробно изложена в [7]. При температурных измерениях использовалась климатическая камера ТН-МЕ-0,25 с рабочим диапазоном температур от –20 до 80 ºС, с погрешностью установки температуры 0,3 ºС.

На частотных зависимостях действительной ε' и мнимой ε" частей КДП можно выделить три области (рис. 1). В высокочастотной от 1–2 ГГц до 8,5 ГГц значения ε' слабо меняются от частоты (рис. 1a), а значения ε" возрастают (рис. 1b) (это видно в каолиновой глине), что говорит о релаксации, вызванной ориентационной поляризации молекул воды. Ниже частоты 1 ГГц значения как ε', так и ε" начинают возрастать. Этот процесс мы связываем с релаксацией вызванной межслойной поляризацией на границе «вода – минерал». Однако в области от 1 МГц до 100 МГц хорошо заметно возрастание действительной части КДП, причем в бентонитовой глине рост виден лучше. Релаксационный процесс, возникающий в этом частотном диапазоне, мы связываем с поляризацией на границе «вода – воздух».

В работе [1] показано, что в глинах выделяют два типа воды: связанную и свободную, различных по своим свойствам. В данном исследовании мы ограничились малыми влажностями и поэтому рассматривали только связанную воду. В каолиновой глине максимальной количество связанной воды составляет 0,09 $см^3/см^3$, а в бентонитовой – 0,2 $см^3/см^3$.



а *б*

Рис. 1. Частотные зависимости (*а*) действительной ε' и (*б*) мнимой частей КДП для каолиновой (*1*, *2*) объемной влажностью 0,059 см^3/см^3 и бентонитовой глины (*3*, *4*) объемной влажностью 0,067 см^3/см^3, увлажненных дистиллированной водой при температурах 25 ºС (*1*, *3*) и –5 ºС (*2*, *4*)

Моделирование и обсуждение результатов. При моделировании нами была применена комбинированная модель, описанная в [8]. В ней предполагается, что релаксационные процессы, проходящие в образце, можно представить как сумму процессов. При том процессы, связанные с ориентационной поляризацией воды и поляризацией на границе «связанная вода – минерал» можно описать рефракционной моделью, а процесс релаксации на границе «связанная вода – воздух» моделью Коула – Коула.

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon'' = (\dot{n})^2 + \frac{\Delta\varepsilon_{S3}}{1+(i\omega\tau_3)^{1-\alpha}} - i\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}.$$

Частотная зависимость связанной воды может быть выражена моделью с двумя процессами релаксации:

$$(\dot{n})^2 = \dot{\varepsilon}_b = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{S1}-\varepsilon_\infty}{1+i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\varepsilon_{S2}}{1+i\omega\tau_2},\ \dot{n} = \dot{n}_d + (\dot{n}_b - 1)W \qquad \text{если } W \le W_t,$$

где $\dot{\varepsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость; ε_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость; ε_S – статическая диэлектрическая проницаемость; τ – время релаксации; $\Delta\varepsilon_S$ – «амплитуда» релаксации; α – коэффициент распределения времен релаксации. Вклад ионной проводимости учитывается параметром σ, *i* – мнимая единица, ω – циклическая частота, ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума. Параметр *W* – объемная влажность образца в см^3/см^3, *Wt* – максимальное содержание связанной воды. Индексы 1, 2, 3 описывают процессы, вызванные ориентационной поляризацией, поляризацией на границе «связанная вода – минерал» и «связанная вода – воздух» соответственно. Индекс *d* – относится к сухой глине, индекс *b* – к связанной воде.

Моделирование показало, что для релаксационного процесса вызванного ориентационной поляризацией молекул воды значения ε_{S1} (рис. 2, *а*) в каолиновой глине при положительных температурах близко к значениям диэлектрической проницаемости воды (≈80), а в бентонитовой глине значения существенно меньше. Это говорит о том, что при малых влажностях молекулы воды по-разному взаимодействуют с частицами минерала, и каолиновая глина, вероятно, обладает гидрофобными свойствами. Времена релаксации также отличаются, в бентонитовой глине их значения выше (рис. 2, *б*). При этом температурные зависимости похожи: при уменьшении температуры время релаксации увеличивается.

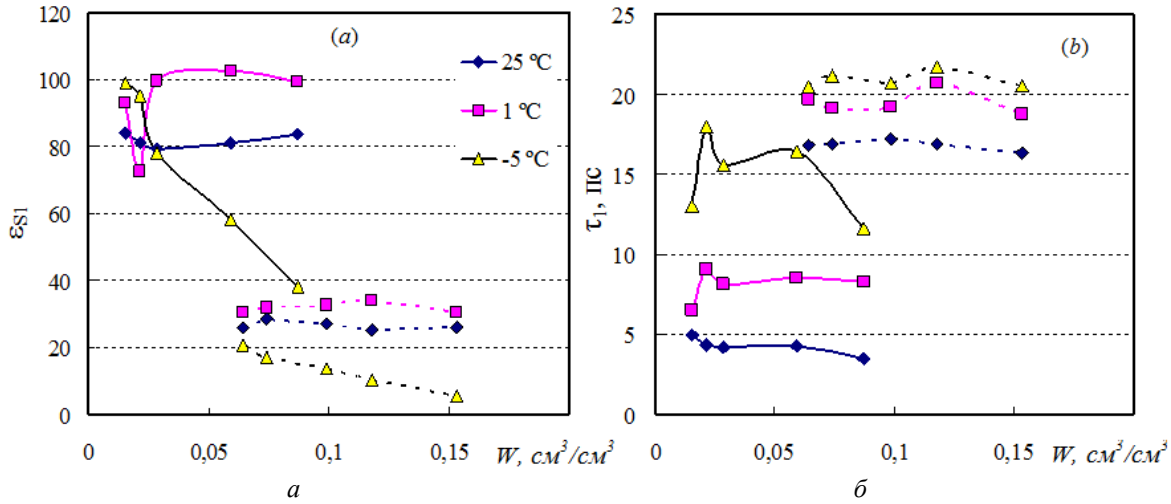


Рис. 2. Зависимость (*а*) статической проницаемости ε_{S1} и (*б*) времени релаксации τ_1 для каолиновой (сплошная линия) и бентонитовой глины (штриховая линия) от объемной влажности при различных температурах

Значения «амплитуды» релаксации $\Delta\varepsilon_{S3}$ для релаксационного процесса на границе «связанная вода – воздух» (рис. 3, *а*) выше в бентонитовой глине, что и видно на частотных зависимостях на рис. 1. Значения времен релаксации больше в бентонитовой глине (рис. 3, *б*), это говорит о том, что релаксационный процесс должен начинаться на более низкой частоте, что также видно на рис. 1. При уменьшении температуры времена релаксации увеличиваются, что говорит о смещении релаксационного процесса вниз по частоте, что и показано на экспериментальных зависимостях.

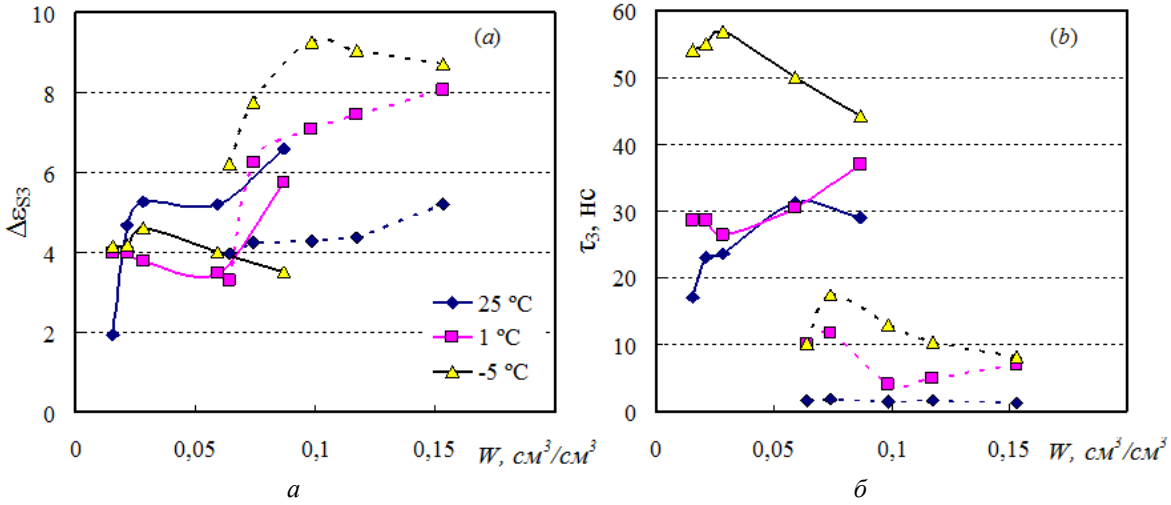


Рис. 3. Зависимость (*а*) «амплитуды» релаксации $\Delta\varepsilon_{S3}$ и (б) времени релаксации τ_3 для каолиновой (сплошная линия) и бентонитовой глины (штриховая линия) от объемной влажности при различных температурах

Заключение. В глинах в области связанной воды в широком частотном диапазоне проявляются три релаксационных процесса, обусловленные различными механизмами поляризации. Их вклад в КДП можно учесть применением комбинированной модели. Результаты моделирования показывают, что в различных типах глин параметры могут существенно отличаться, при этом модель адекватно описывает поведение спектров КДП при изменении влажности и температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00284 мол_а).

Список литературы

1. Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V. Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. Vol. 10, №. 3. P. 603–606.

2. Revil A. Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz–1GHz // Water Resources Research, 2013. Vol. 49. P. 306–327.

3. Towards a better understanding of electrical relaxation / Kruschwitz S., Halisch M., Prinz C. [et al.] // Intern. Symp. Soc. Core Analysts (SCA2017-080). Vienna, Austria, 27Aug. – 1Sept. 2017.

4. Dielectric relaxation behavior of callovo-oxfordian clay rock: a hydraulic-mechanical-electromagnetic coupling approach / Wagner N., Bore T., Robinet J-C [et al.] // J. Geoph. Res.: Solid Earth.2013.Vol. 118, № 9. P. 4729–4744.

5. Chen Y., Or D. Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity // Water Resources Research. 2006. Vol. 42. W06424. DOI: 10.1029/2005WR004590

6. Lapina A.S., Bobrov P.P. Electromagnetic Waves Attenuation in the Sandstones With Grains of Different Size at Imbibition and Drying // Progress In Electromagnetics Research M. 2016. Vol. 45. P. 9–16.

7. Bobrov P. P., Repin A.V., Rodionova O.V. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2015. Vol. 53, № 5. P. 2366–2372.

УДК 528.854, 004.932

С.А. Рылов

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия,
e-mail: rylovs@mail.ru

ЧАСТИЧНОЕ ОБУЧЕНИЕ В РАМКАХ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНОГО АНАЛИЗА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предложен новый алгоритм классификации с частичным обучением, разработанный на основе непараметрического алгоритма кластеризации HCA. Алгоритм позволяет получить иерархическую сегментацию, в которой могут быть также выделены классы, не представленные в обучающей выборке. Высокая скорость работы алгоритма обеспечивает возможность его использования в интерактивном режиме. Экспериментальные результаты подтверждают, что предлагаемый алгоритм позволяет проводить классификацию аэрокосмических изображений в условиях обучающих выборок малого объема.

Ключевые слова: частичное обучение, частично контролируемая классификация, иерархическая кластеризация, спутниковые снимки, мультиспектральные изображения.

Введение. Во многих практических задачах классификации данных, таких как, например, спутниковые изображения, процесс получения качественной обучающей выборки (ОВ), необходимой для построения классификации, обычно связан со значительными материальными и временными затратами [1–4]. Поэтому на практике обучающая выборка часто является ограниченной и непредставительной. Кроме того, ОВ может и вовсе отсутствовать для некоторых классов, что отрицательно сказывается на каче-

© Рылов С.А., 2018

стве классификации. Использование недостаточно полной ОВ при построении классификации не позволяет обеспечить удовлетворительное качество сегментации, особенно при анализе больших и сложных сцен.

В условиях недостаточно полной ОВ целесообразным является использование методов классификации с частичным обучением (*semi-supervised learning*). В процессе их работы для построения решающего правила используется информация, содержащаяся не только в помеченных (ОВ), но и в непомеченных (неклассифицированных) данных. Задачу классификации с частичным обучением можно рассматривать в двух постановках: как классификацию, дополнительно использующую информацию из неклассифицированных данных, и как кластеризацию, использующую дополнительные условия из ОВ [1; 11]. Использование алгоритмов с частичным обучением позволяет сократить ручной труд и повысить качество результатов классификации [3–4].

За последние несколько лет появились работы, посвященные применению методов классификации с частичным обучением к спутниковым изображениям [5–10], однако их практическое использование затруднено ввиду большого числа настраиваемых параметров и высоких вычислительных затрат [9]. Таким образом, актуальной является разработка новых вычислительно эффективных алгоритмов классификации с частичным обучением, позволяющих обрабатывать аэрокосмические изображения в условиях малого объема ОВ.

В данной работе предлагается вычислительный эффективный алгоритм классификации с частичным обучением для сегментации аэрокосмических изображений, разработанный на основе иерархического сеточного алгоритма кластеризации НСА [12]. При этом ОВ учитывается непосредственно при построении иерархии, которая основывается на множестве мелких групп данных, полученных с помощью оценки их плотности в пространстве спектральных признаков. В результате получается иерархическая сегментация, в которой помимо искомых классов могут быть выделены и другие классы, не представленные в обучающей выборке. Высокая скорость работы алгоритма обеспечивает возможность его использования экспертом в интерактивном режиме, задавая дополнительные точечные элементы обучающей выборки для уточнения результата. Экспериментальные результаты подтверждают, что предлагаемый алгоритм позволяет проводить классификацию аэрокосмических изображений в условиях обучающих выборок малого объема.

Сеточный иерархический алгоритм кластеризации НСА. В данном разделе представлено краткое описание алгоритма кластеризации НСА [12]. В работе алгоритма можно выделить четыре основных этапа.

На первом этапе в пространстве признаков вводится сеточная структура – оно разбивается на непересекающиеся клетки, размер которых зависит от параметра m. Плотность клетки определяется через число элементов данных, попавших в эту клетку.

На втором этапе каждая непустая клетка соединяется с соответствующей соседней клеткой с наибольшей плотностью. Таким образом, множество непустых клеток разбивается на компоненты связности $\{G_1,\ldots,G_S\}$, которые соответствуют одномодовым кластерам. В алгоритме НСА в качестве базовых элементов иерархии выступают полученные компоненты связности, число которых мало относительно объема исходных данных, в связи с чем построение иерархии не требует больших вычислительных затрат.

На третьем этапе находятся расстояния между всеми парами смежных компонент связности. Расстояние определяется на основе оценки перепада плотности между компонентами. Формируется соответствующая матрица расстояний $\{h_{ij}\}$.

Расстояния между произвольными компонентами связности $\{\hat{h}_{ij}\}$ определяются через расстояния между смежными компонентами связности $\{h_{ij}\}$ следующим образом. Пусть $\Theta_{ij} = \{Q_{ij}\}$ – множество всех цепей из компонент связности $Q_{ij} = \langle\, G_i = G_{k_1},\ldots, G_{k_t}, G_{k_{t+1}},\ldots, G_{k_l} = G_j \,\rangle$ таких, что для всех $t = 1,\ldots,l-1$ компоненты

G_{k_t} , $G_{k_{t+1}}$ смежные. Тогда расстояние между произвольными компонентами связности G_i и G_j вычисляется по формуле

$$\hat{h}_{ij} = \min_{Q_{ij} \in \Theta_{ij}} \left[\max_t h_{k_t, k_{t+1}} \right]. \quad (1)$$

В случае если множество Θ_{ij} пусто, то полагаем $\hat{h}_{ij} = 1$.

Построенное таким образом отношение $\{\hat{h}_{ij}\}$ является ультраметрикой [13], т.е. метрикой, для которой выполняется усиленное неравенство треугольника: $\hat{h}_{ij} \le max\,(\hat{h}_{ik}, \hat{h}_{kj}),\ \forall\ i, j, k$. Известно, что существует однозначное соответствие между матрицами расстояний со свойством ультраметрики и дендрограммами [14], т.е. такие матрицы описывают иерархические разбиения.

На заключительном четвертом этапе к матрице расстояний $\{h_{ij}\}$ применяется алгоритм построения дендрограммы методом ближайшего соседа (SLINK). В результате чего получается дендрограмма, соответствующая ультраметрике $\{\hat{h}_{ij}\}$.

Алгоритм кластеризации HCA позволяет выделять иерархическую структуру в данных, при этом он способен разделять пересекающиеся в пространстве признаков кластеры. Использование непараметрической оценки плотности обеспечивает выделение границ классов сложной формы. Реализованный нами алгоритм способен обрабатывать данные размерности до 8 и объемом до нескольких сотен миллионов элементов. При этом его вычислительная эффективность позволяет проводить кластеризацию мультиспектральных четырехканальных изображений размером до 100 млн пикселей в пределах одной секунды на обычном ПК.

Построение иерархии с использованием частичного обучения. В предлагаемом подходе обучающая выборка учитывается на этапе построения иерархии. При кластеризации алгоритмом HCA иерархия строится с помощью метода построения дендрограммы SLINK, применяемого к матрице расстояний между смежными компонентами связности. Метод SLINK для матрицы размера $n \times n$ состоит из $(n - 1)$ итерации, на каждой из которых объединяются два ближайших элемента, при этом расстояние до объединенного элемента определяется как минимальное из расстояний до объединяемых элементов. В работе [15] изложен алгоритм на основе использования массива частичных минимумов (содержащих индексы и значения минимальных элементов в каждой строке матрицы расстояний), позволяющий на каждой итерации находить минимальный элемент матрицы за $O(n)$ операций. Таким образом, достигается общая вычислительная сложность алгоритма SLINK $O(n^2)$.

В рамках частичного обучения перед построением дендрограммы осуществляется установление классов для компонент связностей по имеющейся ОВ. Компоненте присваивается класс в соответствии с попавшими в нее элементами ОВ. Если в одну компоненту входят представители ОВ сразу из различных классов, то эта компонента отмечается как «конфликтная», а ее класс устанавливается голосованием элементов ОВ (по большинству). Компоненты, не содержащие ни одного представителя ОВ, остаются непомеченными. На этом этапе расстояния между «неконфликтными» компонентами, принадлежащими к одному классу, задаются равными нулю. Таким образом, такие компоненты на этапе построения иерархии сразу же объединяются в один класс.

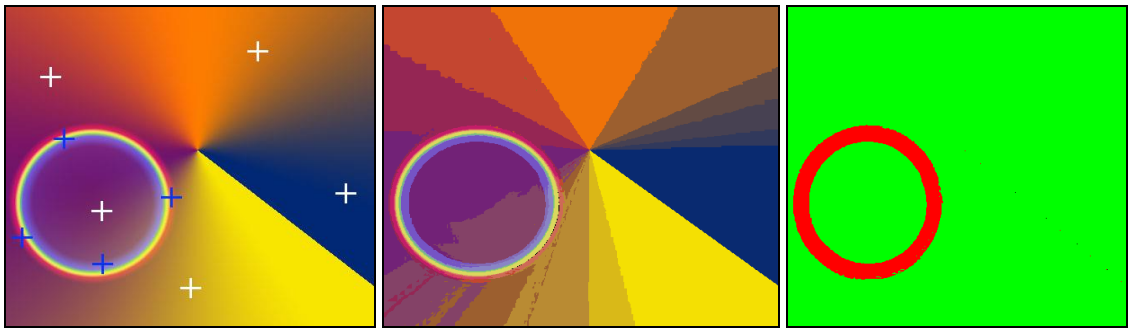
Учет принадлежности компонент к классам происходит в процессе построения дендрограммы. На каждой итерации алгоритма SLINK перед объединением проверяется принадлежность объединяемых элементов. Если они относятся к разным классам, то объединение не происходит. Вместо этого расстояние между ними задается равным единице, и обновляются минимумы в соответствующих строках матрицы. В остальных случаях объединение происходит как обычно. При этом в случае, когда объединяется помеченный элемент и непомеченный, объединенный элемент наследует класс помеченного элемента. Таким образом, непомеченные компоненты связности будут соеди-

няться с ближайшими по метрике (1) помеченными компонентами. В результате, на верху иерархии остаются объединенные компоненты, принадлежащие разным классам, а также группы непомеченных компонент, которые находятся на расстоянии 1 от всех помеченных (никак с ними не связаны).

Из полученной иерархической структуры можно получать разбиения данных различной степени подробности, варьируя значение уровня среза дендрограммы. При этом известные из ОВ классы будут разделены на всех уровнях. При получении результата, пользователь может интерактивно добавлять элементы обучающей выборки – алгоритму потребуется выполнить заново только последний этап построения дендрограммы для обновления результата, что не занимает значительного времени.

Экспериментальные исследования. Далее представлены примеры работы предложенного алгоритма классификации с частичным обучением на модельных и реальных спутниковых изображениях. Показано, что с использованием малого объема ОВ предложенный подход позволяет успешно выделять схожие классы, при этом избегая излишней раздробленности.

На рис. 1 представлено модельное цветное изображение, содержащее кольцо и фон, которые состоят из градиентных переходов различных цветов. Также на изображении отмечены метки обучающей выборки (4 точки для кольца и 5 точек для фона). При кластеризации данного изображения получается раздробленная картина, где оба класса распадаются на множество кластеров, иначе же не удается разделить кольцо и фон. Однако при использовании даже такой малой ОВ предложенный подход позволяет успешно выделить искомые классы (рис. 1).



а *б* *в*

Рис. 1. Модельное изображение с нанесенными метками ОВ (*а*); результат кластеризации алгоритмом НСА (*б*); результат применения частичного обучения (*в*)

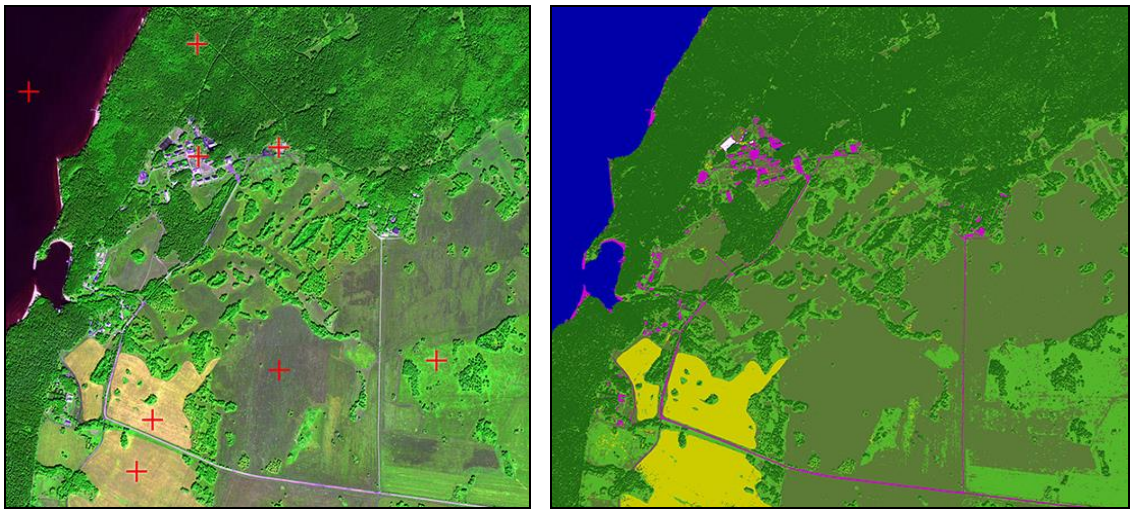


Рис. 2. Спутниковое изображение WorldView-2 (RGB-композит, каналы 4, 5, 1) с нанесенными метками ОВ и результат классификации с частичным обучением

На рис. 2 приведен результат классификации мультиспектрального спутникового изображения высокого пространственного разрешения по обучающей выборке, состоящей всего из 8 точек. В результате были успешно выделены все 6 искомых классов, включая крайне неоднородный по спектральным характеристикам класс лес. Кроме того, предложенный алгоритм дополнительно выделил не представленный в ОВ класс, соответствующий футбольному полю (отмечен на рисунке белым цветом).

Заключение. Предложенный в данной работе алгоритм классификации с частичным обучением позволяет проводить сегментацию аэрокосмических изображений в условиях малой и недостаточно полной ОВ. Это обеспечивает возможность эффективного использования данных, полученных в результате полевых исследований, которые в настоящее время при автоматизированной обработке спутниковых снимков напрямую не используются. Возможность получения иерархического представления результата сегментации и высокое быстродействие алгоритма существенно облегчают работу эксперта.

В дальнейшем планируется реализовать автоматическое разделение выявленных «конфликтных» компонент для наилучшего согласования с обучающей выборкой и встраивание полученных дополнительных разбиений в итоговую иерархию.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-37-00492 мол_а).

Список литературы

1. Травкин О.И. Подходы к агрегации данных и извлечению факторов в задаче поиска мошенничества в банковских транзакциях // XVIII Междунар. конф. «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных». 2016. С. 361–369.

2. Адаскина Ю.В., Попов А.М., Реброва П.В. Метод полуавтоматической классификации для данных с несбалансированными классами // Компьютерная лингвистика и вычислительные онтологии: тр. XVIII объединенной конференции «Интернет и современное общество» (IMS-2015). 2015. С. 15–24.

3. Jothi Prakash V., Nithya L.M. A Survey on Semi-Supervised Learning Techniques // arXiv preprint arXiv:1402.4645. 2014.

4. Hady M.F.A., Schwenker F. Semi-supervised learning // Handbook on Neural Information Processing. Springer Berlin Heidelberg. 2013. P. 215–239.

5. Banerjee B., Buddhiraju K.M. A Novel Semi-Supervised Land Cover Classification Technique of Remotely Sensed Images // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2015. Vol. 43, № 4. P. 719–728.

6. An efficient semi-supervised classification approach for hyperspectral imagery / K. Tan [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. Vol. 97. P. 36–45.

7. Spectral-spatial classification of hyperspectral images with semi-supervised graph learning / R. Luo [et al.] // SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics. 2016. P. 100040T-100040T-6.

8. Semi-supervised hyperspectral image classification using spatio-spectral Laplacian support vector machine / L. Yang [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11, № 3. P. 651–655.

9. Semi-supervised classification for hyperspectral imagery based on spatial-spectral label propagation / L. Wang [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. Vol. 97. P. 123–137.

10.Jing X., Chen S.Y., Fan L.L. Semi-supervised classification of multi-spectral images based on density: selected samples // Ninth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2017). International Society for Optics and Photonics. 2017. Vol. 10420. P. 1042030.

11.Lelis L., Sander J. Semi-supervised density-based clustering // Proc. Ninth IEEE International Conference on Data Mining, ICDM'09. IEEE. 2009. P. 842–847.

12.Рылов С.А., Пестунов И.А. Быстрая иерархическая кластеризация мультиспектральных изображений на графических процессорах NVIDIA // В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. 2018. С. 865–873.

13.Leclerc B. Description combinatoire des ultramétriques // Math. Sci. Humaines. 1981. Vol. 127, № 73. P. 5–37.

14.Mirzaei A., Rahmati M. A novel hierarchical-clustering-combination scheme based on fuzzy-similarity relations // IEEE Tr. Fuzzy Syst. 2010. Vol. 18, № 1. P. 27–39.

15.Olson C.F. Parallel algorithms for hierarchical clustering // Parallel computing. 1995. Vol. 21, № 8. P. 1313–1325.

УДК 004.627

А.Ж. Саринова, А.В. Замятин

Томский государственный университет, Томск, Россия
e-mail: assiya_prog@mail.ru

АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Описаны алгоритмы сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений на основе дискретных ортогональных преобразований с целью последующего сжатия в системах дистанционного зондирования Земли. В качестве алгоритмов сжатия, требующих сокращения объема передаваемой информации, предлагается использование разработанных методов сжатия на основе многоуровневых преобразований Уолша – Адамара и адаптивного квантования для дискретно-косинусного преобразования. Рассмотрены этапы предварительной обработки алгоритмов сжатия с потерями и высоким качеством при восстановлении, с учетом которой разработаны адаптивные алгоритмы для сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений.

Ключевые слова: гиперспектральные аэрокосмические изображения, алгоритм сжатия, дискретные преобразования, степень сжатия Уолша – Адамара.

Введение. Алгоритмы сжатия с потерями данных охватывают широкий спектр исследований, преимущественно имея высокие показатели степени сжатия в сравнении с алгоритмами без потерь. Самыми распространенными и часто используемыми являются дискретные преобразования и стандарт сжатия *JPEG* [1–8].

Большой интерес исследователи проявляют к методам сжатия АИ с потерями, которые дают более высокие результаты в эффективности степени сжатия: дискретно-косинусного преобразования (ДКП), дискретное вейвлет-преобразование (ДВП), *SPIHT*, прогнозирование (предсказание) и энтропийное кодирование [6–10].

Проблемы исследования задачи сжатия гиперспектральных АИ с потерями отражены в следующих работах. Предварительная обработка изображения является важным этапов в сжатии.

Основными проблемами, требующие решения, являются:

- низкая производительность алгоритмов сжатия;
- невысокие показатели степени сжатия;
- невысокое качество восстановленных изображений.

Пути решения:

- повышение производительности за счет создания алгоритмов, легко адаптируемых для распределенно-параллельной обработки в отличие от аналогов, как правило, этого не допускающих;

© Саринова А.Ж., Замятин А.В., 2018

- увеличение степени сжатия за счет применения адаптивного алгоритма Хаффмана, определяющиегося в модификации таблицы кодов Хаффмана для гиперспектральных АИ, не рекомендованных стандартом *JPEG*, использующегося для полутоновых и цифровых изображений [2], позволяющего сохранить высокое качество в отличие от многочисленных аналогов;
- обеспечение высокого качества восстановленных изображений при заданом уровне потерь за счет уменьшения сравнительно меньших чисел, и сведение к минимуму больших чисел с вычислением оптимальных пороговых значений показателя квантования.

Алгоритм и этапы предварительной обработки аэрокосмического изображения предлагаются в статье, рассмотрим их подробнее [1–5].

Решение задачи сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с потерями. Рассмотрим пример преобразования для фрагмента гиперспектрального АИ.

Пусть фрагмент АИ представляет матрицу, состоящую из *m* строк, *n* столбцов и *k* каналов: **I**[*m*, *n*, *k*] = **I**[10, 10, 10].

Преобразование WHT – это фильтры, разделяющие изображение на низкочастотную и высокочастотную составляющие. Чтобы получить исходное изображение, нужно просто снова объединить эти составляющие. Прямое преобразование WHT представлено в матричной форме H_{wt2}, взят фрагмент АИ, т.е. $H_{wt2} \bullet \mathbf{I}[m,n,k] = H_{wt2}'[CK]$, где СК – спектральная компонента матрицы **I**[*m*, *n*, k].

В результате после такого преобразования получим коэффициенты низкочастотной и высокочастотной составляющих СК = 114, 9, 112, 9, 114, 9, 123, 0, 123, 9. В процессе квантования высокочастотные коэффициенты (близкие к нулю и отрицательные значения) округляются до нуля. Следует отметить, что матрицы уровней H_{wt4} и H_{wt8} вычисляются так же, как и H_{wt2}.

Изменяя базис матрицы (H_4, H_8) с каждой подматрицей производим прямое и обратное вычисление, согласно которым каждый элемент преобразованной подматрицы вычисляется по следующим формулам:

$$WHT = \frac{\sum_{i=1}^{n} I[m,n,k] \times H_w[i,j]}{2^H}$$

$$WHT_D = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{I}[m,n,k] \times H_w[i,j] \times H$$

где n – размерность матрицы Адамара; $\mathbf{I}[m,n,k]$ – подматрица исходной матрицы; H_w – матрица Адамара; i – строка текущего значения в подматрице; j – столбец текущего значения в подматрице; H – базис матрицы.

Преимущество преобразования Уолша – Адамара – повышенная способность выявлять низкочастотные составляющие за счет разделения областейканалов гиперспектрального АИ на подуровни. Это дает средние показатели степени сжатия при среднем качестве изображений.

В результате преобразования ДКП построили два фильтра – высокочастотный и низкочастотный. Квантование выполнялось таким образом:

1. Из всех значений файла рассчитывалось среднее арифметическое $\mathbf{I}_{sr}$.
2. Для выбора числового показателя квантования *Quant* подсчитывалось число для квантования, $Quant = quantValue \cdot \mathbf{I}_{sr}/100$. Например, числовой показатель квантования: $\mathbf{I}_{sr} \cdot 95\ \% = 285 = Quant$. При этом коэффициенты *DC* остаются неизменяемыми.

Для фрагмента гиперспектральных АИ показана матрица после квантования. Процесс квантования является ключевым в процессе сжатия, преимущество представления в частотной области заключается в том, что в отличие от пространственной области до *DCT* не каждое измерение имеет такое же значение для визуального качества изображения. В результате после генерации матриц квантования большинство коэффициентов равны нулю.

Экспериментальные исследования. Для определения эффективности предлагаемых алгоритмов сжатия с потерями с точки зрения степени сжатия, а также пределов его применимости проведен ряд экспериментов на гиперспектральных АИ (Aviris).

Показатели степеней сжатия в разрезе количества каналов ортогональных преобразований Уолша – Адамара, ДКП и JPEG *Lossy* представлены на рис. 1. Показано, что ДКП преобладает над преобразованием Уолша – Адамара и JPEG *Lossy* в степени сжатия при высоком качестве восстановленных изображений.

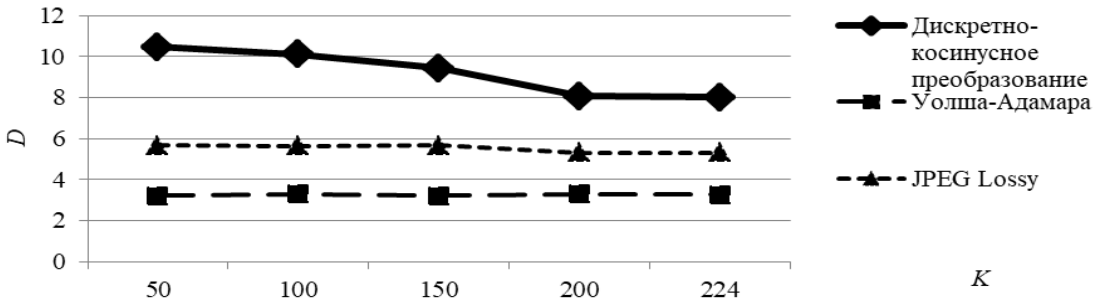


Рис. 1. Зависимости *K* от *D*

На рис. 2 показаны преобразования при различном уровнем потерь в %, из которого видно, что при увеличении коэффициента квантования степень сжатия возрастает. Представлены алгоритмы преобразований по степени сжатия *D* и уровнем потерь *P*, при *K* = 100.

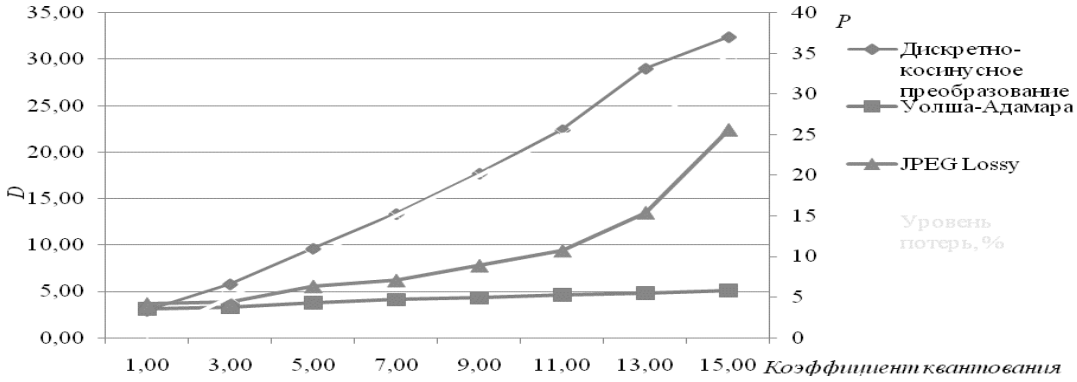


Рис. 2. Зависимости Quant от *D*, *P*

Примеры восстановленных преобразований гиперспектральных АИ Уолша – Адамара (1-го, 2-го, 3-го уровней), *K* = 10, приведены на рис. 3.

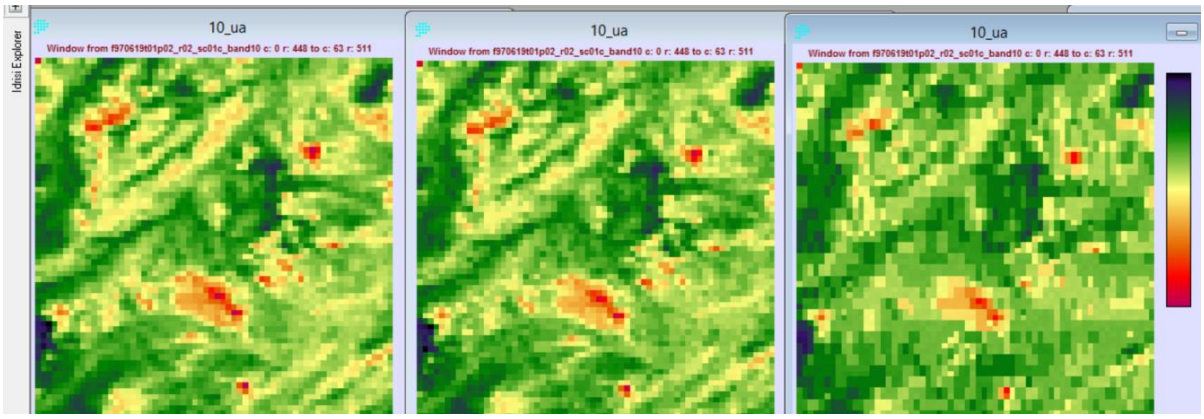


Рис. 3. Восстановленные изображения после Уолша – Адамара

Оригинальное изображение, K =10, приведено на рис. 4.

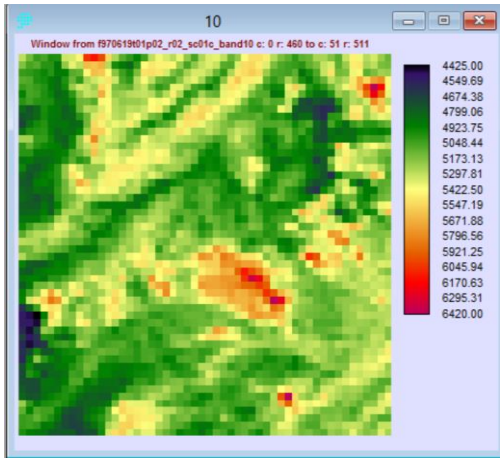


Рис. 4. Оригинальное изображение

Выводы

- предлагаемый подход с потерями определяется в адаптивных преобразованиях, основанных на преобразовании Уолша – Адамара, дискретно-косинусного преобразования и сгенерированной таблицы квантования и последующего адаптивного кодирования;
- полученные результаты сравнения преобразованных гиперспектральных АИ с помощью полученных коэффициентов позволяют предположить эффективность применения данных исследований с адаптивным кодированием Хаффмана.
- сравнение критериев качества с помощью стандартных метрик качества позволяют отметить, что гипеспектральные АИ восстановлены с высоким качеством и минимальными потерями.

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2008. 122 с.
2. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004. 368 с.
3. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии Название: Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии: учеб. пособ. М.: Изд-во «Триумф», 2003. 368 с.
4. Штарк Г.-Г. Применение вейвлетов для ЦОС. М.: Техносфера, 2007. С. 165–177.
5. Яне Б. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
6. Sujithra D.S., Manickam T., Sudheer D.S. Compression of hyperspectral image using discrete wavelet transform and walsh hadamard transform. International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering. 2013. Vol. 2 (3). P. 314–319.
7. Emmanuel C. Hyperspectral Data Compression Tradeoff. Optical Remote Sensing,Augmented Vision and Reality, 3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. P. 9–29. DOI: 10.1007/978-3-642-14212-3_2.
8. Keerthana P., Sivasankar A. The impact of lossy compression on hyperspectral data adaptive spectral unmixing and PCA classification. International Journal of Science and Modern Engineering. 2013. Vol. 1 (7). P. 35–37.
9. Ramesh S.M., P. Bharat, J. Anand, J. AnbuSelvan. Analysis of Lossy Hyperspectral Image Compression Techniques. International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2014. Vol. 3 (2). P. 302–307.
10. Poonam and R.S. Chauhan. Compression and Classification of Hyperspectral Images using an Algorithm based on DWT and NTD. Advance in Electronic and Electric Engineering. 2013. Vol. 3 (4). P. 447–456.

УДК 528.83

А.В. Саункин, Р.В. Васильев, А.В. Татарников

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail: saunkin@inbox.ru

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА И РАБОТЫ С ПАРАМЕТРАМИ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Описан возможный метод получения спутниковых данных из различных источников, предложены существующие подходы для предварительной обработки и визуализации этих данных и автоматизированного ведения базы обработанных спутниковых сведений об атмосфере Земли.

Ключевые слова: атмосфера Земли, спутниковые данные, вторичная обработка спутниковых данных, Python, Matplotlib, Basemap.

Успешное развитие и функционирование субъектов Российской Федерации в настоящее время уже невозможно представить без использования современных геоинформационных систем и технологий. Технологии дистанционного спутникового зондирования Земли значительно повышают степень информированности госструктур о состоянии лесных массивов, водных объектов, объектов инфраструктуры и пр., что существенно повышает эффективность управления. Для регионов, обладающих значительными территориями, использование таких технологий важно еще и потому, что отсутствует необходимость создания и эксплуатации большого количества стационарных пунктов наблюдения.

Дистанционное спутниковое зондирование Земли (космический мониторинг) – ресурсосберегающая информационная технология получения информации о состоянии природных объектов и объектов человеческой деятельности, расположенных на больших территориях, представляющая недостижимые для других методов наблюдений объемы информации о состоянии этих объектов практически в реальном масштабе времени. Задачи космического мониторинга решаются при помощи орбитальной группировки специализированных спутников, которые делают фотоснимки поверхности Земли в различных спектральных диапазонах или зондируют поверхность Земли при помощи радиолокаторов либо лазерного излучения. Фотоснимки или данные зондирования передаются на поверхность Земли при помощи радиосвязи. Совокупность информации, полученной таким образом можно назвать спутниковыми данными.

Спутниковые данные широко используются в разных областях человеческой деятельности. В качестве некоторых примеров можно привести: мониторинг наводнений, лесных пожаров, степень их опасности и оценка их последствий; изучение влияния антропогенного воздействия на окружающую среду для решения задач экологии; строительные и проектно-изыскательские работы; городской и земельный кадастр; планирование и управление развитием территорий; градостроительство; геология и освоение недр; оценка состояния промышленности, сельского и лесного хозяйства. Современные геоинформационные технологии и создание карт различных масштабов также немыслимы без использования космических снимков. При помощи этой технологии решается проблема объективного информационного обеспечения для принятия решений по управлению объектами инфраструктуры и рациональному использованию ресурсов.

© Саункин А.В., Васильев Р.В., Татарников А.В., 2018

Точность и актуальность получаемых спутниками сведений основывается в частности, как на качестве получаемых космических снимков, так и на методах их обработки. Объемы информации с повышением качества снимков значительно возрастают, поэтому операторская обработка снимков становится неэффективной – значительно увеличивается время получения необходимой сводной информации, следовательно, уменьшается время, необходимое для принятия решения. Кроме этого, увеличивается вероятность ошибок в сводных отчетах, поскольку получаемые спутниковые данные являются нестрого детерминированными для некоторых задач мониторинга.

На сегодняшний день спутниковая информация о поверхности Земли по большей части подготовлена для активного использования потребителями. Эта информация хранится преимущественно в виде изображений поверхности Земли и является более или менее упорядоченной. Данные об атмосфере Земли преимущественно предназначены для научных исследований (исключением могут быть данные об облачности и ее динамике использующиеся для прогнозирования погоды), поэтому они не систематизированы в плане доступности для конечных пользователей – ученых. Радиолокационная информация, лимбовая информация об атмосфере Земли или информация, полученная при помощи лазерного зондирования поверхности Земли и ее атмосферы, требует дополнительных специализированных действий для интерпретации и доступного, ясного представления имеющихся в ней сведений. Поэтому необходимо вести ее научное сопровождение, которое будет реализовывать задачи разработки и внедрения автоматизированных методик обработки спутниковых данных для создания сводных отчетов.

Изначально в представленной работе была поставлена конкретная цель – автоматизировать пополнение существующей базы данных (atmos.iszf.irk.ru) в связи с изменением исходного варианта выдачи данных на сервере инструмента предоставляющем сведения о высотном распределении температуры атмосферы (https://mls.jpl.nasa.gov/index-eos-mls.php). При этом существующая база данных не является тривиальным «зеркалом» уже имеющегося ресурса, а представляет собой результат некоторой обработки, позволяющий осуществлять пространственно-временную выборку сведений и отображать температурные карты на различных высотных уровнях. Кроме того, стояла задача пополнения существующей базы данными других инструментов и данными предварительной обработки спутниковой информации для предоставления информации о ветре или химическом составе атмосферы.

Для определения возможности автоматического получения сведений с исходными спутниковыми данными об атмосфере Земли были рассмотрены несколько инструментов и сайтов с ресурсами этих инструментов:

- Сайт инструмента MLS Aura, ведущего лимбовые наблюдения атмосферы, для получения параметров высотного распределения требует регистрацию, далее требуется заполнение форм для получения списка ссылок на файлы с данными в виде HTML кода. Данные представлены в формате «HDF5».
- Сайт инструмента SABER, также ведущий лимбовые наблюдения атмосферы, не требует регистрации и предоставляет демонстрационные распределения параметров атмосферы и список ссылок на файлы с данными в виде HTML кода, в формате «NetCDF».
- Сайт «atmos.iszf.irk.ru», где данные спутников GOES представляются в виде изображений облачности для предварительного просмотра. Для получения более подробных данных необходимо отправить запрос администратору сайта. Следует отметить, что этот ресурс также предполагается быть агрегатором сведений об атмосфере полученных на основе информации содержащейся на ресурсах 1) и 2).

Спутниковые данные, размещенные на этих ресурсах, хранятся в различных форматах (HDF4, HDF5, NetCDF и т.п. [https://annefou.github.io/metos_python/02-formats/]) поэтому наряду с автоматическим пополнением базы для вторичной обработки и полу-

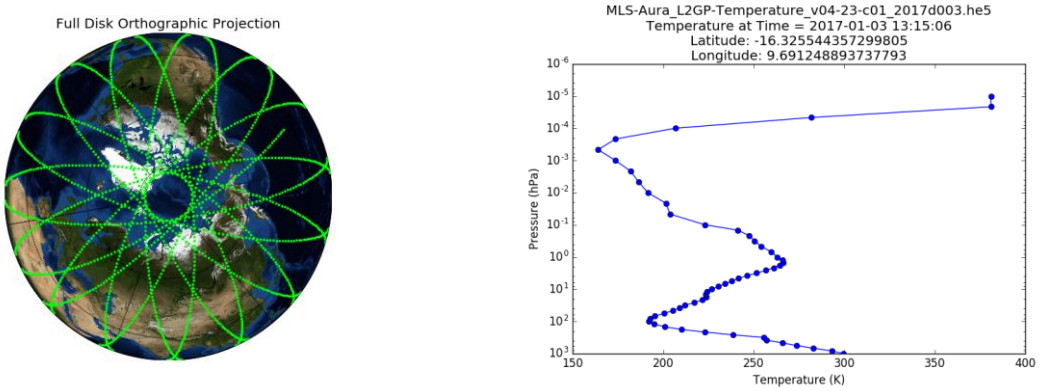
чения физических параметров атмосферы необходимо было адаптировать существующие скрипты соответствующими алгоритмами.

Для модификации существующих и создания новых алгоритмов был выбран язык программирования Python. Методами этого интерпретатора был разработан скрипт, который в настоящее время функционирует на сервере института (atmos.iszf.irk.ru) для работы в автоматическом режиме. Он формирует запросы сайту MLS Aura и анализирует полученный в ответ HTML-код, выделяет ссылки на конкретные файлы данных и передает эту информацию программному обеспечению, обеспечивающему загрузку файлов из сети Интернет (wget) для пополнения существующей базы данных. Сейчас ведется работа по реализации доступа к сайту SABER для аналогичной автоматизации получения данных. Рассматривается возможность получения данных о ветре из вторичных данных MLS Aura.

При помощи библиотек для Python [1], а именно Matplotlib [2], Basemap [3] и другие библиотеки, связанные с чтением различных форматов файлов, была освоена технология обработки и визуализации спутниковых данных для задач института. Также освоена технология выборки по значениям, локализации данных, накопление по времени (день, неделя, месяц, период или даже за весь год), возможность наносить данные на различные карты (различные проекции Земли) в зависимости от требуемой задачи.

Ниже приведены результаты визуализации и предварительной обработки (рис. 1, 2).

На (рис. 1, *а*) представлен результат работы скрипта визуализации спутниковых данных за некоторый интервал времени. Данное изображение формировалось в несколько этапов. Сначала были получены массивы долгот и широт, далее была сформирована проекция карты (ортографическая проекция), в итоге эти точки наносились непосредственно на проекцию. В результате можно увидеть схематически траекторию ведения сьемки за определенный интервал времени для наглядного представления мест проведенных измерений температурного профиля, с целью понять проходит ли данная траектория над интересующей областью. На (рис. 1, *б*) изображен график температурного профиля соответствующий одной из точек замеров MLS Aura. График соответствует действительному распределению температуры в атмосфере так как видно, что от 1 000 до 100 гПа заметен спад температуры что характерно для тропосферы, от 100 гПа до 1гПа виден рост температуры – стратосфера, падение температуры при значениях давления от 1гПа до ~0,001 гПа – мезосфера и рост от ~0,001 гПа и выше – термосфера.

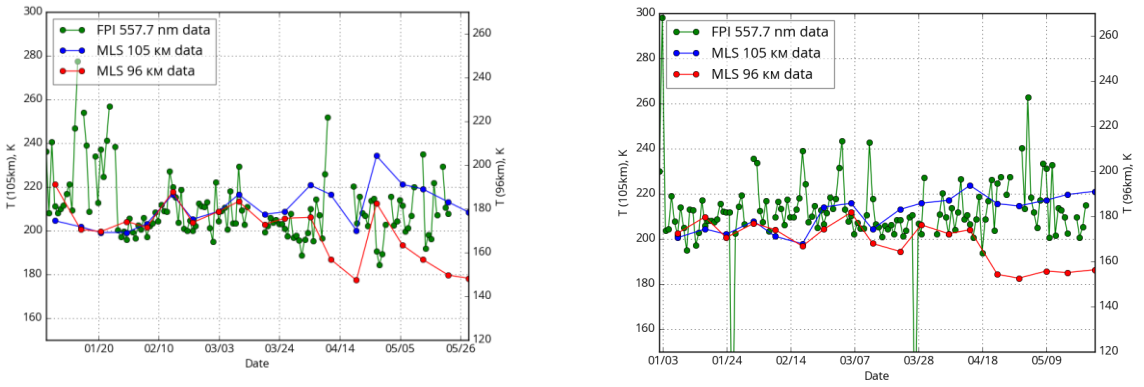


а *б*

Рис. 1. Ортографическая проекция Земли (вид Северного полюса), на которой нанесены точки замеров температурного профиля за 1 день по данным MLS Aura (*а*); температурный профиль по данным MLS Aura (*б*)

Для проверки правдоподобности выходных данных, экспериментальных установок, требуется сопоставление результатов с другими установками для выявления несоответствий, которые необходимы для дальнейшей регистрации ошибок и их устране-

ния. На графиках (рис. 2 *а*, *б*) продемонстрированы результаты за некоторый временной период с наземной установки (интерферометр Фабри Перо [4]) и полученные данные с MLS Aura, локализованные по необходимой области. На графике видно, что в некоторых местах результаты экспериментальной установки совпадают со значениями, полученными со спутника, а в иных местах заметны расхождения в результатах, что может послужить основанием для дальнейшей работы над инструментами, методикой получения данных или для проведения научных исследований.



а *б*

Рис. 2. Сравнение данных с интерферометра Фабри Перо в Тунке (зеленый цвет) и данных MLS Aura для высот 105 и 96 км (синий и красный цвет соответственно): *а* – 2017 г.; *б* – 2018 г.

Заключение. В настоящий момент создан макет программного обеспечения, который является основой для создания научного-информационного ресурса в области физики атмосферы, направленного на систематизацию и обеспечение доступности данных об атмосфере Земли. Макет работоспособен, может производить визуализацию спутниковой информации – как позиционной, так и с конкретными физическими параметрами атмосферы Земли. Сведения, полученные при помощи макета, были использованы в сравнительном анализе данных о температуре атмосферы на выделенных высотных уровнях, полученных различными методами (спутниковым и наземным). В результате анализа было показано, что полученные данные достоверны – наблюдается корреляция поведения температуры атмосферы, полученной двумя различными методами, следовательно, макет работает верно. Работа над макетом будет продолжаться далее для автоматизации сбора сведений с других сайтов и обработки различных форм исходных спутниковых данных.

В работе использовались данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара». Исследование выполнено в рамках проекта II.16.1.2 Программы ФНИ государственных академий на 2013–2020 гг. (уникальный номер 0344-2014-0006) и при поддержке программы Президиума РАН № 56 «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности».

Список литературы

1. G. van Rossum, Python tutorial, Technical Report CS-R9526, Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), Amsterdam, May 1995.

2. Hunter J.D., Matplotlib: A 2D graphics environment, Computing // Science & Engineering, 2007. Vol. 9, № 3. P. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55. URL: http://matplotlib.org.

3. Whitaker J.S. Matplotlib Basemap Toolkit 1.1.0. 2001. URL: http://matplotlib.org/basemap/.

4. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри–Перо KEO Scientific «Arinae» / Р.В. Васильев, М.Ф. Артамонов, А.Б. Белецкий [и др.] // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 70–87. DOI: 10.12737/szf-33201707.

УДК 519.237.8, 004.932

Ю.Н. Синявский, П.В. Мельников, И.А. Пестунов

Институт вычислительных технологий СО РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: yorikmail@gmail.com

НАРАЩИВАНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ С ПОМОЩЬЮ ПРОЦЕДУРЫ «СРЕДНЕГО СДВИГА» В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предложен эффективный метод наращивания обучающей выборки на основе процедуры «среднего сдвига» с учетом пространственной информации в задачах классификации спутниковых изображений. Метод позволяет учитывать структуру непомеченных данных. Приведены результаты экспериментального исследования с использованием гиперспектрального спутникового изображения Salinas, доказывающие эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: наращивание обучающей выборки, классификация спутниковых изображений, процедура «среднего сдвига», сегментация гиперспектральных изображений.

Введение. В задачах классификации спутниковых изображений процесс получения обучающей выборки (помеченных данных), необходимой для построения решающего правила или обучения нейронных сетей [1; 2], часто связан со значительными материальными и временными затратами. Поэтому на практике обучающая выборка (ОВ), как правило, имеется лишь для небольшого количества интересующих пользователя классов и при этом является непредставительной (отдельные классы могут быть представлены несколькими помеченными пикселями).

Известно [3; 4], что для обеспечения приемлемого качества классификации минимальное число точек ОВ для параметрических классификаторов составляет порядка $10k$ на класс (где k – размерность пространства признаков), а для непараметрических – $50k$ на класс. Поэтому проблема получения представительной ОВ особо актуальна при обработке гиперспектральных изображений, для которых число спектральных каналов (признаков) измеряется сотнями.

В то же время характерная особенность задач классификации спутниковых изображений состоит в том, что при их решении всегда доступен большой объем непомеченных данных.

В этих условиях обучающую выборку можно расширить за счет непомеченных данных с помощью методов, основанных на алгоритмах кластеризации. Среди таких методов наибольшее распространение получили параметрические методы на основе EM-алгоритма [5]. Однако при обработке спутниковых изображений какие-либо априорные сведения о вероятностных характеристиках классов, как правило, отсутствуют, поэтому применение этих методов может привести к неудовлетворительным результатам.

В работах [6; 7] предложен метод наращивания выборки, основанный на непараметрическом алгоритме soft-PARZEN, для которого не требуется «жестких» ограничений на вид условных плотностей распределения. Однако для его применения необходимо наличие обучающих выборок абсолютно для всех имеющихся на изображении классов. На практике это условие обеспечить удаётся крайне редко. Кроме того, его применение для обработки спутниковых изображений сопряжено с неприемлемо высокими вычислительными затратами.

© Синявский Ю.Н., Мельников П.В., Пестунов И.А., 2018

Распространенный подход к наращиванию обучающей выборки основан на процедуре «среднего сдвига». В [8] предложен полуобучаемый метод опорных векторов (semi-supervised support vector machine). Метод опорных векторов применяется к непомеченным данным таким образом, чтобы минимизировать ошибку при разделении как помеченных, так и непомеченных данных. Основной недостаток метода заключается в том, что целевая функция для такой задачи не является выпуклой, что затрудняет ее оптимизацию [9]. Для решения этой проблемы в [10] предложен метод оптимизации с помощью градиентного спуска, характеризующийся высоким быстродействием.

В данной работе представлен метод расширения обучающей выборки на основе разбиения, построенного при помощи процедуры «среднего сдвига» с учетом пространственной информации изображения [11]. Для демонстрации эффективности алгоритма построенные выборки применялись для классификации гиперспектрального изображения Salinas [12] методом опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) с использованием радиальных базисных функций.

Предлагаемый метод наращивания обучающей выборки. Алгоритм наращивания обучающей выборки с параметрами $\{h_r,\ h_s,\ \alpha,\ p\}$ можно условно разбить на три этапа.

На первом этапе изображение разбивается на сегменты с помощью процедуры «среднего сдвига» с учётом пространственной информации. Для этого к каждому пикселю изображения применяется процедура «среднего сдвига». При вычислении координат нового центра учитываются только пиксели, расположенные на расстоянии не более h_r в плоскости изображения и не более h_s в пространстве признаков [11]. В качестве расстояния между пикселями используется евклидово расстояние между векторами (в пространстве признаков расстояние определяется по векторам спектральных яркостей, а в плоскости изображения – по векторам координат пикселей). После этого сегменты с близкими центрами (на расстоянии не более h_r в плоскости изображения и не более $h_s/2$ в пространстве признаков) объединяются, и для каждого сегмента вычисляется представитель (среднее значение спектральных яркостей всех пикселей, отнесённых к сегменту).

На втором этапе для каждого класса исходной ОВ формируется множество сегментов, содержащих точки исходной обучающей выборки для этого класса. Из полученных множеств удаляются сегменты, содержащие одновременно точки из нескольких классов исходной выборки. Появление таких сегментов возможно при неудачном выборе параметров процедуры «среднего сдвига», а также вследствие ошибок, допущенных при формировании исходной ОВ. Использование точек из таких сегментов для наращивания выборки может привести к ошибкам классификации. Затем в каждое из сформированных множеств добавляются сегменты, расположенные в пространстве признаков на расстоянии не более, чем α от этого множества. Расстояние до множества вычисляется, как наименьшее из расстояний до его элементов; в качестве меры расстояния между сегментами используется евклидово расстояние между их представителями. После этого повторно удаляются сегменты, включённые одновременно в несколько множеств (расположенные в пространстве признаков на границе классов, представленных в исходной выборке).

На последнем этапе алгоритма в обучающую выборку для каждого класса добавляются случайно выбранные точки из сегментов (p процентов от размера сегмента), которые включены в множество, сформированное для этого класса.

Экспериментальные исследования. Предложенный метод наращивания обучающей выборки программно реализован на языке программирования C++ (в среде Microsoft Visual Studio 2017) с использованием стандарта OpenMP.

В эксперименте использовалось гиперспектральное спутниковое изображение Salinas (долина Салинас, Калифорния) размером 512×217 пикселей, полученное с сенсора AVIRIS 8 октября 1998 года [12]. Для обработки использовались признаки, построенные с помощью метода главных компонент. На рис. 1 приведены RGB-композит изображения (первые три главных компоненты) и эталонная картосхема, включающая 16 классов.

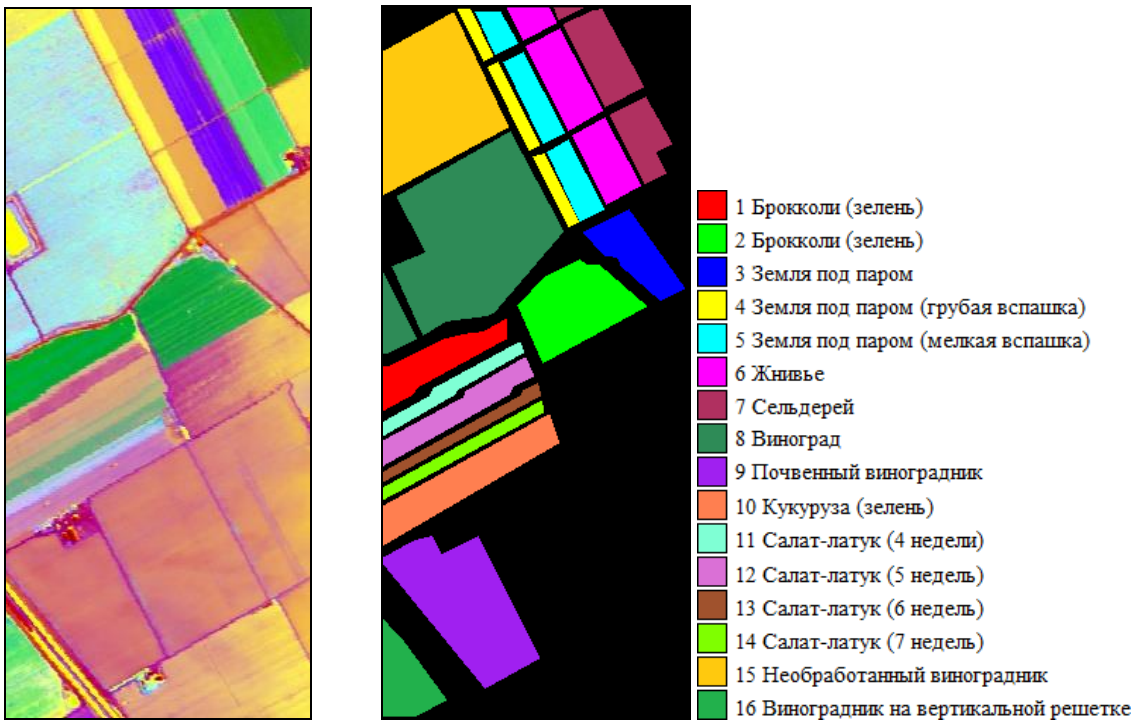


Рис. 1. RGB-композит исходного изображения, составленный из первых трех главных компонент (слева), и эталонная картосхема, включающая 16 классов (справа)

Таблица

Точность классификации изображения Salinas алгоритмом SVM с использованием сформированных ОВ

Объем исходной ОВ	Значение параметра p												
	0	5			10			15			20		
48	12,0	66,2	64,1	65,0	67,5	68,6	68,1	70,6	69,0	69,6	69,9	69,5	69,5
	8,9	67,8	67,4	67,2	71,0	72,1	72,4	73,1	72,8	73,0	73,7	73,6	73,6
	9,5	60,7	61,2	60,6	61,5	61,7	61,7	62,8	62,5	62,6	64,3	63,7	62,9
80	33,2	73,9	74,9	73,9	77,0	76,6	76,7	77,2	77,7	76,4	77,4	78,1	77,6
	36,1	74,2	74,7	74,2	77,6	77,3	76,7	77,4	77,8	78,1	79,1	79,0	78,8
	39,8	64,0	64,0	65,7	67,4	67,3	66,2	67,8	68,1	67,1	67,9	67,5	68,3
160	51,2	62,9	62,3	61,7	63,6	63,7	63,1	63,8	63,6	63,4	64,0	63,3	63,6
	47,9	74,9	74,8	75,7	76,6	76,7	77,0	77,8	77,1	77,1	78,0	77,6	77,3
	53,8	66,4	67,3	67,5	70,5	70,9	71,1	72,2	72,2	75,5	73,2	73,5	73,5

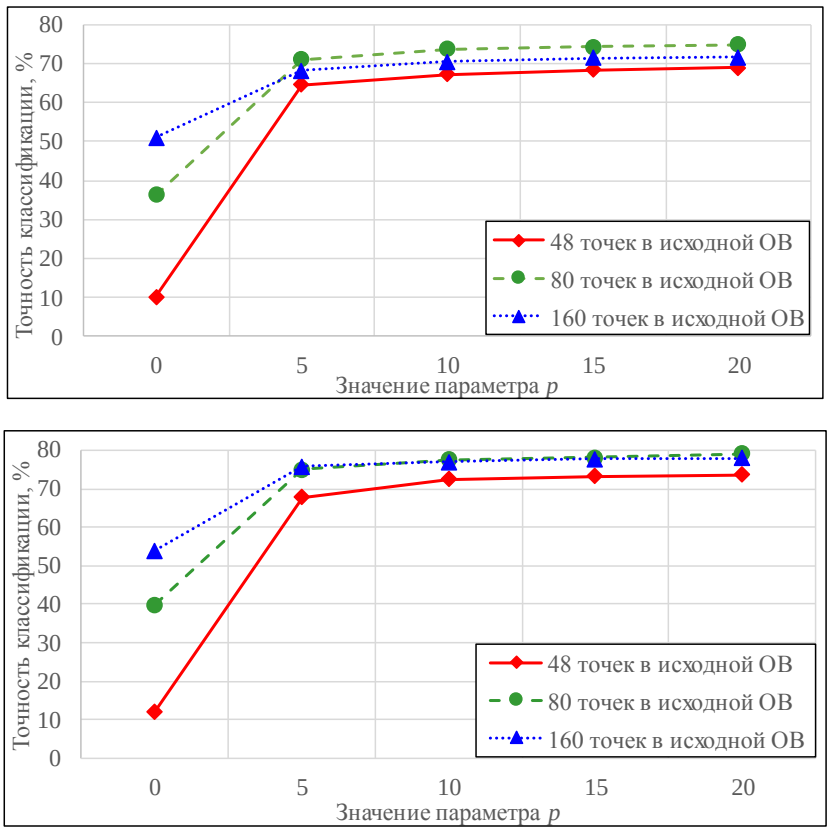


Рис. 2. Средняя (слева) и максимальная (справа) точность классификации изображения Salinas алгоритмом SVM в зависимости от значения параметра ρ для разного объёма исходной ОВ. Значение ρ = 0 соответствует исходной выборке.

По эталонной картосхеме случайным образом были сформированы исходные обучающие выборки объемом 48 точек (по 3 точки на каждый класс, представленный на эталонной картосхеме), 80 точек (по 5 точек на класс) и 160 точек (по 10 точек на класс). Каждая из этих выборок расширялась на 5, 10, 15 и 20 %. Значение параметра $\alpha = 10$ было зафиксировано. Расширение выборок осуществлялось с использованием первых четырёх признаков, полученных с помощью метода главных компонент. Переход к главным компонентам обусловлен высокой вычислительной сложностью процедуры «среднего сдвига», связанной с необходимостью многократного вычисления евклидова расстояния в многомерном пространстве признаков. Полученные выборки использовались для классификации изображения алгоритмом SVM на основе радиальных базисных функций. Классификация выполнялась в пространстве признаков, полученных с помощью метода главных компонент. Использовалась реализация алгоритма SVM, включённая в пакет программ Exelis ENVI. Для всех настраиваемых параметров алгоритма выбирались значения по умолчанию. Точность классификации определялась посредством сравнения полученных картосхем с эталонной. Для усреднения результатов исходные выборки формировались по три раза и для каждой из этих выборок эксперимент с одним и тем же набором параметров повторялся трижды. Полученные значения точности классификации (в процентах) приведены в таблице. На рис. 2 представлена зависимость средней и максимальной точности классификации от параметра p. Значение $p = 0$ соответствует исходной ОВ.

Анализ результатов показывает, что расширение ОВ с помощью предложенного алгоритма позволяет значительно повысить точность классификации, особенно при скромном объёме исходной выборки (по 3 точки на класс). Кроме того, использование

значений параметра $p > 10$ приводит к незначительному увеличению точности классификации при существенном росте времени обработки, особенно при большом объёме исходной выборки.

Заключение. В работе предложен эффективный метод наращивания обучающей выборки в задачах классификации спутниковых изображений, позволяющий учитывать структуру непомеченных данных. Экспериментальное исследование с использованием гиперспектрального спутникового изображения Salinas показало, что предложенный метод эффективен даже при малом объеме исходной выборки (по 3 точки на класс).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг. (проект № 49) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-37-00492-мол_а).

Список литературы

1. Realistic evaluation of deep semi-supervised learning algorithms / A. Oliver, A. Odena, C. Raffel [et al.] // arXiv preprint arXiv:1804.09170. 2018. 13 p.

2. good semi-supervised learning that requires a bad GAN / Z. Dai, Z. Yang, F. Yang [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. P. 6510-6520.

3. Раудис Ш.Ю. Влияние объема выборки на качество классификации (обзор) // Статистические проблемы управления: сб. Вильнюс: Институт математики и кибернетики АН ЛитССР, 1984. Вып. 66. С. 9–42.

4. Richards J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin: Springer–Verlag, 1999. 240 p.

5. Dundar M.M., Landgrebe D.A. Cost-effective semi-supervised classifier approach with kernels // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42, № 1. P. 264–270.

6. Juszczak P., Duin R.P.W. Learning from a test set // Proceedings of 4th International Conference on Computer Recognition Systems. LNCS: Springer-Verlag, 2005. P. 203–210.

7. Куликова Е.А., Пестунов И.А. Классификация с полуобучением в задачах обработки многоспектральных изображений // Вестн. Казах. нац. ун-та. Серия «Математика, механика, информатика». 2008. Т. 13, № 3. С. 284–290.

8. Bennett K., Demiriz A. Semi-supervised support vector machines // Advances in Neural Information Processing Systems. 1999. P. 368–374.

9. Zhu X. Semi-supervised learning literature survey // Computer Science. University of Wisconsin-Madison, 2006. Vol. 2, N 3. P. 4.

10. Fast and simple gradient-based optimization for semi-supervised support vector machines / F. Gieseke, A. Airola, T. Pahikkala, O. Kramer // Neurocomputing. 2014. Vol. 123. P. 23–32.

11. Comaniciu D., Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24, № 5. P. 603–619.

12. Hyperspectral Remote Sensing Scenes. URL: http://www.ehu.eus/ccwintco/index.php/Hyperspectral_Remote_Sensing_Scenes#Salinas_scene.

УДК 537.86

А.В. Сорокин[1, 2], В.Г. Подопригора[3], Е.И. Пономарёв[1]

[1]Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
[3]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: sorav@iph.krasn.ru

ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕВОСТОЯ НА РАДИОСИГНАЛЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА

Представлена структурная диэлектрическая модель леса с учетом градиентов распределения электрофизических характеристик древостоя. Рассматриваются разномасштабные структурные образования отдельных деревьев и древостоя в целом как иерархическая система компонент смешанного диэлектрика. Анализируется возможность использования ориентационного параметра порядка ветвей в слое крон для оценки градиентов неоднородного распределения электрофизических характеристик леса.

Ключевые слова: структурная модель древостоя, смешанный диэлектрик, градиенты, электрофизические характеристики, сигналы ГЛОНАСС и GPS.

Ведение. Разработка методов восстановления физических характеристик лесных массивов с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS имеет перспективы создания эффективной системы мониторинга леса универсальным пользовательским ресурсом – глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС) [1]. Доступные сигналы ГНСС представляются как эффективный инструмент непрерывного локального мониторинга лесных массивов, что позволяет получать данные о физических характеристиках и состоянии древостоя земных покровов с частотой отсчетов 1 Гц в интервале рабочих частот L-диапазона. Сканирование древостоя разнонаправленными потоками СВЧ-излучения позволяет восстанавливать распределения фитомассы и влажности древостоя на участках леса площадью до 3 га в окрестности расположения антенны. Существенным является длительность суточных и сезонных процессов изменений содержания воды в деревьях и воздухе лесного полога по сравнению с длительностью зондирующих сигналов ГНСС (1 мс). Аппаратно-программный комплекс для регистрации изменений характеристик прошедших и рассеянных сигналов ГНСС в лесу обеспечивает получение коэффициентов ослабления от локализованных участков лесных массивов [2].

Наличие электрофизических моделей взаимодействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона с древостоем позволяет восстанавливать из погонных коэффициентов ослабления количественные значения таксационных параметров и влагосодержания лесных массивов. Решение задачи восстановления предполагает разработку адаптивных моделей, учитывающих структурное и видовое разнообразие отдельных деревьев и древостоя в целом как иерархической системы компонент смешанного диэлектрика.

В данной работе представлен вариант разработки электрофизической модели древостоя, адаптированной для характеристик сигналов ГНСС диапазона L1.

Особенности электрофизической модели леса для сигналов ГНСС. Лесные массивы являются случайно неоднородными средами с элементами дерева различной

© Сорокин А.В., Подопригора В.Г., Пономарёв Е.И., 2018

формы, размеров и пространственной ориентации [3]. Универсальный подход к описанию электрофизических свойств разных видов леса возможен при рассмотрении леса как многофазной диэлектрической среды с потерями, характеризуемой эффективной диэлектрической проницаемостью (ЭДП). Лесной массив как двухкомпонентная сплошная диэлектрическая среда, включающая разномасштабные элементы дерева и воздух, может рассматриваться как смешанный неоднородный диэлектрик. Экспериментальные данные о зависимости диэлектрической проницаемости древесины разных видов леса от влажности и температуры для радиочастот в диапазоне 20–10^{11} Гц представлены в монографии [4].

Диэлектрическая проницаемость листьев и хвои разных видов леса в зависимости от влажности варьируется для действительной части ε' от 1 до 40 и для мнимой части ε'' от 0,2 до 5 [5].

Электрофизическая модель леса как совокупность отдельных деревьев с относительно малой плотностью распределения элементов деревьев в объеме древостоя предполагает учет диэлектрических свойств отдельных элементов деревьев в заданном диапазоне частот. Анизотропия древесины определяет градиенты анизотропии как отдельного дерева так лесного массива в целом. Случайно-неоднородное распределение деревьев в пространстве формирует неоднородности биомассы ассоциированных групп деревьев с размерами, превышающими на порядок характерные размеры отдельного дерева. Одним из перспективных направлений математического моделирования лесных экосистем является ярусно-мозаичный подход к структурированию лесного массива [6]. На рис. 1 представлены структура деревьев и слои древостоя.

а *б* *в* *г*

Рис. 1. Структурные уровни деревьев и древостоя:
а – ель; *б* – лиственница; *в* – сосновый лес; *г* – смешанный лес

В рамках этого подхода возможно создание электрофизической модели леса, позволяющей адекватно процессам эволюции биометрических характеристик леса описывать закономерности пространственно-временных изменений его электрофизических параметров.

Масштабирование базисных элементов ярусно-мозаичной электрофизической модели древостоя для СВЧ-диапазона L1 определяется длиной волны зондирующего сигнала $\lambda \approx 0{,}2$ м. Зрелые бореальные леса в условиях наземного расположения приемной антенны позволяют выделить следующие уровни базисных элементов:

- уровень 1, хвоя, листья, ветки с диаметром $d << \lambda$;
- уровень 2, ветки и стволы с диаметром $d \geq \lambda$;
- уровень 3, крона, ствол дерева с протяженностью по вертикали $h >> \lambda$;
- уровень 4, выделенные слои крон и стволов древостоя, с протяженностью по вертикали, $H_{кр}$ и $H_{ст} >> \lambda$;
- уровень 5, группы деревьев на площадках площадью до 100 м^2.

Вид отдельного дерева, его таксационные показатели, диэлектрические свойства его элементов определяют электрофизические характеристики древостоя.

Выделенные слои древостоя различаются по объемной плотности фитомассы, анизотропии эффективной диэлектрической проницаемости, величине и направленности градиентов электрофизических характеристик в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Дерево как «атомарный» элемент древостоя является основной структурной единицей любого лесного массива. Отдельное дерево описывается также структурными уровнями 1–4. Видовое различие данных структурных уровней наблюдается в любом возрасте деревьев. Ствол вместе с крупными ветвями отдельного дерева представляет упорядоченную систему, которую можно охарактеризовать ориентационным параметром порядка S относительно вертикального направления [7]:

$$S = <3\cos^2 - 1>/2.$$

Усреднение осуществляется по всему ансамблю ветвей. На сечение рассеяния этой системы влияет дисперсия величины S, пропорциональная $\cos^4\theta$.

Стволы деревьев ориентированы практически строго вертикально, поэтому слой столов имеет близкое к единице значение S. Величина разности действительных частей продольной и поперечной компонент диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon' = \varepsilon'(L) - \varepsilon'(C)$ древесины с влажностью 40 % для ели и лиственницы при температуре 20 ^{o}C [4] составляют 2,8 и 9,6 соответственно. Следовательно, слой стволов обладает достаточной анизотропией, чтобы влиять на правую круговую поляризацию сигналов GPS и ГЛОНАСС.

Кроны деревьев, как правило, имеют три яруса ветвей, заметно различающиеся по углу θ. На рис. 1, *а* и *б* представлена геометрия ветвей в кронах лиственницы и ели. Как видно из рис. 1, углы наклона ветвей для разных видов деревьев изменяются в интервале 30–90°. Градиенты параметра порядка ветвей кроны от верхней границы крон до нижней изменяют величину анизотропии крон. В случае равновероятной ориентации в пространстве ветвей действительная часть $\varepsilon' = [\varepsilon'(L) + \varepsilon'(C)]/2$, кроны близки к изотропной среде.

Неоднородности 5-го уровня сохраняют особенности ЭДП, рассмотренные выше, с вариациями ЭДП, обусловленными различной плотностью деревьев в локальных группах деревьев. На рис. 2 представлены спутниковый снимок и план распределения деревьев березового и соснового леса, демонстрирующий наличие локализованных групп деревьев на площадках с характерными размерами 10–20 м.

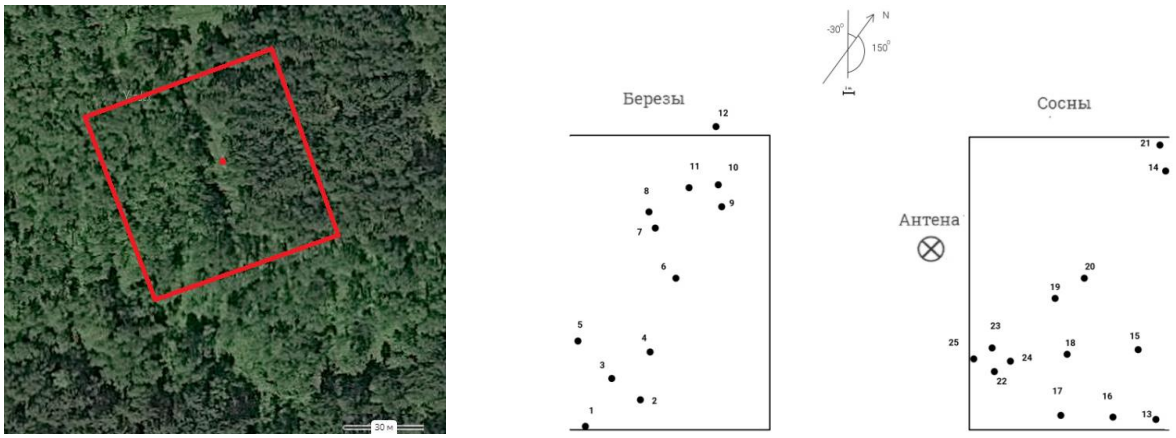


Рис. 2. Распределения деревьев на экспериментальной площадке

Экспериментальные исследования лесных массивов методом радиопросвечивания сигналами ГНСС [2] выявили немонотонные зависимости погонного коэффициента ослабления от длины трассы. Сканирование лесного массива сигналами ГНСС обнаруживает локализованные группы деревьев по временным интервалам аномалий монотонной зависимости амплитуды сигналов от времени.

На рис. 3 представлена запись сигналов спутника ГЛОНАСС 24 при сканировании массива соснового и березового леса. Уменьшение амплитуды сигнала после прохождения древостоя позволяют установить границы локализованных групп деревьев. Точки 1–2 соответствуют траекториям сигналов, проходящим по границам группы берез, 3–4 относятся к трассам сигнала, расположенным внутри группы сосен.

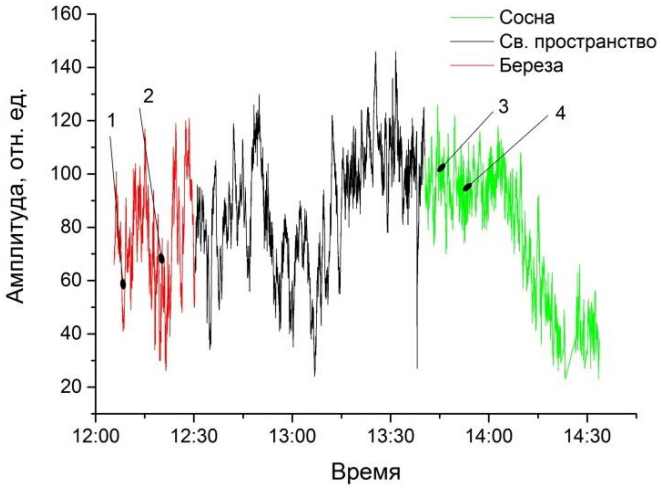


Рис. 3. Флуктуации амплитуды сигналов ГНСС в смешанном лесу

Заключение. Предложена пятиуровневая структурная диэлектрическая модель леса с учетом градиентов распределения электрофизических характеристик древостоя. Выделены разномасштабные структурные образования отдельных деревьев и древостоя в целом, образующие ярусно-мозаичную иерархическую систему. Рассмотрена возможность учета анизотропии ЭДП в слое крон с использованием параметра ориентационного порядка ветвей. Сделаны оценки градиентов ЭДП древостоя, обусловленные неоднородным распределением фитомассы деревьев в объеме лесного массива.

Список литературы

1. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing – Springer Dordrecht Heidelberg. New York; London, 2014. 286 p.

2. Эволюция характеристик сигналов навигационных спутников в лесу / А.В. Сорокин, В.Г. Подопригора, С.В. Фомин, И.В. Савин. // Изв. вузов. Серия «Физика». 2017. Т. 60, № 12/2. С. 19–22.

3. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 392 с.

4. Torgovnikov G.I. Dielectric Properties of Wood and Wood Based Materials. Berlin, Springer – Verlag, 1993. 194 p.

5. Новик С.Н. Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с лесным Пологом: дис. … канд. физ.-мат наук. Томск: ТГУ, 2007. 197 с.

6. Карев Г.П. Структурные модели лесных экосистем // Сиб. экол. журн. 1999. № 4. С. 381–396.

7. Блинов Л.М. Электро- и магнитоптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.

УДК 528.8.04, 528.88

Г.О. Тепаносян, В.С. Мурадян, А.А. Овсепян, Ш.Г. Асмарян

Центр эколого-ноосферных исследований Национальной академии наук Армении, Ереван, Армения
e-mail: aza.hovsepyan@cens.am

ОЦЕНКА ЭРОЗИОННОГО РИСКА ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ CORINE

Рассмотрено использование модели CORINE для оценки и картографирования риска эрозии почв на примере сельской общины Неркин Саснашен, Армения. Путем наложения слоев эродируемости, эрозионности, уклона поверхности и растительного покрова были получены потенциальный и реальный риск эрозии почв. Результаты показывают, что исследуемая территория характеризуется низким уровнем риска эрозии.

Ключевые слова: эрозия почв, CORINE, ГИС, пастбища.

Введение. В Армении эрозия почв является очень распространенной и актуальной проблемой [1]. Оценка риска эрозии важна для определения возможных последствий и потенциальных мер управления.

Существуют многочисленные модели оценки риска эрозии почв [10]. Среди них в мире, особенно в странах Евросоюза, широко используется модель CORINE [7], которая представляет собой полукачественный картографический метод, где путем наложения нескольких тематических слоев можно получить пространственную неоднородность риска эрозии почв (РЭП). Большим преимуществом данной модели является простая структура и интеграция с геоинформационной системой (ГИС) и дистанционным зондированием (ДЗ) [12].

Целью данной работы является оценка РЭП в первом приближении, используя модель CORINE на примере сельской общины Неркин Саснашен, Армения.

Район исследования. Объектом исследования была выбрана сельская община Неркин Саснашен (40°59′E, 40°21′N) (Армения) (≈1 180 га). Район характеризуется сильной каменистостью почв [6]. Норма осадков в период июль – август составляет 50–150 мм, средняя температура воздуха в июле варьирует в пределах 10–20 °C. Район исследования 5–6 месяцев в году (ноябрь, декабрь – март, май) покрыт устойчивым снежным покровом [5].

Модель эрозии CORINE. Эродируемость почвы характеризует подверженность почв к негативным воздействиям дождя и поверхностного стока. В общем плане эродируемость в основном зависит от структурной стабильности и водопроницаемости почв. Эти свойства, в свою очередь, зависят от механического состава, структуры почв, содержания органического вещества, свойств материнской породы и других факторов [12; 9]. В моделе CORINE эродируемость почв вычисляется как функция механического состава, глубины и каменистости почв (рис. 1) [12; 9], которые были взяты из соответствующих литературных источников и фондовых отчетов [6; 4] и впоследствии стандартных ГИС операций были трансформированы в соответствующие ГИС слои.

Имеющиеся данные механического состава почв соответствуют классификации Качинского, а в модели используется классификация USDA [11], так как прямого перехода из одной классификационной системы в другую не существует, слой механического состава почв не был использован в модели на данном этапе.

© Тепаносян Г.О., Мурадян В.С., Овсепян А.А., Асмарян Ш.Г., 2018

В результате наложения картографических слоев каменистости и глубины почв и классификации, согласно модели CORINE, был получен картографический слой эродируемости (рис. 2). В местах, где почвенный покров отсутствует (например, жилые, застроенные территории и водные объекты), эродируемость приравнивается к 0, что означает, что в этих территориях эрозии быть не может [9].

Эрозионность в основном зависит от интенсивности и количества осадков и характеризует эффект воздействия осадков, а также отражает объем и модуль поверхностного стока. В модели CORINE эрозионность вычисляется объединением двух климатических индексов: климатический индекс Фурниера (modified Fournier index (MFI)) и индекс аридности Багноулс – Гауссен (Bagnouls – Gaussen aridity index (BGI)) (рис. 1).

MFI вычисляется согласно следующей формуле:

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_a},$$

где P_i – среднемесячная норма осадков; P_a – общее среднее годовое количество осадков.

BGI вычисляется по формуле

$$BGI = \sum_{i=1}^{12} (2t_i - P_i)k_i,$$

где t_i – среднемесячная температура; k_i – пропорция месяцев, в течение которых $2t_i - P_i > 0$.

Картографические слои MFI и BGI были получены из данных пяти метеорологических станций в районе исследования [2; 3] методом обратных взвешенных расстояний (IDW). В результате наложения слоев MFI и BGI и классификации согласно модели CORINE был получен картографический слой эрозионности (рис. 2).

Уклон поверхности без сомнения, является одним из важнейших факторов эрозии почв, особенно, когда превышает критическое значение [6; 9; 12]. Картографический слой уклона поверхности был получен в результате классификации цифровой модели рельефа, полученной из топографических карт масштаба 1 : 25 000 согласно модели CORINE (рис. 2).

Растительный покров, вероятно, является самым важным фактором в моделях эрозии, поскольку он легко подвергается изменению и может быть использован для контроля эрозии [9; 12]. Для получения слоя растительного покрова карта землепользования / почвенно-растительного покрова CORINE [8] (рис. 2) была классифицирована в два класса согласно модели CORINE (полностью защищенные и не полностью защищенные).

Оценка риска выполнена в два этапа: 1) получение потенциального РЭП (ПРЭП) путем наложения картографических слоев эродируемости, эрозионности и уклона поверхности; 2) получение реального РЭП (РРЭП) путем добавления слоя растительного покрова к ПРЭП и классификации согласно модели CORINE (рис. 1, 3). ПРЭП определяется как присущий риск эрозии независимо от текущего землепользования и растительного покрова и представляет собой наихудшую возможную ситуацию. РРЭП отражает защитное воздействие, обусловленное текущим землепользованием, и возможные опасности, связанные с изменениями землепользования [12].

Модель CORINE, интегрированная с ГИС технологиями, обладает большим потенциалом для получения полезной и недорогой информации о риске эрозии почв. Как видно из полученных результатов, большая часть исследуемой территории (≈88 %) характеризуется низким риском эрозии. Эрозия отсутствует примерно на 11 % общей

территории, которые в основном соответствуют населенной части деревни. Участки с умеренным риском эрозии составляют незначительную часть исследуемой территории (0,4 %). Однако нужно еще раз отметить, что модель использована в первом приближении и требует дополнения входных данных, а именно, данных по механическому составу почв в соответствии со стандартами модели CORINE.

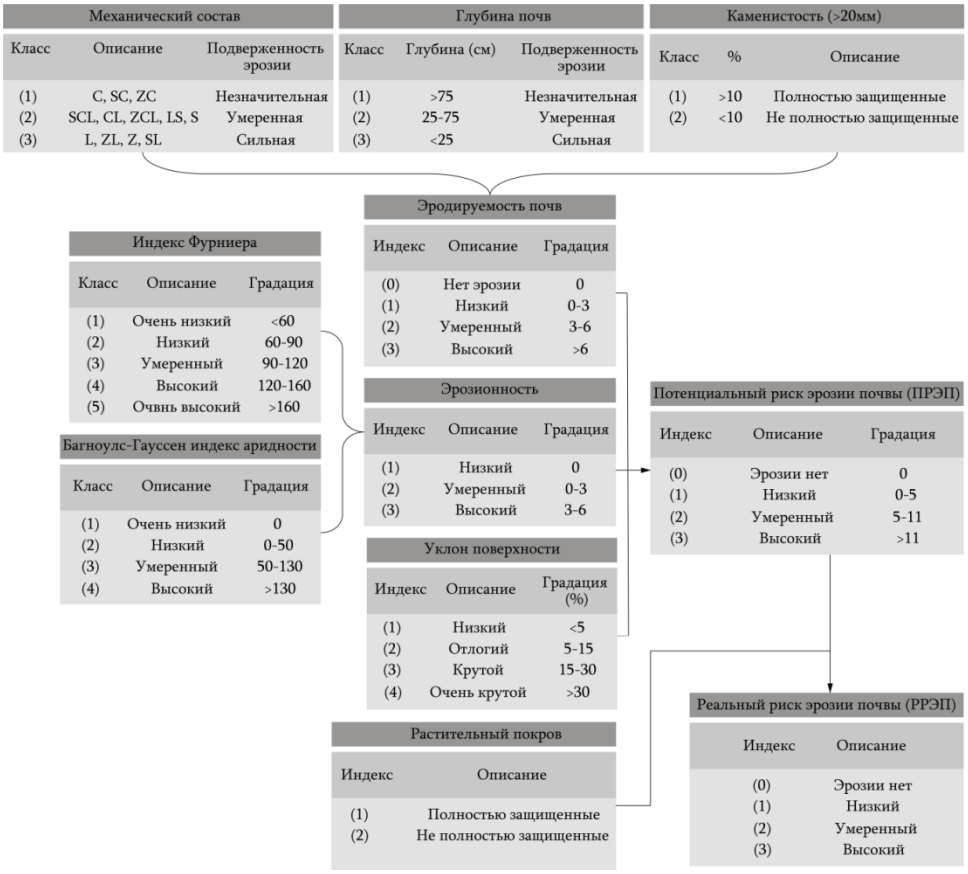


Рис. 1. Методология оценки риска эрозии почв CORINE

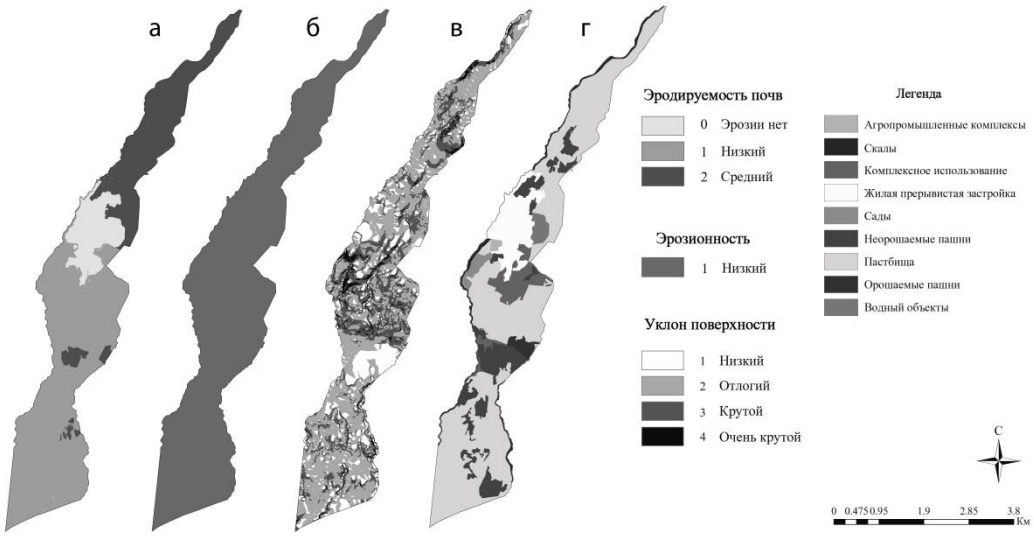


Рис. 2. Тематические слои эродируемости (*а*), эрозионности (*б*), уклон поверхности (*в*) и землепользования / почвенно-растительного покрова CORINE (*г*)

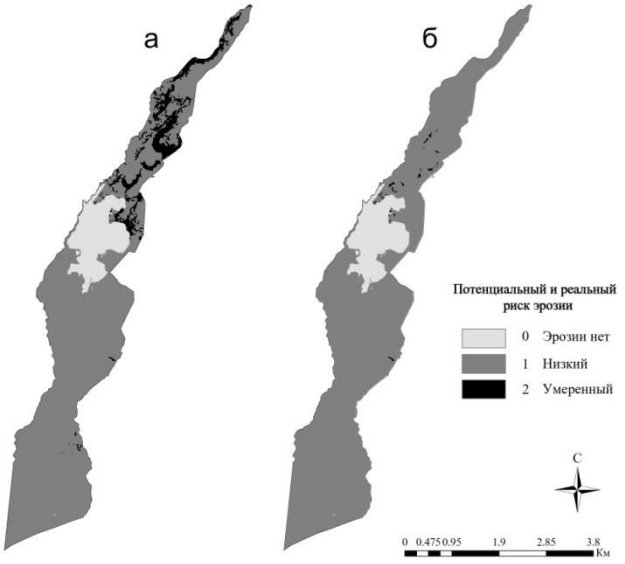


Рис. 3. Тематические карты потенциального риска эрозии почв (ПРЭП) (*а*) и реального риска эрозии почв (РРЭП) (*б*)

Список литературы

1. Алексанян К., Мурадян В. Геоэкологические последствия деградации почв РА. Материалы научной конференции «Географическая наука в Армении». Ереван: ЕГУ, 2006. С. 385–392. (на армянском)

2. Климатический справочник РА. Ч. I: Температура воздуха и почвы / Министерство чрезвычайных ситуаций. Армгосгидромет. Ереван, 2011. 149 с. (на армянском)

3. Климатический справочник РА. Ч. II: Влажность воздуха, осадки и снежный покров / Министерство чрезвычайных ситуаций. Армгосгидромет. Ереван, 2011. 171 с. (на армянском)

4. Краткая характеристика почвенного покрова территории колхоза Неркин Сасунашен, Талинская область. Научно-исслед. инс. почв. и агрох. Ереван, 1964. 21 с. (на армянском)

5. Национальный атлас Армении. Т. А. Центр геодезии и картографирования ГНКО. Ереван, 2007. 229 с. (на армянском)

6. Погосян Д.А. Сельскохозяйственная оценка природных ресурсов территории Армянской ССР. Ереван: Изд-во АН Армвнской ССР, 1986. 221с.

7. Soil Erosion in Iceland / O. Arnalds, E.F. Thorarinsdottir, S. Metusalemsson [et al.] // Soil Conservation Services and Agricultural Research Institute. Iceland. 2001. P. 121.

8. Bossard M., Ferance J., Otahel J. CORIEN land cover technical guide // Addendum. 2000. EEA, Copenhagen. 2000. P. 105.

9. CORINE: soil erosion risk and important land resources in the Southeastern regions of the European community. EUR 13233. Luxembourg, Belgium, 1992. P. 124.

10. Kapalanga T.S. A Review of Land Degraradatation Ass ess ment Methods. Land Restor. Train. Program. Keldnaholt. 2008. 112. P. 17–68.

11. SSDS, Soil Survey Division Staff, Soil Survey Manual U.S. Department of Agriculture. Handbook. № 18. U.S. Government Printing Office, Washington DC, USA, 1993.

12. Zhu M. Soil erosion risk assessment with CORINE model: case study in the Danjiangkou Reservoir region, China. Stoch Environ Res Risk Assess 26, 2012. P. 813–822.

УДК 528.854, 528.065

В.А. Хамедов

ООО «Геопроектсервис», Ханты-Мансийск, Россия
e-mail: khamedov.vladimir@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИК-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ С ПОРУБОЧНЫМИ ОСТАТКАМИ

С использованием космической съемки в ИК-диапазоне возможно получение информации о наличии на лесных участках порубочных остатков. Описанный в публикации способ обнаружения порубочных остатков имеет сезонный характер и может быть применен в период интенсивного снеготаяния до начала пожароопасного периода.

Ключевые слова: космические снимки, Landsat-8, порубочные остатки, способ обнаружения, ИК-диапазон, тепловая аномалия, пожароопасный период.

Ханты-Мансийский автономный округ обладает значительными лесосырьевыми ресурсами. Площадь лесов округа составляет 50,41 млн га (6,2 % от общей площади всех лесов России) с общим запасом насаждений 3 133,14 млн м^3. Лесопромышленную деятельность в автономном округе осуществляют более 130 организаций и индивидуальных предпринимателей. По состоянию на 01.01.2018 на территории округа заключено и действует 108 договоров аренды лесных участков для заготовки древесины. Общий ежегодный объем заготовки древесины по договорам аренды составляет 2 876,21 тыс. м^3, а площадь, переданная арендаторам, – 2 812,085 тыс. га.

Проведение работ на лесных участках сопровождается появлением на них порубочных остатков (ветки, сучки, обломки стволов растений и верхушки деревьев). Наличие на участках порубочных остатков в пожароопасный период запрещено, согласно п. 9.1 Правил пожарной безопасности в лесах [1]. В настоящее время для обнаружения участков с порубочными остатками используются космические снимки высокого пространственного разрешения или материалы аэрофотосъемки. На таких снимках порубочные остатки дешифрируются визуально. Однако снимки высокого пространственного разрешения имеют, как правило, ограниченную полосу обзора и высокую стоимость.

Для выполнения работ по контролю за состоянием лесных рубок и принятию решений по очистке отдельных лесных участков от порубочных остатков может быть применен критерий оптимальности, позволяющий выполнить работу с наименьшими затратами. В проведенном [2] исследовании с учетом цели мониторинга состояния лесных земель выбрана двухкритериальная оптимизация с критериями «качество» и «цена». Это позволяет учесть как производственно-технические (качество продукции), так и экономические (цена), требования. Отметим, что продукцией решаемой задачи является информация о состоянии лесных земель.

В [2] предложен и реализован следующий критерий оптимальности

$$E = (f \times T)/S \to \min, \quad (1)$$

где T – время, необходимое для выполнения работы по тематическому анализу; S – площадь исследуемого объекта; f – показатель формы объекта, определяемый отношением квадрата периметра объекта (p^2) к его площади (S),

$$f = p^2/(4 \times \pi \times S). \quad (2)$$

© Хамедов В.А., 2018

Минимизация критерия (1) с учетом формулы (2) позволяет выбрать оптимальный вариант использования системы мониторинга на основе данных ДЗ для конкретного участка территории. Оценка финансовых затрат на получение полезной информации о состоянии земель есть результат умножения *E* (1) на стоимость космического снимка, формируемую оператором космической системы дистанционного зондирования.

В настоящей статье представлен способ обнаружения лесных участков с порубочными остатками по космическим снимкам среднего пространственного разрешения с космического аппарата Landsat-8 в инфракрасном (ИК) диапазоне. Излучение земных покровов в ИК-диапазоне носит тепловой характер и интенсивность теплового излучения определяется температурой нагрева излучающего объекта, отображенного на космическом снимке. Примеры использования космических снимков ИК-диапазона для анализа тепловых аномалий представлены в ряде публикаций [3–5].

В весенний период, во время таяния снежного покрова, лесные участки с порубочными остатками можно обнаружить по мультиспектральным космическим снимкам ИК-диапазона в соответствии с законом излучения Кирхгофа из-за различий температуры прогревания лесных участков. При таянии снежного покрова неубранные порубочные остатки проявляются на космических снимках в виде тепловых аномалий в средней инфракрасной области спектра. Различия в яркости участков изображения связаны с различной степенью отражательной способности нагретых участков в различных длинах волн.

Мультиспектральное изображение для дешифрирования участков с порубочными остатками может быть сформировано из спектральных каналов прибора ETM+ космического аппарата Landsat-8 по схеме смешения каналов RGB (7-5-3).

На рис. 1 представлен фрагмент сформированного мультиспектрального космического снимка Landsat-8 на участок с лесными рубками в районе пос. Леуши Кондинского района Ханты-Мансийского автономного округа. Снимок получен 21.03.2017, в начальный период таяния снежного покрова. Красным цветом на изображении отображаются объекты с тепловыми аномалиями – участки рубок с порубочными остатками на них (обозначены A, B и C) и прогретое полотно автодороги с асфальтовым покрытием (обозначено D). На лесных участках, обозначенных A и C, видны порубочные остатки, собранные в валы.

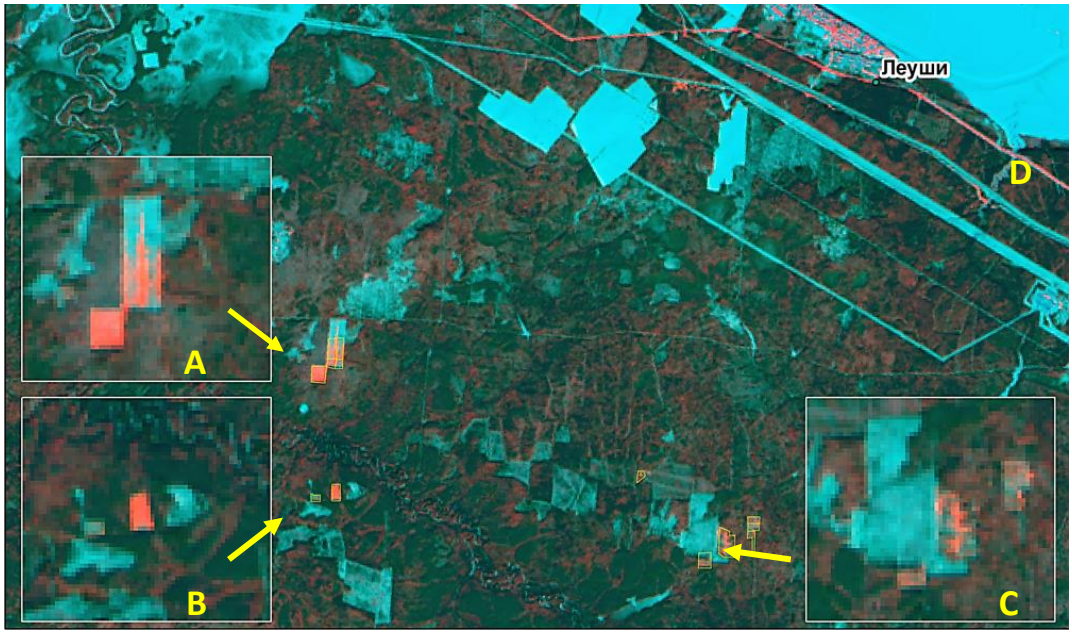


Рис. 1. Фрагмент изображения лесного участка с порубочными остатками
в ИК-диапазоне. Дата съемки: 21.03.2017

На рис. 2 представлены совмещенные графики высоты снежного покрова и температуры воздуха по данным метеостанции в пос. Леуши. После 21.02.2017 для данной территории наблюдается положительная динамика таяния снежного покрова. С повышением температуры участки с порубочными остатками прогреваются сильнее. Вместе с повышением температуры и таянием снежного покрова прогревается весь участок. После 06.04.2017 высота снежного покрова резко уменьшается, затрудняя обнаружение участков с порубочными остатками.

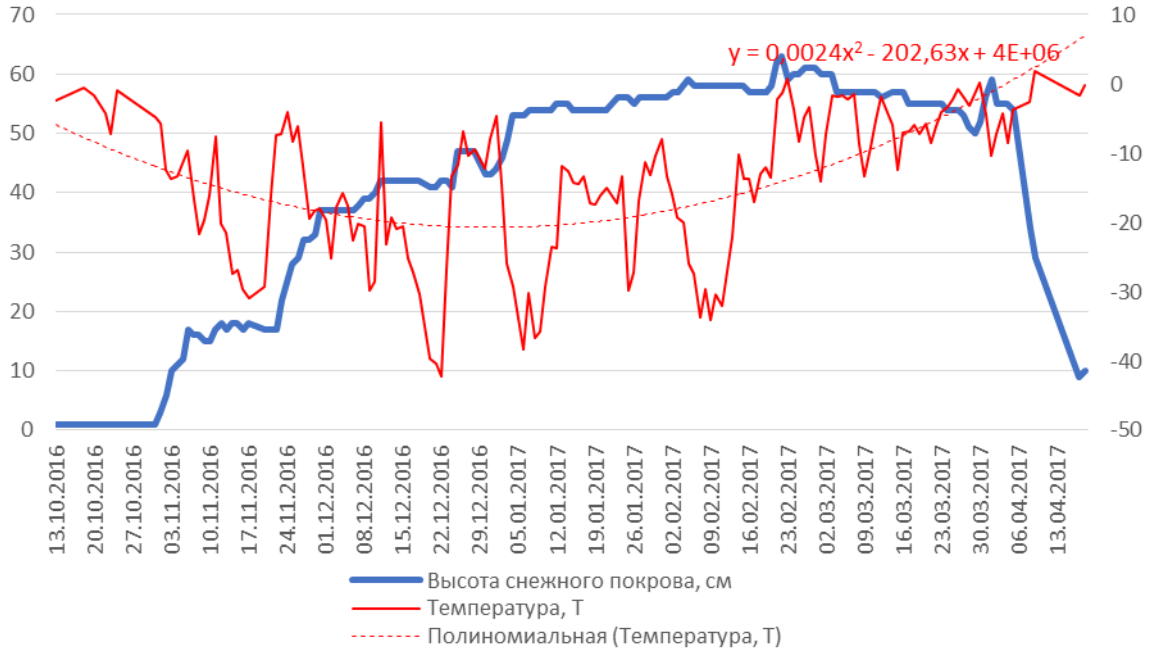


Рис. 2. Динамика высоты снежного покрова и температуры воздуха в период наблюдения

Представленный в статье способ обнаружения участков с порубочными остатками при дешифрировании космических снимков среднего пространственного разрешения возможен в весенний период, в момент интенсивного таяния снега. Способ позволяет обнаружить на изображениях участки рубок прошедшего зимнего периода, не очищенные от порубочных остатков, определить границы и площади лесосек. Полученная информация может быть использована при проведении комплексного спутникового мониторинга лесных экосистем [6] и получении оперативного прогноза пожароопасности лесных участков непосредственно перед началом пожароопасного сезона. Установление пожароопасных сезонов находится в компетенции органов региональной государственной власти в области лесных отношений. На территории Ханты-Мансийского автономного округа установление пожароопасного сезона происходит в соответствии с Приказами Департамента недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Заключение. Предлагаемый способ обнаружения лесных участков с порубочными остатками основан на использовании широко распространенных космических снимков среднего пространственного разрешения. Использование ИК-диапазона для обнаружения порубочных остатков имеет сезонных характер, поэтому представленный способ может быть применим в момент интенсивного таяния снежного покрова на лесных территориях. Практическая значимость выражается в возможности обнаружения и картографирования участков с порубочными остатками непосредственно перед началом пожароопасного сезона. Это позволит своевременно приять необходимые меры по снижению пожароопасности в лесах перед началом пожароопасного сезона.

Список литературы

1. Правила пожарной безопасности в лесах: Постановление Правительства РФ от 30.06.2007 № 417 (ред. от 18.08.2016). URL: http://www.garant.ru.

2. Мазуров Б.Т., Аврунев Е.И., Хамедов В.А. Оперативный мониторинг лесных земель северных регионов на основе использования оптических и радарных космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 103–111.

3. Oki K., Omasa K. Technique for Mapping Thermal Infrared Radiation Variation Within Land Cover // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. № 6. P. 1521–1524.

4. Gluch R., Quattrochi D.A., Luvall J.C. A multi-scale approach to urban thermal analysis // Remote Sensing of Enviromment. 2006. № 104. P. 123–132.

5. Грищенко, М.Ю. Применение тепловых снимков системы ETM+ для изучения теплового острова Москвы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 95–101.

6. Хамедов В.А., Мазуров Б.Т. Разработка методических вопросов создания системы спутникового мониторинга состояния лесных экосистем в условиях воздействия нефтегазового комплекса территории Западной Сибири // Вестн. СГУГиТ. 2015. Вып. 3 (31). С. 16–31.

УДК 004.932.2

В.Б. Царук, А.В. Пятаева

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: demi-lada@mail.ru

КОМПЕНСАЦИЯ АРТЕФАКТОВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ

Присутствие атмосферных осадков может существенно влиять на качество работы различных алгоритмов компьютерного зрения. В зависимости от типа и интенсивности атмосферных осадков выделяют различные виды искажений, вносимых на видео осадками. В настоящей работы компенсация влияния атмосферных осадков выполняется последовательным применением серии фильтров: подавляющих аддитивной шум, фильтра размытия границ и фильтра повышения резкости.

Ключевые слова: атмосферные осадки, дождь, снег, видеоизображения.

Введение. Артефакты атмосферных осадков могут часто присутствовать на видеоизображениях, полученных при съемке на открытых пространствах. При детектировании объектов на видеоизображении сложные погодные условия играют существенную роль. В зависимости от предмета распознавания исследователи используют различные приемы, помогающие избегать негативного влияния таких факторов, как дождь, снег, морось и пр. Для обнаружения дождя и снега на видеоизображениях используют следующие подходы: оптический [1; 2], подходы пространственной области [3], подходы частотной области [4]. Как правило, компенсация влияния атмосферных осадков выполняется в два этапа: поиск поврежденных областей и устранение артефактов осадков. Для выделения поврежденных осадками областей используют гауссовское распределение и алгоритм сопоставления блоков [5], признаки солнечной и дождевой сцены [6; 7], альбедо ландшафта и вычисление общего контраста изображения [8] и другие методы. Для устранения артефактов атмосферных осадков возможно совместное использование HOG-гистограмм и метода получения темного канала [6] в работах

© Царук В.Б., Пятаева А.В., 2018

активно используется модель атмосферного рассеяния [9; 10], повышение общего контраста изображения.

Алгоритм устранения артефактов, вносимых атмосферными осадками. К атмосферным осадкам относят дождь, снег, туман, град, росу и морось различной интенсивности. Все эти типы осадков представляют собой воду в жидком или твердом состоянии, выпадающую из облаков или осаждающуюся из воздуха на поверхность Земли. Влияние атмосферных осадков на качество изображения, полученного при их воздействии на объект съемки, зависит от их вида и интенсивности. Один и тот же объект на изображении при различных погодных условиях выглядит совершенно по-разному. На рис. 1 показана площадь Тяньаньмэнь (Китай) в различную погоду. Атмосферные осадки обладают большим разнообразием. В зависимости от типа атмосферных осадков на изображении возможно присутствие различных искажений, таких как: отдельные частицы, полосы (треки), дымка. Примеры различных типов осадков показаны на рис. 2.

а *б* *в* *г*

Рис. 1. Площадь Тяньаньмэнь при разных погодных условиях:
а – солнечная погода; *б* – дымка; *в* дождь; *г* – снег

Для устранения искажений, вносимых атмосферными осадками на видеоизображения, требуется обработать входное видеоизображение и устранить шум, связанный с присутствием атмосферных осадков. С решением этой задачи лучше всего справляются линейные фильтры, определяемые вещественнозначной функцией F. Операция фильтрации выполняется посредством вычисления дискретной свертки согласно выражению (1):

$$I' = (x', y') = \sum_i \sum_j F(i, j)(x + i, y + j), \tag{1}$$

где I' − преобразованное выражение; (i, j) − индексы, определяемые выбранной формой и размером окрестности точки, к которой применяется фильтрация; (x, y) – координаты рассматриваемого пиксела изображения; $F(i, j)$ – вещественнозначная функция, заданная на растре, определяющая линейный фильтр.

а *б* *в* *г* *д*

Рис. 2. Примеры изображений, содержащих различные типы осадков:
а, б – снег; *в, г* – дождь; *д* – туман

На изображениях с атмосферными осадками чаще всего присутствует аддитивный и импульсный шумы, а лучшими фильтрами для их устранения являются линейные усредняющие фильтры. Такие фильтры «размывают» мелкие детали изображений посредством удаления высоких частот, но оставляют четкие границы крупных частиц атмосферных осадков, таких как снег и дождь. Для устранения этого эффекта исполь-

зована серия фильтров, направленных на сглаживание границ или размытие изображения. В качестве фильтра восстановления резкости изображения после применения серии фильтров размытия и устранения шума в работе использован фильтр Лапласа. Дискретный лапласиан определяется суммой вторых производных, а вычисляется как линейная аппроксимация суммы перепадов на соседних пикселах относительно центрального пиксела:

$$\begin{aligned}&\left[f(x+1,y)+f(x-1,y)-2f(x,y)\right]+\left[f(x,y+1)+f(x,y-1)-2f(x,y)\right]=\\&=f(x+1,y)+f(x-1,y)+f(x,y+1)+f(x,y-1)-4f(x,y).\end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, алгоритм компенсации искажений, вносимых атмосферными осадками, на видеопоследовательностях состоит из следующих шагов:

1) подавление аддитивного шума использованием серии фильтров, таких как temporal smoother (адаптивный преобразователь шума), 2D cleaner (заменяет значение яркости каждого пиксела средним числом его окрестностей в случае, если среднее значение попадает в заданный порог), MSU denoiser (фильтр, устраняющий аддитивный шум на видеоизображении);

2) размытие границ для устранения четкости оставшихся крупных элементов атмосферных осадков с использованием таких фильтров, как smart smoother (сглаживание резких границ, сохраняя при этом структуру изображения);

3) повышение резкости видеоизображения фильтрами MSU Smart Sharpen (увеличивает резкость изображения) и sharpen (увеличивает контрастность между смежными элементами изображения).

Блок-схема алгоритма компенсации влияния атмосферных осадков на видеоизображениях показана на рис. 3.

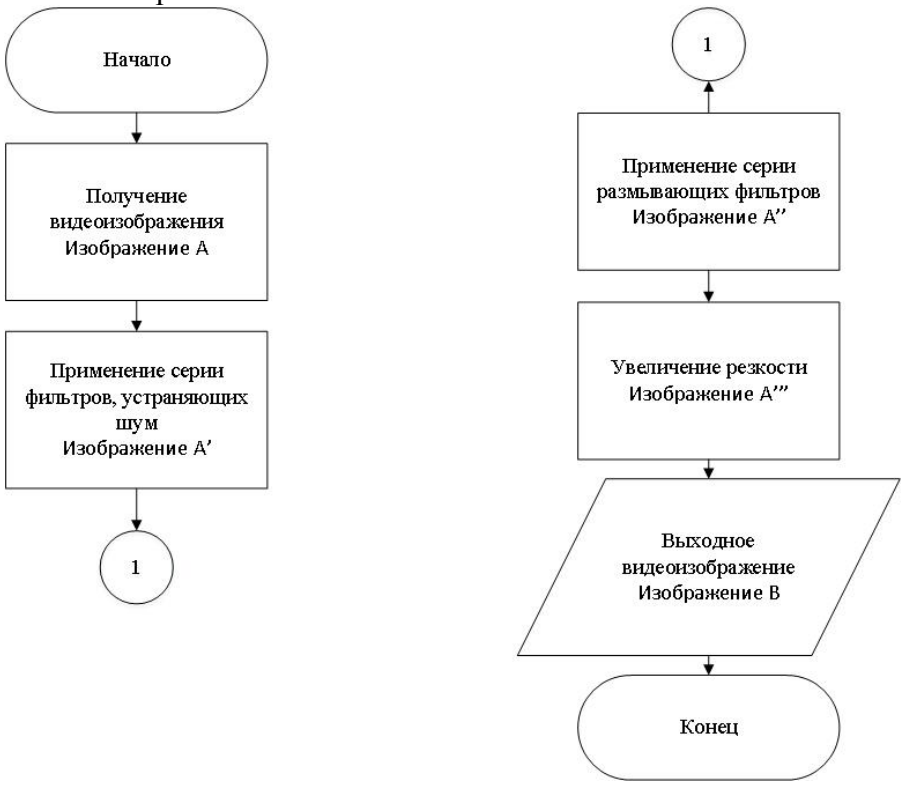


Рис. 3. Блок-схема алгоритма компенсации атмосферных осадков на видеоизображениях

Программная реализация предложенного алгоритма выполнена в пакете VirtualDub v1.10.4 [11] методом последовательного применения серии шумоустраняющих, размывающих и увеличивающих резкость изображения фильтров.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований использовано 14 видеопоследовательностей, полученных с реальных камер видеонаблюдения. Количество кадров тестовой выборки составило 6 248. На видеоизображениях присутствовали дождь и снег различной интенсивности. Видеоролики были получены в различное время суток. Размер кадров видеороликов: 1780×720, 1280×720 и 720×576 пикселов. Скорость работы алгоритма компенсации искажений, вносимых атмосферными осадками, составила 5 кадров в секунду при характеристиках персонального компьютера: процессор Intel Pentium CPU G2030, частота процессора 3.00GHz, 4,00 Гб оперативной памяти. Примеры работы алгоритма компенсации искажений, вносимых атмосферными осадками, показаны на рис. 4.

Рис. 4. Результат удаления искажений, вызванных атмосферными осадками:
а – исходный видеокадр; *б* – осадки скомпенсированы

Дополнительно качество работы алгоритма компенсации атмосферных осадков проверено видеоданных, содержащих дым и пламя. Точность обнаружения этих объектов по видеоданным, на которых осадки удалены с помощью настоящего алгоритма, ниже точности обнаружения дыма и пламени относительно исходного видео в среднем на 0,54 %, что подтверждает эффективность предложенного алгоритма.

Заключение. В работе для удаления артефактов, вносимых атмосферными осадками, использована серия фильтров подавляющих аддитивной шум, размытия повышения резкости. Экспериментальные исследования проведены данных с реальных камер видеонаблюдения. Дополнительно качество работы алгоритма компенсации проверено при обнаружении дыма и пламени на открытых пространствах. Предложенный алгоритм показывает высокую эффективность при удалении искажений, вносимых атмосферными осадками на видеопоследовательности.

Список литературы

1. Garg K., Nayar S.K., Detection and removal of rain from videos // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2004. Vol. 1. Pp 528–535.

2. Rain removal in video by combining temporal and chromatic properties / X. Zhang, H. Li, Y. Qi [et al.] // IEEE Int. Conf. Multimedia Expo. 2006. P. 461–464.

3. Single-image deraining using an adaptive nonlocal means filter / J.H. Kim, C. Lee, J.Y. Sim, C.S. Kim // IEEE Conference Image Processing. 2013. P. 914–917.

4. Barnum P., Kanade T., Narasimhan S.G. Spatio-temporal frequency analysis for removing rain and snow from video // International Conference on Computer Vision. 2007.

5. Kim H.G., Seo S.J., Song B.C. Multi-frame de-raining algorithm using a motion-compensated non-local mean filter for rainy video sequences // J. Vis. Commun. Image R. 2015. P. 317–328.

6. Zheng Z., Huadong M., Fu H, Zhang C. Scene-free multi-class weather classification on single images // Neurocomputing. 2016. P. 365–373.

7. Cewu L., Di L., Jiaya J. Two-Class Weather Classification // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. P. 3718–3725.

8. Detecting and extracting natural snow from videos / Y. Shen, L.Z. Ma, H. Liu [et al.] // Information Processing Letters. 2010. P. 1124–1130.

9. Video object segmentation in rainy situations based on difference scheme with object structure and color analysis / Hu, W.Ch. Chen, Ch-H. Huang, D.-Y., Ye Y. // J. Vis. Commun. Image R. 2012. № 23. P. 303–312.

10. Image visibility enhancement based on atmospheric transmissiontheory and weight analysis under bad weather condition / J. Zhao, X. Gao, Y. Chen, Z. Xu // Optik. 2015. № 126. Pp. 5620–5623.

11. VirtualDub v1.10.4. URL: http://virtualdub.ru/versiya/1_10_4.html.

УДК 528.8

Н.Ю. Цычуева[1, 2], В.Р. Светлаков[3], Д.С. Кубицкий[1, 3]

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Алматы, Казахстан
[2]АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан
[3]ТОО «Казахстанское агентство ГИС и ДЗ», Алматы, Казахстан
e-mail: tsnataly@mail.ru

МЕТОДЫ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ ОПУСТЫНИВАНИЯ ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА

Рассмотрена методика космического мониторинга опустынивания по данным космосъемки на Арало-Сырдариинской и Прибалхашской территориях. Разработана комплексная методика детектирования процессов опустынивания, включающая определение степени деградации земель, поверхностного засоления почв и т.д. по данным дистанционного зондирования различного пространственного разрешения. В результате получены серии карт динамики опустынивания за несколько лет.

Ключевые слова: опустынивание, космический мониторинг, космические снимки, карты динамики опустынивания.

Введение. В Конвенции Организации Объединенных Наций опустынивание определяется как «деградация земель в засушливых, полузасушливых и сухих субгумидных районах в результате действия различных факторов, включая изменение климата и деятельность человека» [1]. При изучении опустынивания и деградации земель выделяют пять индикаторов этих процессов, которые включают в себя: земельный покров, биопродуктивность экосистем, профиль растительности, водную эрозию, засоленность почв и площадь водных объектов [2]. Опустынивание представляет собой процесс, при котором происходит деградация земель, истощение экосистем, дегумификация почв, деградация растительного покрова. Развитие такого рода процессов в южном Казахстане, а именно на Арало-Сырдариинской и Прибалхашской территориях, является одной из масштабных экологических проблем Центрально-Азиатского региона. Для своевременного принятия управленческих решений и выявления трендов указанных процессов, необходим постоянный мониторинг. Однако наземные обследования этой труднодоступной и обширной территории являются высокозатратными. Актуаль-

© Цычуева Н.Ю., Светлаков В.Р., Кубицкий Д.С., 2018

ность данной работы продиктована созданием практического метода проведения мониторинга на основе экономически выгодных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Регион исследований. Исследуемый регион расположен в пустынной ландшафтной зоне умеренного пояса, в пределах двух подзон: северной подзоны (полынно-солянковых) пустынь и южной подзоны (эфемерово-полынных) пустынь. Регион характеризуется равнинным рельефом, абсолютные отметки изменяются от 50 до 200 м над уровнем моря.

Реки Сырдарья и Или, пересекающие территорию района исследований, являются основными артериями всего региона южного Казахстана. Русла рек Сырдарьи и Или извилистые, нередко разделяется на ряд проток, однако ширина русла Сырдарьи изменяется от 100 до 300 м, а Или – в пределах 50 м. Вода мутная, содержит большое количество взвешенных частиц. Современная дельта Сырдарьи, за исключением ее приморской части, обводняется за счет многочисленных каналов, проложенных ранее для целей орошаемого земледелия и рисоводства, которые в настоящее время выполняют роль проток, большей частью слепых. Для структуры почвенного покрова характерна неоднородность и контрастность, обусловленные ведущей ролью гидрологических факторов почвообразования.

Растительность территории отличается малым видовым разнообразием, небольшим проективным покрытием и представлена основными сообществами пустынь – полукустарничками и кустарниками. Растительность территории, из-за смены гидротермических условий, подразделяется на северные и средние подзональные типы пустынь. К северным пустыням характерны полукустарничковые сообщества, преимущественно полынные, реже многолетнесолянковые с участием злаков на бурых пустынных почвах. В средних пустынях доминируют многолетние солянки, полынь и саксаулы на серо-бурых пустынных промерзающих почвах. Вдоль русел рек произрастают тростники и тугайные леса (туранга, лох, ива).

Методика. Методика космического мониторинга процессов опустынивания включает в себя: перечень природных объектов и процессов (индикаторов) опустынивания, по которым определена целесообразность ведения мониторинговых наблюдений на основе данных дистанционного зондирования; сроки и периоды ведения указанных наблюдений; виды космической съемки, по которым рекомендовано вести наблюдения; основные этапы ведения мониторинга и оценка динамики изменений.

Дистанционный мониторинг целесообразно вести за изменением таких индикаторов как: подвижные пески, сорообразование, засоление, общее проективное покрытие и биопродуктивность растительности, техногенное нарушение земель, усыхание естественных водоемов, пожары, эрозионные процессы. Ниже представлены краткие характеристики рассмотренных показателей процессов опустынивания и спектральный индекс, по которому целесообразно вести наблюдение:

1. Подвижные пески. Наблюдаемый параметр – изменение площади. Передвигаясь, песчаные отложения нередко заносят дороги (песчаные заносы), поселки, реки и прочее. Tasseled Cap и GSI (Topsoil Grain Size Index) [3].

2. Такыры и соровые солончаки. Наблюдаемый параметр – изменение площади. Соровые солончаки или солончаковые депрессии – засоленные почвы, содержащие в поверхностном слое 1% и более растворимых солей. Солончаки распространены пятнами в пустынных зонах и имеют местное название «соры». Многие из солончаковых депрессий образовались на месте бывших дельтовых озер, обсохших русел и стариц. Tasseled Cap (Tasseled Cap Transformation) [4].

3. Засоленность почв. Наблюдаемый параметр – изменение площади и значений солености в относительных единицах. Для засоленных экосистем характерна изрежен-

ная галофитная растительность с очень низким проективным покрытием. Salinity Index NDSI (Normalized Difference Salinity Index) [5].

4. Общее проективное покрытия. Наблюдаемый параметр – изменение значений спектрального индекса, определяющего относительную площадь проекции всего яруса фитоценоза зеленого на момент наблюдений. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) [6].

5. Зеленая биомасса. Наблюдаемый параметр – изменение значений спектрального индекса, определяющего относительный объем зеленых растений (биопродуктивность) на единице площади. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) [6].

6. Нарушенные земли. Наблюдаемый параметр – изменение площади и состояния антропогенно-нарушенных земель. Под нарушенными землями понимаются земли, которые затронуты дорожной дигрессией, строительством линейных сооружений, выработками полезных ископаемых, а также орошаемые и бросовые поля.

7. Водоемы. Наблюдаемый параметр – изменение площади водного зеркала водоемов различного происхождения. NDWI (Normalized Difference Water Index).

8. Увеличение площадей пожаров и гарей. Наблюдаемый параметр – изменение количества и площади очагов пожаров. Пожары рассматриваются в настоящей методике как фактор пирогенного опустынивания территорий и экосистем. Нами предлагается использование готового продукта по данным Terrs/MODIS – MOD 14 A1.

9. Овражно-балочная эрозия. Наблюдаемый параметр – изменение площади. Определение увеличения площади овражно-балочной сети возможно по данным космической съемки высокого разрешения с применением экспертного дешифрирования.

Ключевыми этапами методики космического мониторинга процессов опустынивания являются:

- заказ космических снимков, их предварительная обработка;
- расчет спектральных индексов;
- выделение необходимых диапазонов значений индексов;
- составление на основе значений индексов карт процессов опустынивания;
- верификация карт по наземным данным;
- анализ полученных результатов.

Материалами для исследования послужили космические снимки со спутника Landsat и Terra/MODIS. Снимки скачены при регистрации с официального сайта https://earthexplorer.usgs.gov/. Снимки подвергаются предварительной обработке, включающей радиометрическую и атмосферную коррекции. В качестве базовых спектральных индексов для каждого индикатора опустынивания выбраны следующие: Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Topsoil Grain Size Index (GSI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Difference Salinity Index (NDSI). Далее проводится работа по определению диапазонов значений спектральных индексов, в пределах которых наблюдается точное детектирование изучаемого индикатора опустынивания. В ходе исследований и анализа публикаций различных авторов [6; 7], были определены необходимые диапазоны значений индексов. Так, значения индекса SAVI для дифференциации классов (по наземным данным) [7]: 0,1–0,18 – ксерофитная растительность, общее проективное покрытие <50 %; 0,18–0,27 – ксерофитная растительность, общее проективное покрытие >50 %; 0,31–0,44 – травянистая растительность с общим проективным покрытием <70 %; 0,44–0,68 – травянистая растительность с общее проективное покрытие >80 %. Водный индекс NDWI показывает, что распределение значений для воды всегда выше нуля, в то время как значения на других типах поверхностей – отрицательны. В результате подобного подбора диапазонов значений индексов строятся карты для каждого индикатора опустынивания. Верификация карт проводится по наземным данным, полученным в ходе полевых обследований на территории исследования в 2016 г.

Совмещение индексов за различные годы по одному индикатору дает возможность проследить за динамикой процессов опустынивания. На территориях, где грани-

цы каждого из индикаторов опустынивания меняются год от года – выделяются территории с высокой динамикой процессов опустынивания.

Завершающим этапом работ по проведению космического мониторинга процессов опустынивания является анализ характеристик состояния экосистем и выявление динамики процессов опустынивания. Данный этап является ключевым, так как дает представление не только о фактическом состоянии экосистем, но и позволяет выявить качественные и количественные изменения экосистем.

Система мониторинга процессов опустынивания настроена на различную детальность. Все перечисленные этапы проведения мониторинга проводятся на основе данных с различных спутников, что позволяет наблюдать процесс опустынивания по каждому из индикаторов с различной временной периодичностью и различной пространственной детальностью. Изучение процессов опустынивания можно проводить по нескольким направлениям, представленным в таблице.

Таблица

Возможные уровни мониторинга процессов опустынивания

Периодичность	Региональный уровень	Ландшафтный уровень	Экосистемный уровень
Ежесуточный	Terra/MODIS	–	–
Еженедельный	Terra/MODIS	Sentinel-2	KazEOSat-2
Ежемесячный	Terra/MODIS	Landsat-8	KazEOSat-2
Архив данных	С 2001 г.	С 1972 г.	С 2015 г.

Заключение. Применение описанной выше методики на практике позволило создать серию карт изменения каждого индикатора процесса опустынивания и итоговую карту «Динамики опустынивания на Арало-Сырдариинскую территорию».

По результатам исследования можно увидеть улучшения состояния экосистемы, что подтверждает созданная «Карта динамики опустынивания на Арало-Сырдариинской территории». Большая часть территории находится в категории «стабильности», площади восстановления экосистем преобладают над площадью деградации. Использование данной методики позволит вовремя определить негативные процессы и провести необходимые мероприятия по их предотвращению.

Данные исследования проведены в рамках проекта ПРООН в Казахстане и ГЭФ 2016–2017 гг. «Разработка методики космического мониторинга процессов опустынивания и деградации земель и ее апробация на Арало-Сырдариинской и Иле-Балхашской проектных территориях».

Список литературы

1. URL: www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/conventionText/conv-rus.pdf.

2. FAO. Data sets, indicators and methods to assess land degradation in drylands. LADA Email Conference. October 9 to 4 November. 2002.

3. Xiao J.Y., Shen Y.J., Tateishi R. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing // International Journal of remote sensing. 2005.

4. Comparison of Tasseled Cap – based Landsat data structures for use in forest disturbance detection / S.P. Healey, W.B. Cohen, Y. Zhiqiang, O.N. Krankina // Remote Sensing of Environment. 2005. № 97. P. 301–310.

5. Remote Sensing Monitoring of Changes in Soil Salinity: A Case Study in Inner Mongolia, China / J. Wu, B. Vincent, J. Yang [et al.] // Sensors. 2008. № 8. P. 703–704.

6. Huete A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sensing of Environment, 1988. Vol. 25. P. 295–309.

7. Малахов Д.В., Исламгулова А.Ф. Параметрическое дешифрирование пастбищ: опыт применения данных ДЗЗ низкого и среднего разрешения // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 587–592.

УДК 528.8.04, 528.88

A. Safonova[1], A. Rubtsov[1], S. Tabik[2], D. Alcaraz-Segura[3]

[1]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[2]Soft Computing and Intelligent Information Systems Research Group,
University of Granada, E-18071 Granada, Spain
[3]Department Botany, University of Granada, Granada, Spain
e-mail: safonova.nastya1@gmail.com

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS IN DETECTION OF FOREST DAMAGE CAUSED BY THE *POLYGRAPHUS PROXIMUS* BEETLE

Invasion of the Four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) causes catastrophic damage to forests with fir trees in Russia especially in Central Siberia. Based on the latest advances in computer vision and machine learning, we applied a deep convolutional neural network (CNN) to perform a multiclass classification of an UAV-derived imagery aiming at recognition of beetle-induced tree damage categories at the scale of individual fir trees in a mixed forest. The experiment was carried out using RGB images acquired at three research plots on the territory of the state nature reserve "Stolby" (Krasnoyarsk, Russia). The approach is built on the overall architecture of the CNN with six convolutional blocks controlled classification that automatically recognizes 4 categories of fir trees damage with high accuracy (97,53 %).

Keywords: Deep-Learning, Multi-class Classification, Polygraphus proximus, Siberian fir, UAV, aerial photography, forest monitoring.

Introduction. Russian forests are not just a huge natural resource, but national wealth of the country. Despite the fact that forests are a renewable wood source, the rate of their disappearance is too high and is not covered by the speed of their reproduction [1]. One of the main problem of Russian forest degradation is the spatial spread acceleration of the Four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) invasion that causes fast death of fir trees (*Abies sibirica* Ledeb.) in various forest ecosystems. Geographic propagation of *P.proximus* comes from its natural habitat in Japan, the Korean Peninsula, Eastern China, and the Russian Far East (Khabarovsk and Primorskii krai, Sakhalin, and Kuril Islands) [2]. In Siberia the first beetle occurrence was registered in 2008 [3] and within the last 10 years, massive outbreaks of *P.proximus* occurred on large forested areas in the southeastern part of the West Siberian Plain: Tomsk, Kemerovo and Novosibirsk oblasts, Altai region, in the Altai Republic as well as in Krasnoyarsk region [4] where the problem became catastrophic and got out of control. The invasion of this type of beetle can lead not only to degradation of fir forests, but also to create a threat to fir existence as the forest type species.

Death of fir trees due to *P.proximus* invasion occurs in several stages. The beetle usually attacks trunks of weakened trees, fallen deadwood and newly harvested wood. However, in case of massive outbreaks *P.proximus* also attacks healthy trees, which can resist against the beetle attack (exhale resin) during 2-3 years. Penetration of *P.proximus* under tree bark results in pervasion and reproduction of ophiostomatoid fungi (different species) and their phytopathogenic activity leads to a gradual weakening of fir trees. At this stage attacked trees begin to dry out. Further the beetle gets into the tree phloem and colonizes it. Increase of beetles' quantity in a local forest stand leads to massive tree mortality and trigger a *P.proximus* migra-

© Safonova A., Rubtsov A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., 2018

tion to another territory. Usually fir trees die within 2–4 years from a moment of first beetle attack, so the task of the beetle invasion monitoring is really important.

Fast decline of fir forests poses a challenge to develop a remote survey system for precise estimation of forest damage states. Remote sensing techniques, in particular, analysis of available satellite data is the helpful tool in mapping of consequences of forest pest activities. Different vegetation indexes (NDVI and many others) calculated from a combination of spectral reflectance bands (including near-infrared) are used for recognition of forest damage dynamics. This approach can be easily applied to areas where fir prevails in a forest stand, but in case of mixed forest types with patchy composition where fir represents less than 50% of all other tree species distribution, it leads to estimation uncertainty. Spatial resolution of satellite data with regular updates should be high enough in order to recognize individual trees and their temporal degradation in a mixed forest stand.

Aerial photography with multispectral cameras onboard of an aircraft is used for data acquisition and mapping of problematic areas at the regional scale, but the drawback is high price of flight time and equipment as well. Nowadays, application of unmanned aerial vehicles (UAV) tend to be more popular and cheaper solution in forestry research because of the main advantage of an UAV-derived data is very detailed spatial resolution. But one UAV flight covers small area and requires manual operations, so the tool can be applied for a local scale survey, including forest health monitoring [5]. Furthermore, UAV data provides a basis for new methods of data analysis which can be applied later at larger scales considering rapid increase of satellite data quality.

In recent years, a new approach of computer vision based on neural networks in various tasks of Earth remote sensing was successfully used. Thus, application of convolutional neural networks (CNN) in processing of color (RGB) images of the Earth surface from various data sources provided high accuracy results in recognition of different plant species: detection and counting palm trees [6], coffee crops recognition [7], detection of *Ziziphus* lotus shrubs [8], crop and land cover classification [9]. A similar task on forest trees species diversity and mortality detection was considered in [10], where WorldView-2 images with OBIA were used the linear discriminant analysis, principal component analysis and a stepwise selection method. The authors used a set of remote sensing indices to obtain the best results in species diversity and the magnitude of ash trees (*Fraxinus*) stand loss were classified. The overall accuracy varies between 83 % for the seven tree species and 77 % for four different levels of damaged ash.

However, to our knowledge, there are not published works on application of CNN methods in processing of high resolution imagery for detection of forest health decline caused by pest invasions. Thus, our research task is to develop and test a trial neural network for recognition of individual fir trees disturbed by *P.proximus* in a mixed forest.

Study area and data acquisition. The study area is located on the territory of the state nature reserve “Stolby” which is situated near the Krasnoyarsk city in Central Siberia of the Russian Federation. Climate is moderately sharp continental (temperate climatic zone), the average annual temperature within the last 15 years is +0,5 C°, annual amount of precipitation is about 640 mm. The landscape of the nature reserve represents a complex mountain range (47 219 Ha total area) with altitudes from 200 to 800 meters a.s.l., most of the territory (80 %) constitutes the mid-mountain belt (500–800 m a.s.l.) mainly covered by mixed forest which consist seven tree species in different proportions: conifers (light and dark needle-leaved trees) as pine, larch, cedar (Siberian pine), fir, spruce, and parvifoliate forest as birch and aspen. Pine trees (*Pinus Sibirica*) dominate among other species and occupy 41 % of the total forested area mainly in low-mountains. Distribution of Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) is 25 % of the Stolby forest. First appearance of *P.proximus* in the Stolby nature reserve was registered in 2011, and nowadays roughly estimated forest damage by the beetle is about 25–30 % of the fir areal.

Three research plots with different rates of the *P.proximus* invasion were chosen for our study at Stolby near the Narim research station (55.916355°N, 92.723466°E). At the first lo-

cation (A) the beetle invasion was in the initial state and only single dead trees can be found, at the second location (B) the beetle already colonized the main part of fir trees, at the third location (C) most of fir trees represent a deadwood.

A set of RGB images with ultra-high (≈5–10 cm/pix) spatial resolution were obtained for the research plots during multiple flights of the DJI Phantom 3 Pro quadcopter (with standard camera) in July 2016 and the Yuneec Typhoon H hexacopter (with CGO3+ camera) in May 2018. Imagery for research plots A and B were acquired in cloudy weather conditions at 670 m (A) and 700 m (B) altitudes (120–150 m elevation above ground), the plot C was surveyed in sunny weather at 120 m height. Default camera settings (auto white balance, ISO 100) were applied for all shouts. Image composites (orthophotomosaic) were created from a set of multiple images (300–400 per plot) using the Agrisoft Photoscan software.

Methods. *Definition of fir trees damage categories.* Determination of individual health status of fir trees on the imagery of the research plots was set up in accordance with the entomological approach by Krivets at al [3], who defined a scale of fir trees damage in six categories that takes into account different cases (phases) of *P.proximus* invasion into a tree trunk and their influence to tree canopy appearance. Considering the aerial data capture above the forest the scale can be described as follow: I) healthy trees not attacked by the beetle - crown is extensive, all needles are green; II) weakened trees attacked by the beetle (not colonized) - crown can be without signs of weakening or it can be thinned and few branches with bright red needle tips; III) heavily weakened trees attacked by the beetle (not colonized) - crown can look like healthy, but sparser, palegreen color of needles or several branches with red needles, broom rusts appear; IV) dying trees colonized by the beetle - needles in the upper part of the crown are still green, lower part is bright red; V) a tree died recently – entire crown retains completely dead red needles; VI) old deadwood - a tree died in previous years, crown is completely defoliated, branches are gray.

Since the difference between the tree damage states of the first, second and third categories can be recognized mainly in-situ revealing tree trunk signs and symptoms which do not cause visible difference in crown appearance from UAV imagery, we considered only four categories (Fig. 1) skipping the second and the third one in the model training and resulting image classification.

(a) *(b)* *(c)* *(d)*

Fig. 1. Damage categories of Siberian fir trees: *a* – completely healthy trees or recently attacked by the beetle; *b* – trees colonized by the beetle; *c* – tree died recently; *d* – deadwood

Selection and preparation of sample patches for a learning models. From the entire input imagery of the research plots we created a first data subset by selecting 50 sample images (patches) of single trees per each tree damage category. To train a CNN model we used 90 % of the selection, the rest 10 % was applied for CNN verification. As a model check, we used two areas from the plot A and B and a small set of patches from the plot C.

The main stages of the entire input imagery processing were: 1) conversion of the orthophotomosaics from .tiff to .jpg raster format for suitable data input to the CNN; 2) creation of image patches – a set of pictures (with different sizes) manually cropped from the orthophotomosaics using the QGIS 7.2.2 for each tree damage category; 3) resizing of the patches to 150×200×3 pixels using cubic interpolation (provided the best results); 4) manual assignment of each patch to appropriate tree damage category.

On the next step, the model prediction accuracy should be improved by increasing the amount of data in the first data subset. For this step we used the following methods: 1) change the saturation of RGB channels, 2) remove Gaussian noise from images by application of the Gaussian blur filter (blur value – 5 %, kernel width and height – 0,5), 3) pixel averaging by collapsing an image with a normalized 4 × 4 window filter, 4) image rotation relatively to its center with 5°, 15°, 50°, 90°, 180° angles, 5) increase an image size from the center to 50 %. Application of all these methods resulted in creation of 4 000 image patches from the first data subset (200 patches).

Classification model. A deep neural network (Fig. 2) was developed that is being trained on the prepared image samples and adapts itself to the task of the trees damage recognition. To create a CNN and improve the quality of its training we manually tuned the following hyperparameters: the learning rate, the number of training epochs, and the number of layers in the network. Series of experiments were performed, for each experiment the hyperparameters was altered and consequent network's operation quality change was estimated. When exploring the effect of changing the learning rate parameter with the Stochastic Gradient Descent (SGD) optimizer to 0,0001; 0,001; 0,01 and 0,1 values, the highest accuracy of CNN on the test data was achieved at 0,0001. To assess the impact of the number of training epochs on the CNN accuracy, training was conducted in the range from 10 to 40 epochs. Also, by creating cascades of convolution layers and a subsample layer, the total number of the network layers was determined.

The overall architecture of the CNN consisted of six convolutional blocks (each includes one convolutional layer). Additionally, the first and third convolutional blocks included maximum pooling layers. At the top of the CNN there are two fully connected layers and one output layer. The Rectified Linear Unit (ReLU) activation function was used in the last four convolutional blocks, and the Softmax function for the output layer. In order to keep the overtraining of the network under control, we used the Dropout regularization method and it reduced the complexity of the model, saving the number of its parameters. It is very important to choose an appropriate regularization coefficient, so it was set to 0,25 after the second, forth, and fifth layers, and it was set to 0,5 before the output layer.

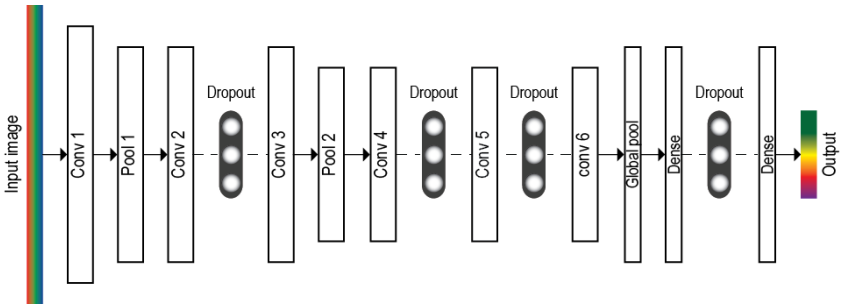


Fig. 2. The structure of the developed CNN model

The objective function, which should be minimized in the neural network, was established by the categorical cross-entropy loss between the input and the actual classification of images, which fits well to the output of the probability of the categories occurrence. The Adam's optimization was chosen among existing optimization algorithms since it was more efficient case due to possibility of initial calibration of the CNN.

Creation of a data subset for independent model verification. Optimization of CNN detection accuracy was done on two test polygons cropped from plot A and B. For this task we developed a data processing algorithm that includes a sequence of the following steps: 1) conversion of RGB images to a grayscale colors palette; 2) blurring of grayscale images using the Gaussian high-pass filter in order to reduce Gaussian noise with the following function parameters: kernel size is 11×11 pixels, and the standard deviation equal to 0; 3) creation of binary (bicolor) images from the grayscale blurred images by application of a threshold function with the optimal brightness threshold value of input image pixels equal to 100 (determined by numerous experiments), this step identifies the brightest areas in the analyzed images with fir trees; 4) clarification (structuring) of picture elements outlines by application of two successive functions (erosion and dilation) with several iterations for the binary pictures in order to distinguish (separate) individual tree crown contours and to minimize the effect of their confluence (fusion) in one object; 5) detection of image patches was implemented using a contour area calculation function based on the Green formula – object size for the function was set in the range between 50×50 and 200×200 pixels. Finally, positions and trees crown shapes were defined after all these steps for each test polygon.

Results and Perspectives

Model Accuracy Assessment. The maximum model performance (classification result) without reinstalling the network was achieved at the 30th training epoch with the test accuracy of 97,22 % and the minimum training loss less than 0,1 (Fig. 3). After the 30th epoch, the validation loss was stabilized and the difference between the training and validation loss increases.

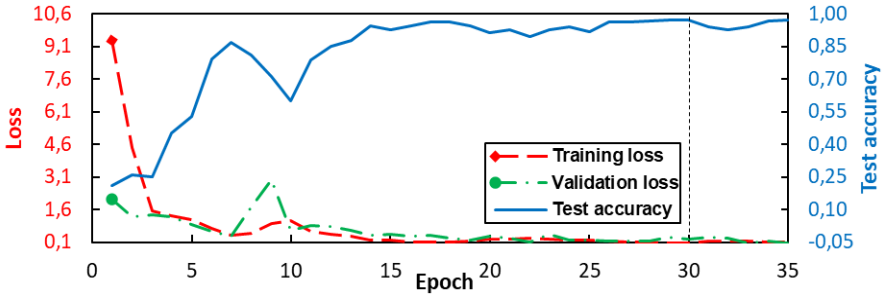


Fig. 3. Loss and accuracy for each epoch of the CNN model training

As for comparison, we have tested well-known neural network models such as VGG16, VGG19, ResNet50, Inception V3, XCeption [11] on the same input data. The Inception V3 with the same final layers of model architecture after 30 training epochs showed the best results among the concurrent models (Table 1).

Table 1

Comparison of the results of the created CNN model
with an alternative Inception V3 network

Model	Learning rate	Epoch	Loss	Training accuracy	Validation accuracy
Our CNN model	0,001	30	0,0254	0,9722	1
Inception V3 + 300+100+4	0,001	30	0,1715	0,9999	0,99

Detection precision evaluation. Estimations of the CNN model test accuracy on the data patches with basic evaluation measures from the confusion matrix were presented by the main metrics: true positive (TP) – correct positive prediction; false positive (FP) – incorrect positive prediction; true negative (TN) – correct negative prediction; false negative (FN) – incorrect negative prediction, where standard performance indicators are:

$$Presicion = \frac{TP}{TP+FP},$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN},$$

$$F-csore = 2 \times \frac{Presition \times Recall}{Presition + Recall}.$$

The results of the detection for each category are shown in Table 2.

Table 2

The CNN model performance in terms
of basic evaluation measures from the confusion matrix.

Categories	TP	TN	FP	FN	Acc, %	Precision, %	Recall, %	F-score, %
Category 1	5	74	0	0	100	100	100	100
Category 2	54	25	0	1	98,75	100	100	99,08
Category 3	17	62	0	1	98,75	100	100	97,14
Category 4	3	76	2	0	97,53	60	97,44	75

As can be seen from Table 2, our CNN model achieved high performance. The additional increase of the sub dataset allowed to improve the CNN productivity. The overall accuracy of the classifier was 97,53 %. The results of classification of tree damage categories are shown in the fig. 4.

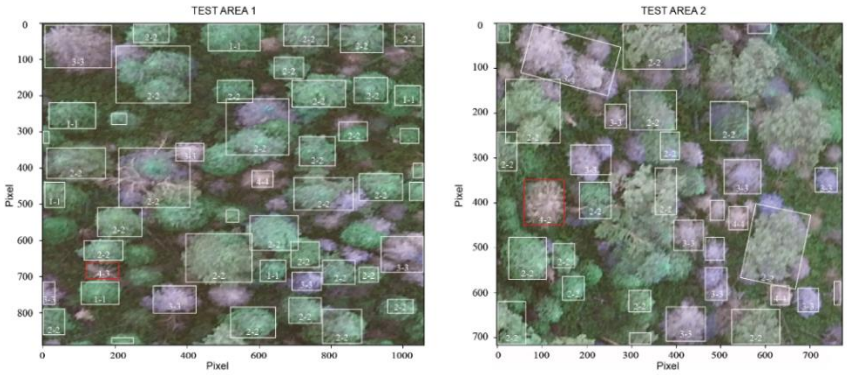


Fig. 4. Results of classification of damage categories of trees, where in the white square are correctly recognized trees, in the red square the wrongly recognized trees

We also conducted a small test of CNN performance on the data subset of patches cropped from the plot C imagery. It was found that the classifier recognized all categories of fir trees with 100 % accuracy due to better input imagery characteristics (contrast, brightness, resolution) of the training data set.

Conclusions. In this article, we developed a CNN model for detection of fir trees damage in a mixed forest using UAV-derived imagery. The neural network is able to recognize four categories of Siberian fir trees invaded and disturbed by the *P.proximus* beetle with high prediction accuracy. Further work will focus on the improvement of the hyperparameters and composition of layers in the CNN model validated on another dataset (study areas) also disturbed by the beetle. It would be interesting to look at the possibility of using additional features, including various indicators like vegetation indices and additional image channels.

This research is supported by grants of the Russian Science Foundation (project № 18-74-10048) and the Russian Science Foundation (№ 16-11-00007). The work was coordinated by the vice director of the state nature reserve StolbyAnastasia Knorre. We also thank Ph.D. students Egor Trukhanov and Anton Perunov who helped in data acquisition (UAV operations) on two research plots in 2016 and raw imagery processing (creation of orthophotomosaics).

References

1. Федеральная служба государственной статистики: офиц. сайт. 2018. URL: http://www.gks.ru/.

2. Определитель насекомых Дальнего Востока России: в 6 т. Т. 5. Ручейники и чешуекрылые. Ч. 1 / В.И. Кузнецов, С.Ю. Синев, Ю.А. Чистяков [и др.] // Книги, изданные при поддержке РФФИ – Библиотека – Портал РФФИ. 2018. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_58962.

3. Kerchev I. Ecology of four-eyed fir bark beetle Polygraphus proximus Blandford in the west Siberian region of invasion. Russian Journal of Biological Invasions. 2014. № 5. P. 176–185.

4. Ophiostomatoid Fungi Associated with the Four-Eyed Fir Bark Beetle on the Territory of Russia / N.V. Pashenova, A.V. Kononov, K.V. Ustyantsev [et al.] // Russian Journal of Biological Invasions. 2018. 9. P. 63–74.

5. Analysis of Unmanned Aerial System-Based CIR Images in Forestry / J.R.K. Lehmann, F. Nieberding, T. Prinz [et al.] // A New Perspective to Monitor Pest Infestation Levels. 2018. № 6. P. 594–612.

6. Deep Learning Based Oil Palm Tree Detection and Counting for High-Resolution Remote Sensing Images / W. Li, H. Fu, L. Yu, A. Cracknel // Remote Sensing. 2016. № 9. P. 22.

7. Baeta R. Nogueira K., Menotti D., Santos A. dos J. 30th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images, Learning Deep Features on Multiple Scales for Coffee Crop Recognition. 2017. P. 262–268.

8. Deep-learning Versus OBIA for Scattered Shrub Detection with Google Earth Imagery: Ziziphus lotus as Case Study / E. Guirado, S. Tabik, D. Alcaraz-Segura [et al.] // Remote Sensing. 2017. № 9. P. 1220.

9. IEEE GRSL, Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data / N. Kussul, M. Lavreniuk, S., Skakun A. Shelesto. 2017. P. 1–5.

10. Evaluating the Potential of WorldView-2 Data to Classify Tree Species and Different Levels of Ash Mortality / L.T. Waser, M. Küchler, K. Jütte, T. Stampfer // Remote Sensing. 2014. № 6. P. 4515–4545.

11. Jordan J. Common architectures in convolutional neural networks. April 20, 2018. URL: https://www.jeremyjordan.me/convnet-architectures/.

Секция

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 522

А.М. Алейникова, Д.Д. Мотакова

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия
e-mail: anshur@mail.ru, daria.motakova@gmail.com

ОЦЕНКА СЕЛЕОПАСНОСТИ ВЕРХОВЬЯ ДОЛИНЫ РЕКИ БАКСАН

Оценка селеопасности проводится на основе дешифрирования космических снимков и обработки их в программе ArcGis. Выделены критерии селеопасности и разработана авторская шкала селеопасности. По каждому критерию составлена отдельная карта селеопасности. Результатом наложения всех полученных карт явилась интегральная карта селеопасности на 2018 г.

Ключевые слова: селеопасность, дешифрирование, крутизна склона, задернованность склона, перигляциальные озера.

Актуальность исследования. Несмотря на научный мониторинг и работу службы МЧС, часто селевые процессы разрушают инфраструктуру высокогорий и уносят человеческие жизни. Селеопасность территории можно проанализировать методами дешифрирования и картографирования.

Цель работы – оценить селеопасность верховья долины реки Баксан.

Методика исследования. Основными методами исследования явились полевой сбор данных, литературный анализ, дешифрирование космических снимков, обработка их в программе ArcGis.

Природные условия высокогорий Центрального Кавказа способствуют частому зарождению селей [1]. В верховьях реки Баксан они отмечаются наиболее часто. Так, 1 сентября 2017 г. произошел сход крупного селевого потока по долине реки Адыл-су при прорыве Башкаринского озера [2].

Несмотря на организованный многими научными организациями многолетний мониторинг за озером, система оповещения населения не сработала, погибли люди, разрушены дороги.

При дешифрировании космических снимков были выявлены дешифровочные признаки селеопасности (табл. 1).

Далее были выделены уровни селеопасности по критериям (табл. 2).

Для исследуемого района были выявлены потенциально селеопасные территории (рис. 1).

Далее выполнялись карты анализа состояния каждого из выделенных критериев селеопасности (рис. 2).

При наложении выполненных карт получилась интегральная карта селеопасности (рис. 3).

© Алейникова А.М., Мотакова Д.Д., 2018

Таблица 1

Дешифровочные признаки селеопасности

Критерии селеопасности	Дешифровочные признаки		
	низкий уровень селеопасности	средний уровень селеопасности	высокий уровень селеопасности
Задернованность	Высоко сомкнутые лесные и луговые геосистемы: однотонный, сплошной темно-зеленый цвет, крупнозернистая структура	Луговая растительность и редколесье. Цвет: смешение серого и зеленого, как следствие, образование пятнистого рисунка	Фрагментарное развитие растительности или ее полное отсутствие. Мелкозернистая структура. Цвет серо-коричневый с редкими светло-зелеными пятнами
Литологический состав	Скальные породы (голые гладкие породы; на снимках частое затемнение из-за солнца)	Задернованные породы на конусах выноса, где видимые рыхлые отложения отсутствуют. Цвет: темно- и светло зеленый (часто с видимыми антропогенными объектами)	Рыхлообломочные породы (мелко-и крупнозернистый сыпучий материал, который «ползет» вниз по склону)
Сцементированность отложений льдом	отсутствие морен, большая удаленность от ледника	наличие морен, эрозионно не расчлененных, близость ледников	эрозионных расчлененные в верхних частях морены и близость ледников и ледниковых озер

Таблица 2

Уровни селеопасности по критериям

Критерий селеопасности	Балльность оценки			
	низкий уровень селеопасности	средний уровень селеопасности		высокий уровень селеопасности
Крутизна склона, град.	0–10	0–20	0–40	<40
Задернованность, %	80–100	20–80		0–20
Парагенетическая система (лотки, конусы выноса)	Отсутствие	Фрагментарное наличие		Наличие
Озера	Полное отсутствие	наличие мелких озер		Наличие крупных озер
Литологический состав	Скальные породы	Не четко отображается на снимке		Рыхлообломочный материал
Сцементированность отложений льдом	Отсутствие морен, удаленность от ледника	Обломочные отложения непонятного генезиса достаточно близкие к леднику		Наличие морен, близость к леднику

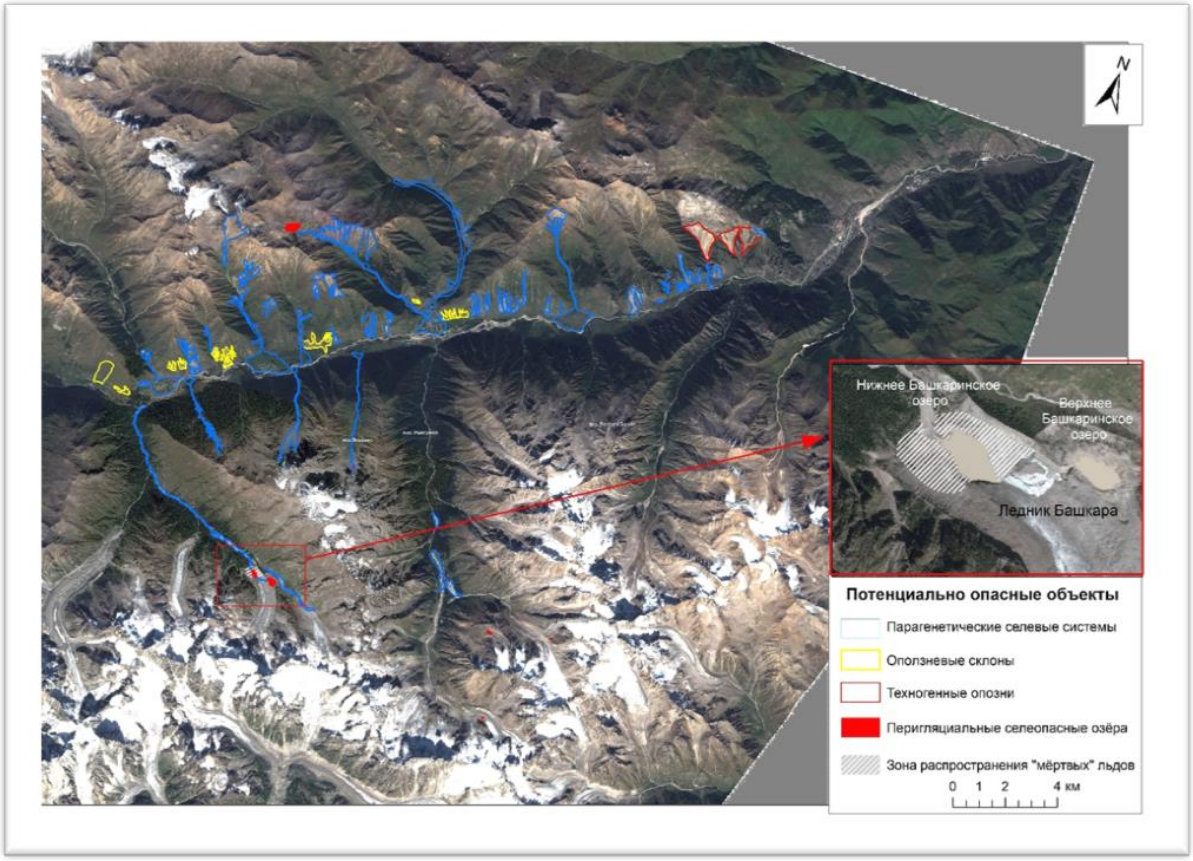


Рис. 1. Потенциально селеопасные территории

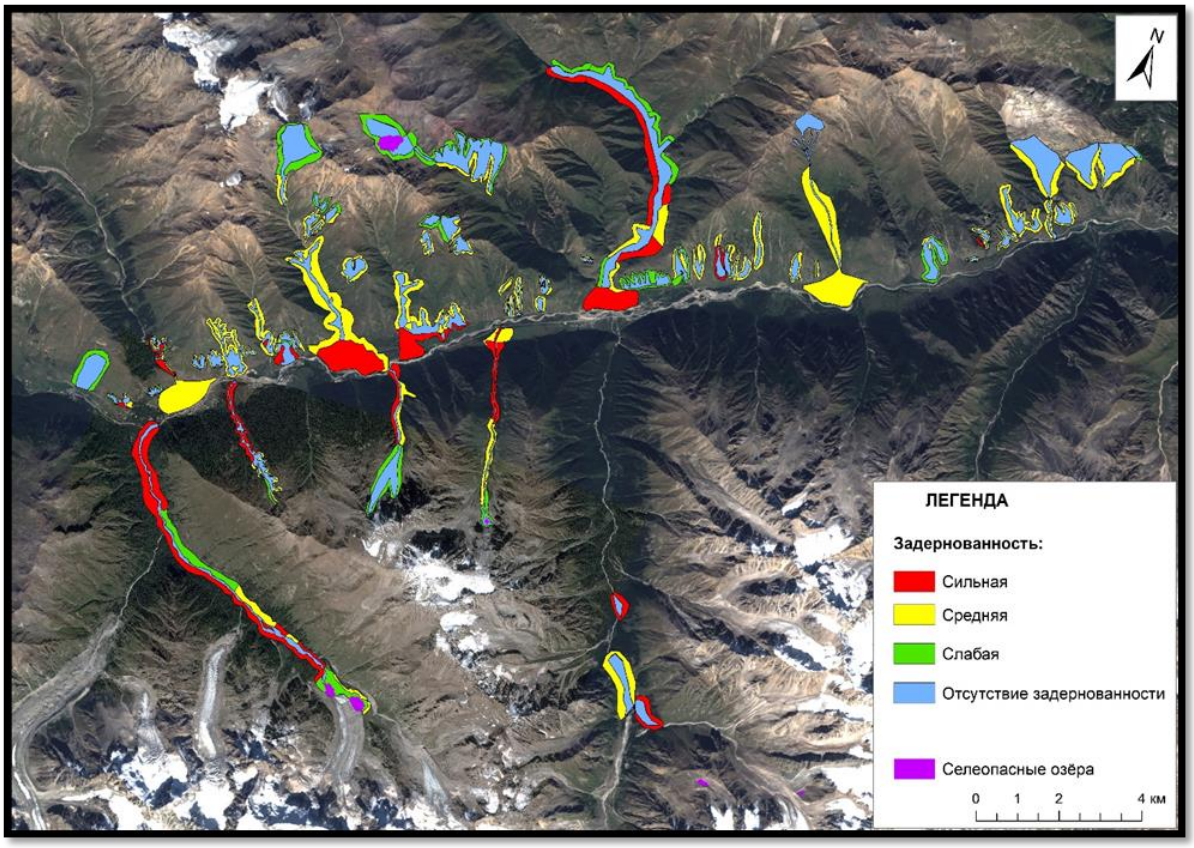


Рис. 2. Степень задернованности склонов селеопасных территорий

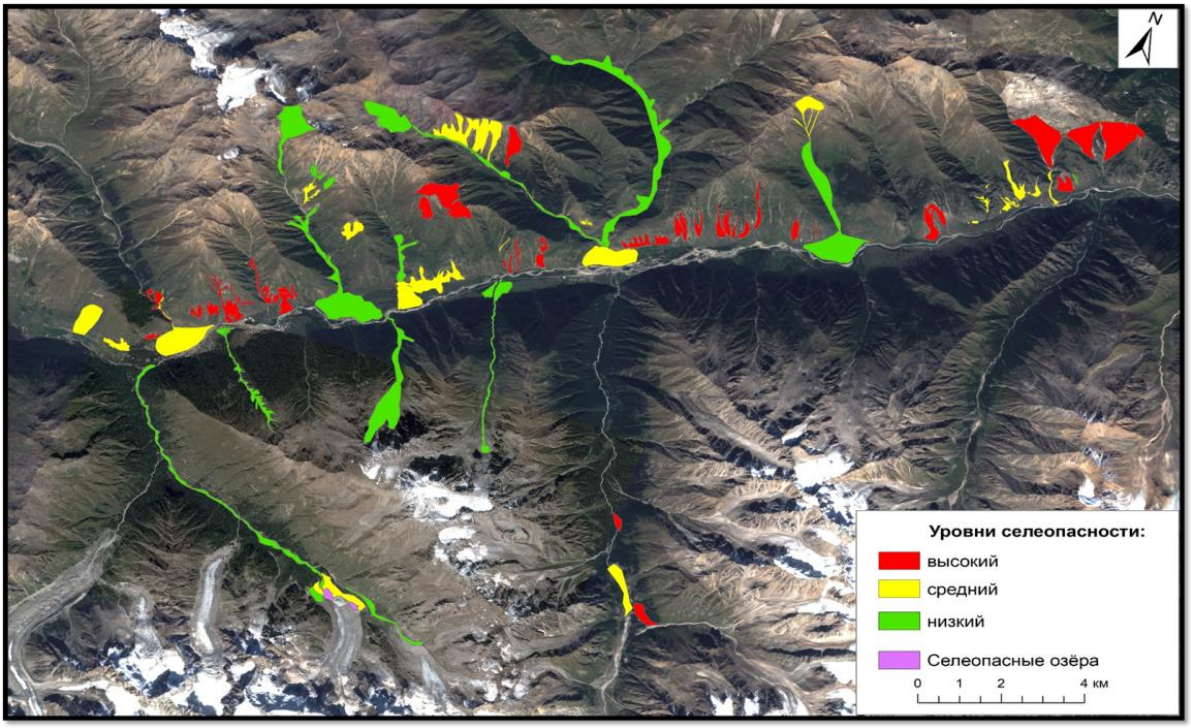


Рис. 3. Селеопасность верховья реки Баксан

По выполненной карте видно, что наибольшая селеопасность характерна для левого южного склона долины реки Баксан. Также наибольшей селеопасностью обладают небольшие крутые, слабо задернованные, сложенные рыхлыми отложениями склоны.

Выводы. В ходе работы были выделены дешифровочные признаки, критерии и уровни селеопасности (по космическим снимкам). Далее выполнены карты анализа состояния каждого из выделенных критериев селеопасности. Наложение этих карт дало интегральную карту селеопасности района. Наибольшая селеопасность характерна для левого южного склона долины реки Баксан. Также наибольшей селеопасностью обладают небольшие крутые, слабо задернованные, сложенные рыхлыми отложениями склоны. Практически вся верхняя часть долины реки Баксан селеопасна. Степень селеопасности возможно отслеживать путем частого дешифровочного мониторинга.

Список литературы

1. Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья. Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. М.: Науч. мир, 2001. 203 с.

2. Прорыв озера Башкара 1 сентября 2017 г. / С.С. Черноморец, Д.А. Петраков, А.А. Алейников [и др.]. М.: Криосфера Земли, 2018. Т. XXII. № 2. С. 70–80.

УДК 528.8.04, 528.88

А.А. Аюржанаев, М.А. Жарникова, Ж.Б. Алымбаева, Б.В. Содномов, Б.З. Цыдыпов, Е.Ж. Гармаев

Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия
e-mail: aaayurzhanaev@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦВЕТНЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОСТИ СТЕПИ

Представлены первые результаты оценки продуктивности степных экосистем на примере модельного участка в Западном Забайкалье с использованием наземных измерений, спутниковых данных и аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата. Выявлена сезонная динамика вегетационных индексов, представлены результаты корреляционного анализа. Цветные вегетационные индексы могут быть использованы для оценки продуктивности степи.

Ключевые слова: биологическая продуктивность, БПЛА, цветные вегетационные индексы, степные экосистемы, Забайкалье

Введение. Биологическая продуктивность рассматривается как один из основных показателей состояния степных экосистем и их биоразнообразия. Более того, оценка продуктивности растительных сообществ имеет основное значение при изучении биологического круговорота, так как основные процессы обмена вещества и энергии связаны с образованием и превращением биологической продукции.

Первые сводные данные по количественной оценке запасов и продукции травяных экосистем были обобщены в работе [1]. Разработке комплексной методики изучения круговорота углерода методом оценки продукции посвящены исследования [2; 3]. Изучена первичная продукция фитоценозов Западно-Сибирской равнины [4], основных сообществ бассейна Колымы [5], сухих степей Западного Казахстана [6], Минусинской котловины [7], степей Забайкалья [8; 9] и др. Таким образом, к настоящему времени накоплен большой фактический материал о функционировании травяных экосистем, разработаны основные методы и показатели, характеризующие биопродуктивность фитоценозов. Однако, изучение продуктивности степных экосистем по-прежнему актуально, особенно в режиме многолетних наблюдений, позволяющих сделать прогноз изменения биологической продуктивности в условиях изменения климата. В последнее время воздействие человека на природу велико, что привело к расширению площадей трансформированных экосистем, а существующих традиционных методов недостаточно для мониторинга состояния растительного покрова.

Для получения объективной, оперативной информации о состоянии растительности необходимо сопряжение наземных и дистанционных исследований, в частности, использование вегетационных индексов (ВИ) при изучении продуктивности. ВИ представляют собой комбинации яркости различных диапазонов электромагнитного излучения, отраженного от поверхности, и используются для контроля динамики растительного покрова, оценки фитомассы, продуктивности и состояния растительного покрова. Эти индексы, называемые спектральными, помимо видимого диапазона в основном используют ближнюю инфракрасную область спектра (БИК).

Промежуточное положение между наземной и аэрокосмической съемкой в целях локального мониторинга территорий по критерию «эффективность – стоимость» зани-

© Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., 2018

мает съемка на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), обеспечивающая проведение работ на сверхмалых высотах и не зависящая от атмосферных условий. В настоящее время съемочная аппаратура беспилотных систем с БИК находится на начальном этапе развития и не приобрела массового распространения. Поэтому представляет интерес использовать вегетационные индексы, рассчитываемые по изображениям RGB-камер в видимом диапазоне, – так называемые цветные или хроматические ВИ. Впервые эти индексы были протестированы для отделения на изображении сельскохозяйственных культур от почвенной поверхности [10].

Цель работы – оценка продуктивности надземной фитомассы в травяных экосистемах и анализ ее взаимосвязи со спектральными и цветными ВИ. Исходя из этого, были поставлены следующие задачи: 1) геоботанические исследования модельного участка с отбором растительных укосов на продуктивность; 2) аэрофотосъемка территории модельного участка; 3) сбор, обработка, анализ данных дистанционного зондирования и метеорологической информации.

Материалы и методы. В качестве модельного полигона выбрана гора Казачья (51°43′0,52″ с. ш., 107°30′36,56″ в. д.), расположенная на шлейфах отрогов хр. Цаган-Дабан на правобережье реки Селенги (абсолютная высота – 752 м). Район исследования приурочен к умеренно сухим дерновиннозлаковым и полынно-дерновиннозлаковым степям. На модельном полигоне были выполнены полные геоботанические описания растительности, выявлено фитоценотическое разнообразие, составлена карта растительности. А также на типичных фитоценозах выбраны ключевые мониторинговые участки. Первый ключевой участок – ковыльная степь с общим проективным покрытием (ОПП), равным 40 %; расположена на склоне юго-западной экспозиции, на высоте 733 м. Второй – разнотравно-злаковая степь на склоне северо-восточной экспозиции, ОПП = 65 %, абсолютная высота – 740 м. Третий ключевой участок – долговременная залежь с мятликово-лапчатковой степью на склоне юго-восточной экспозиции, ОПП = 35 %, абсолютная высота – 665 м. В пределах каждого ключевого участка были заложены пробные площадки размером 1 м^2, на которых сделаны укосы надземной фитомассы. Укосы были взвешены в сыром состоянии, далее высушивались до воздушно-сухого состояния и взвешивались повторно. Всего за вегетационный период 2017 г. на каждой пробной площадке было сделано 13 укосов. Одновременно на ключевых участках проводилась аэрофотосъемка с борта БПЛА DJI Phantom 3. В программе обработки данных аэрофотосъемки Agisoft Photoscan получены ортофотопланы, по которым были определены значения цветных ВИ для каждой съемки. В работе использованы следующие ВИ:

$$NDI = (g - r) / (g + r),$$
$$ExG = 2 \cdot g - r - b,$$
$$ExR = 1{,}4 \cdot r - g,$$
$$ExGR = 3 \cdot g - 2{,}4 \cdot r - b,$$
$$VARI = (g - r) / (g + r - b),$$
$$GLI = (2 \cdot g - b - r) / (2 \cdot g + b + r),$$

где r – спектральная яркость в красном канале, g – в зеленом, b – в синем, нормированные к их сумме.

Значения валовой первичной продукции (GPP) получены по данным MODIS Terra (8-дневный композит, пространственное разрешение – 500 м).

Результаты и обсуждение. В вегетационный период 2017 г. проведены геоботанические исследования модельного участка, определена биологическая продуктивность характерных фитоценозов. Надземная фитомасса в сыром весе за весь сезон варьирует от 58 до 256 г/м², в воздушно-сухом – от 23 до 140 г/м².

Показателем накопления углерода в виде растительного вещества служит GPP, определяемая с учетом затрат вещества и энергии на дыхание. На рисунке представлен сезонный ход вегетационного индекса ExG, измеренной фитомассы и GPP. Выявлено наличие двух пиков фитомассы: в начале июля и в конце августа. Это может быть объяснено тем, что урожайность степных травостоев возрастает до июля, далее к августу травостой выгорает. Ближе к осени, в результате спада жары и увеличения осадков фитомасса степных экосистем закономерно возрастает. В это время наблюдается массовое плодоношение злаков. Отмечено, что второй пик не наблюдается на графиках ExG и GPP, поскольку эти значения основаны на расчете по спектральным характеристикам, тогда как прирост фитомассы в августе не отражается на «зелености» по данным космо- и аэросъемки.

В результате корреляционного анализа выявлено, что наилучшая связь продуктивности и ВИ наблюдается для индексов ExG и GLI (r = 0,74). Средняя корреляционная связь отмечена с индексами ExR (0,46), NDI (–0,44), VARI (-0,42). Корреляция укосов и индекса ExGR очень слабая.

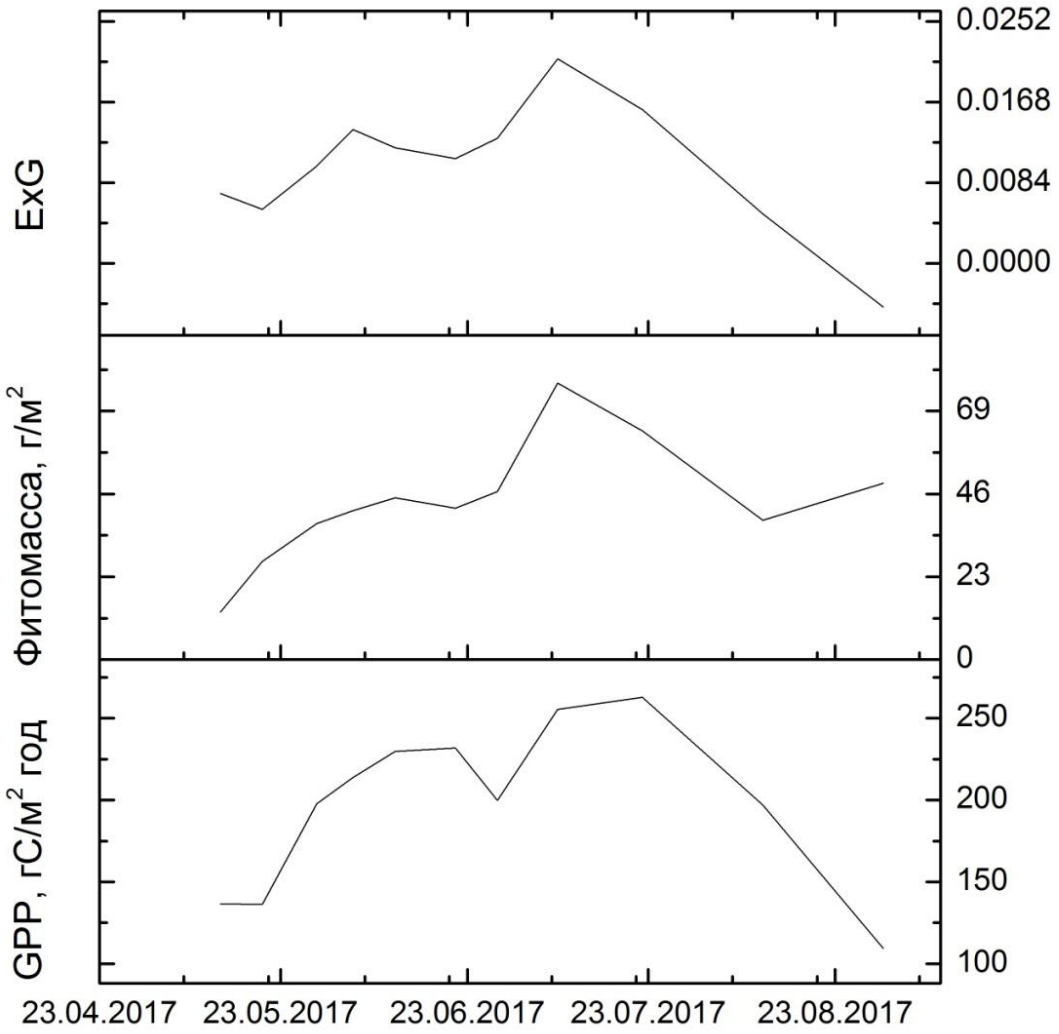


Рисунок. Сезонная динамика вегетационного индекса ExG, фитомассы и GPP

Поскольку прирост фитомассы в большей степени определяется погодными условиями, то был проведен анализ корреляционных связей между суммой осадков, средними значениями температуры и изменением запасов фитомассы. Биологическая про-

дуктивность имеет положительную связь с климатическими показателями – коэффициент корреляции между фитомассой, осадками и температурой равен 0,60 и 0,45, соответственно.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено, что цветные вегетационные индексы (ExG, GLI) при сопоставлении с наземными данными могут успешно применяться для оценки продуктивности степных экосистем. Полученные первые результаты требуют дальнейших исследований. Для получения более точных выводов планируется увеличить количество пробных площадок, улучшить методику яркостной калибровки камеры. Использование беспилотных летательных аппаратов позволяет осуществлять оперативный мониторинг и проводить пространственную оценку состояния степей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке научного проекта РФФИ № 17-05-01059 и в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН.

Список литературы

1. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.–Л.: Наука, 1965. 253 с.

2. Титлянова А.А. Изучение биологического круговорота в биогеоценозах (методическое руководство). Новосибирск: Наука, 1971. 31 с.

3. Титлянова А.А. Биологический круговорот углерода в травяных биогеоценозах. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. 220 с.

4. Шатохина Н.Г., Вагина Т.А. Чистая первичная продукция степных, луговых и болотных фитоценозов // Структура, функционирование и эволюция систем биогеоценозов Барабы. Т. 2. Новосибирск: Наука, 1976. С. 265–300.

5. Гришкан И.Б. Разложение растительного опада в основных сообществах бассейна верховий Колымы // Экология. 1995. № 1. С. 9–12.

6. Фартушина М.М. Движение вещества и энергии в растительных сообществах пустынно-степного комплекса Северного Прикаспия: дис. … д-ра биол. наук. Алматы, 1996. 423 с.

7. Хакимзянова Ф.И. Динамика продуктивности степных фитоценозов Юга Минусинской котловины: автореф. дис. … канд. геогр. наук. М., 1989. 20 с.

8. Снытко В.А., Нефедьева Л.Г. Настоящие степи Забайкалья, Читинская область // Биологическая продуктивность травяных экосистем. Новосибирск: Наука, 1998. С. 49–58.

9. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Гармаев С.Р. Биологический круговорот макро- и микроэлементов в пойменных ценозах Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2003. 214 с.

10. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions / D.M. Woebbecke, G.E. Meyer, K. Von Bargen, D.A. Mortensen // Transactions of the ASAE. 1995. Vol. 38, № 1. P. 259–269. DOI: 10.13031/2013.27838.

УДК 528.8.04, 528.88

И.Ю. Ботвич[1], Т.М. Зоркина[2]

[1]Институт биофизики СО РАН,
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
Красноярск, Россия, e-mail: irina.pugacheva@mail.ru
[2]Гербарий имени Л.М. Черепнина, Красноярский государственный
педагогический университет имени В.П. Астафьева, Красноярск, Россия
e-mail: tm_zorkina@mail.ru

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИИ

В ходе проведенных исследований определены динамика и особенности восстановления сорно-разнотравно-однолетне-полынного, пырейного с разнотравьем, разнотравно-злаково-полынного и полынно-злакового фитоценозов на залежных землях Алтайского района Республики Хакасия по наземным и спутниковым данным. Выявлен видовой состав, структура и фитомасса данных фитоценозов. Установлено, что межгодовая изменчивость NDVI отражает степень и время восстановления залежей.

Ключевые слова: залежь, восстановление естественной растительности, NDVI, многолетняя изменчивость (структура, проективное покрытие, фитомасса), Modis.

На территории РФ площади сельскохозяйственных угодий уменьшились (по сравнению с 1998 г.) на 4,6 % и составили 9 625,344 тыс. га; в Республике Хакасии она уменьшилась на 1,6 % – 26,988 тыс. га. При этом площадь посевных территорий в РФ уменьшилась к 2016 г. на 59,5 % по сравнению с 1990 г. (37 008,3 тыс. га), в Республике Хакасии – на 32 % (357,09 тыс. га) (по данным ЕМИСС (https://fedstat.ru/)). Уменьшение площадей посевных территорий Республики Хакасия проходило ежегодно на 6 тыс. га, вплоть до 2005 г. (рис. 1). В результате этого в настоящее время на территории Алтайского района Республики Хакасии имеются многочисленные площади, исключенные из хозяйственной деятельности, т.е. залежи.

Многими исследователями подчеркивается, что наличие общих черт в динамике восстановления не исключает проявления ряда специфических черт региональных особенностей. В результате в демутациях могут различаться количество временных стадий и их продолжительность, состав и разнообразие видов растений в сообществах [1; 2].

Цель исследования – выявление видового состава, структуры и динамики восстановления растительности залежей Алтайского района Республики Хакасии по спутниковым и наземным данным.

Объектом исследования является растительность залежных земель Алтайского района Республики Хакасии. Исследование основывается на анализе временных рядов данных полевых геоботанических исследований, спутниковой и метеорологической информаций. Для изучения особенностей восстановления естественной растительности в Алтайском районе Республики Хакасия было выделено несколько тестовых участков. В 2003 г. эти залежные земли находились в непрерывном процессе восстановления и были определены как: разнотравно-злаково-полынный фитоценоз (Ф1) и полынно-злаковый фитоценоз (Ф2) – рыхлодерновинная стадия восстановления; пырейный с разнотравьем фитоценоз – пырейная стадия (Ф4); сорно-разнотравно-однолетне-полынный фитоценоз – бурьянистая стадия (Ф3) (рис. 2).

© Ботвич И.Ю., Зоркина Т.М., 2018

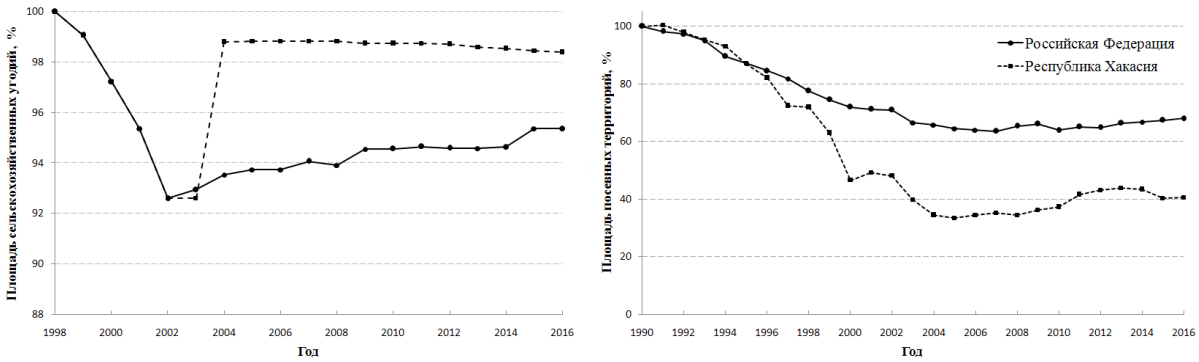
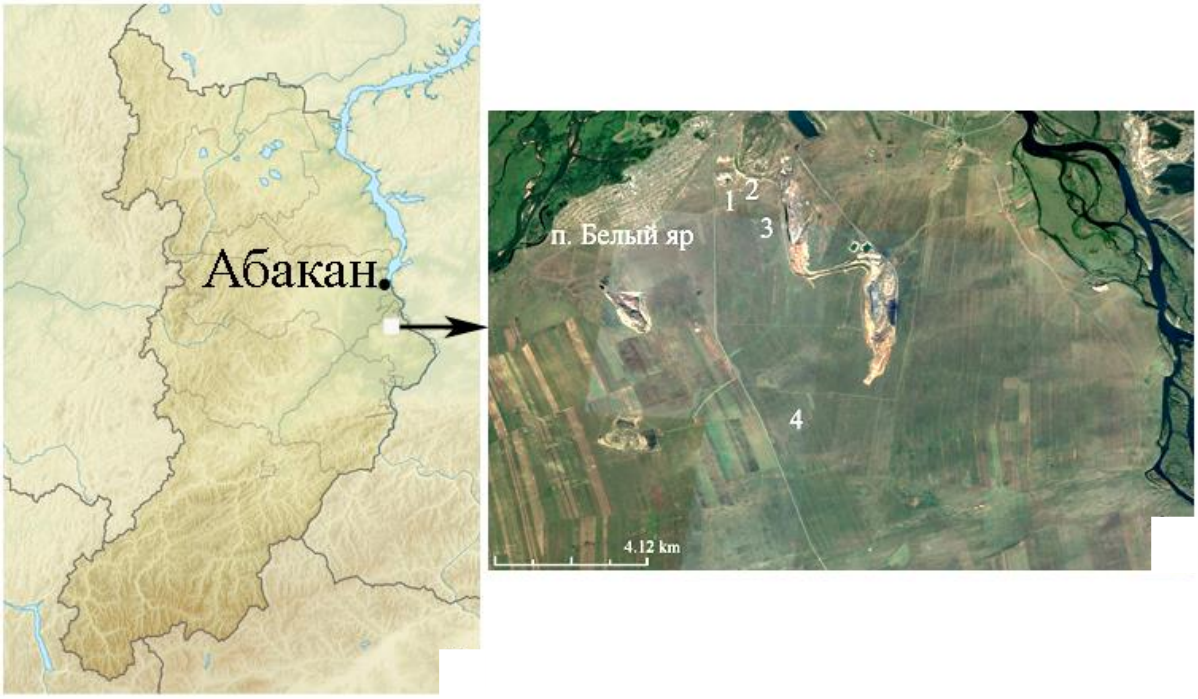


Рис. 1. Изменение площадей сельскохозяйственных угодий
и посевных территорий на территории РФ и Республики Хакасии



а *б*

Рис. 2. Месторасположение тестовых участков: Алтайский район Республики Хакасит (*а*),
окрестности п. Белый яр (*б*)

Полевые геоботанические описания проведены в 2003–2007 гг. сотрудниками ХГУ Т.М. Зоркиной, Н.А. Меркуловой, М.Н. Егуновой и в 2016, 2017 гг. – И.Ю. Ботвич, Т.М. Зоркиной. Проведено геоботаническое обследование полностью на всей территории АО «Алтайское» Алтайского района Республики Хакасит. Проводилось описание растительности, выявлялся флористический состав, учитывалась структура травостоя, проективное покрытие, жизненность растений, ярусность. После описания растительности учитывалась зеленая и сухая фитомасса, укосным методом в четырехкратной повторности. На графиках показаны величины зеленой фитомассы. При названии фитоценоза и ассоциации доминирующий вид ставился на последнее место. Кроме этого, дополнительно растительность на залежах изучалась методом закладки стацио-

нарных участков 400 м^2 (20×20 м). По стационарным участкам прослеживалась также динамика восстановления растительных группировок, составлены картосхемы [3; 4].

Анализ динамики значений температуры и количества осадков за период с 2000 по 2017 г., расчет «средних многолетних норм» температур и сумм осадков (год, месяц) базового периода ВМО 1961–1990 гг. проводился по данным АИСОРИ (www/meteo.ru/pogoda).

Изучение растительности залежных земель проводилось по данным прибора Modis спутников Terra и Aqua, с пространственным разрешением 250 м (продукты MOD09Q1, MYD09Q1). Временной ряд исследований по данным Modis составляет 15 лет (с 2003 по 2017 г.). В исследовании использовалась спутниковая информация высокого пространственного разрешения Landsat (30 м) – с 1989 по 2017 г. В ходе тематической обработки спутниковой информации производился расчет средних значений Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) за 8-дневный период по данным приборов Modis/Terra и Modis/Aqua. Расчет NDVI базируется на данных красного и ближнего инфракрасного диапазонов оптического спектра [5].

Изучаемые залежи Ф1 и Ф2 имеют одинаковый возраст – 11 лет в 2003 г. Особенностью развития является восстановление растительности залежи Ф2 почти в условиях заповедного режима, тогда как Ф1 развивается в условиях периодического выпаса скота в связи с близостью к Белому Яру. Возраст залежи Ф4 в 2003 г. – 5 лет, Ф3 – 3 года.

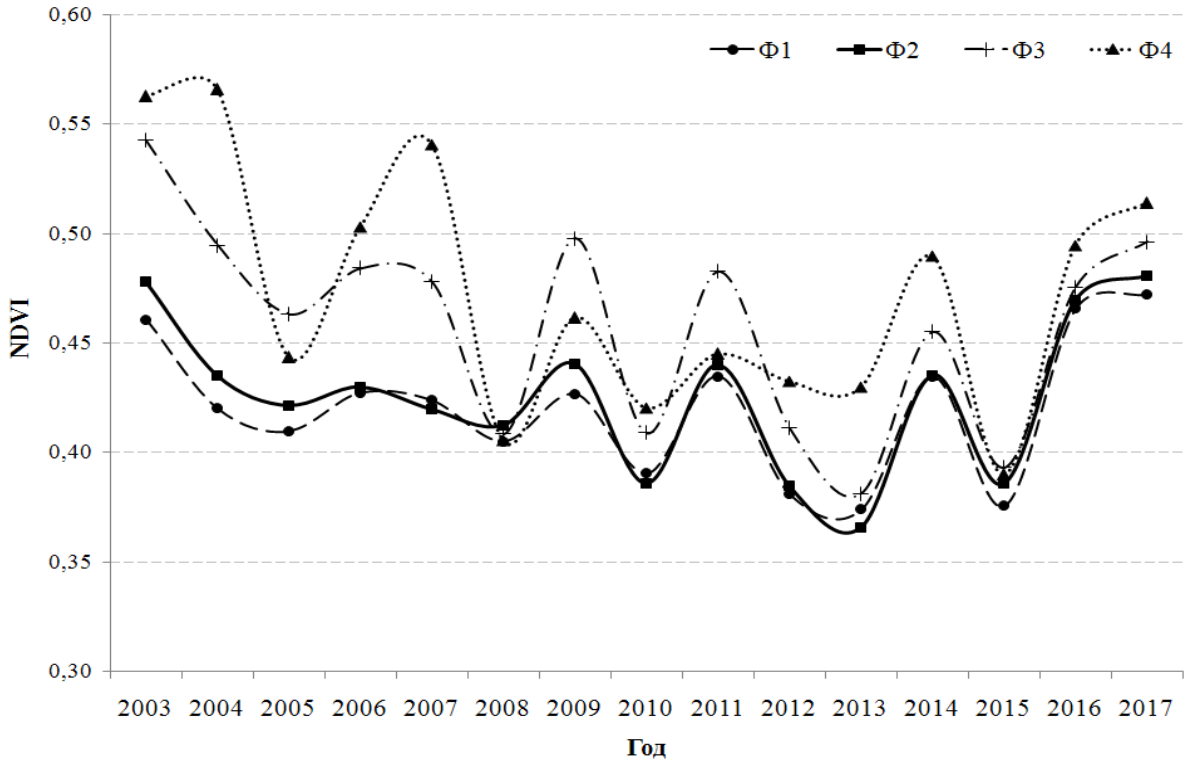


Рис. 3. Межгодовая динамика средних значений NDVI залежей Ф1, Ф2, Ф3, Ф4
(период усреднения май – сентябрь)

Значения NDVI Ф3 снижаются до 2005 г. (рис. 3). В 2006, 2007 гг. образуются переходные стадии (бурьянисто-разнотравно-пырейная, однолетне-полынно-пырейная и др.). С 2008 г. эта территория приобретает пырейную стадию, которая очень конкурентна в природных условиях. И может находиться в такой стадии достаточно долго, если не будут отрицательно действовать другие факторы. Значения NDVI Ф4 снижаются до 2008 г., далее до 2013 г. изменяются не значительно от 0,42 до 0,46. С 2014 г. величина дисперсии исследуемых значений увеличивается, что связано с массовым

разрастанием вязов на территории залежи. Рассматривая многолетние изменения значений NDVI залежей Ф1, Ф2 видно, что преобладает тенденция падения величины индекса NDVI растительности до 2008 г., что подтверждается данными о снижении фитомассы и проективного покрытия. Далее значения NDVI изменяются от 0,37 до 0,44 вплоть до 2015 г. Увеличение значений до 0,48 определено переходом фитоценозов в плотнодерновинную стадию восстановления, характеризующуюся наличием соответствующих злаков.

Заключение. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Определены динамика и особенности восстановления сорно-разнотравно-однолетне-полынного, пырейного с разнотравьем, разнотравно-злаково-полынного и полынно-злакового фитоценозов Алтайского района Республики Хакасии по спутниковым и наземным данным. Установлено постепенное формирование структурных элементов степных сообществ на исследуемых залежах Ф1 и Ф2. На залежи Ф4 происходит зарастание вязами. Наибольшее число вязов расположено на возвышенном участке поля (северная часть поля). Доминирующим фактором, определяющим рост и развитие вязов, является отсутствие сенокошения. Заселение южной части поля вязами происходит, но более медленно, что обусловлено проведением периодического сенокошения. В настоящее время отсутствует обработка земли (сенокошение), в связи с чем процесс зарастания вязами не обратим. В течение периода исследования определен переход Ф3 от бурьянистой стадии к пырейной в течение 2 лет.

2. Проведенная работа показала целесообразность использования временных рядов NDVI при изучении особенностей восстановления залежей. Биологические особенности, проективное покрытие, фитомасса в целом определяют величину NDVI. Межгодовая изменчивость NDVI отражает степень и время восстановления залежей.

3. На значения NDVI оказывают влияние не только абиотические факторы (климат, почвы), но и биотические (выпас, рекреационная нагрузка). В связи с этим продолжительность стадий восстановления не всегда соответствует литературным утверждениям.

Список литературы

1. Ооржак А.В., Дубровский Н.Г. Бурьянистые залежи Центральной Тувы // Вестн. Тувин. гос. ун-та. 2012. С. 11–16.

2. Меркулова Н.А., Зоркина Т.М. Продуктивность растительности залежных экосистем и ее динамика в условиях степной зоны Республики Хакасия // Алтай: экология и природопользование. Труды IV Российско-Монгольско науч. конф. молодых ученых и студентов. Бийск: РИО БПГУ им. В.М. Шукшина. 2005. С. 371–375

3. . Общесоюзная инструкция по проведению геоботанического исследования природных кормовых угодий и составлению крупно-масштабных геоботанических карт / Е.И. Гайдамака, Н.Я. Деркаева, А.М. Черкесов [и др.]. М.: Колос. 1984. 105 с.

4. Зоркина Т.М. Фитоценология: учебно-метод. пособие. Абакан: Изд-во Хакас. гос. ун-та им. Н.Ф. Катанова. 2003. 48 с.

5. Deering D.W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors // Ph. D. Dissertation. Texas A & M University. College Station. 1978. T. X. 338 p.

УДК 528.8.04, 528.88

И.Ю. Ботвич, Т.И. Письман, А.П. Шевырногов

Институт биофизики СО РАН, Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия
e-mail: irina.pugacheva@mail.ru, pech@ibp.ru, ap@ibp.ru

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЗАПОВЕДНИКА СТОЛБЫ

Проведено изучение изменчивости состояния лесной растительности на основе анализа многолетних рядов NDVI (2003–2016 гг.) хвойных и лиственных древостоев на территории Красноярского края (заповедник Столбы). Исходными данными являлись 8-дневная спутниковая информация Modis (продукт MOD09Q1) и метеорологическая информация с наземных метеостанций. Выявлены тренды усредненных NDVI лесной растительности за период май – сентябрь и максимальных значений NDVI. Ухудшение состояния лесной растительности исследуемого района, обнаруженное по спутниковым данным, объясняется совокупностью факторов: изменением климата, антропогенным влиянием Красноярска и наличием старовозрастного леса.

Ключевые слова: заповедник Столбы, хвойная и лиственная растительность, спутниковое зондирование, Modis, тренды NDVI, климат, антропогенные факторы.

Введение. Мониторинг состояния экосистем заповедных территорий ограничен строгим природоохранным режимом [1; 2]. В связи с этим для изучения различных экологических параметров, а также индикации состояния окружающей среды территорий с ограниченным режимом природопользования актуально отдавать предпочтение дистанционным методам исследования [3–5].

Целью работы является оценка состояния лесной растительности заповедника Столбы Красноярского края по спутниковым данным. Для этого проведен анализ многолетних рядов (2003–2016 гг.) усредненных NDVI хвойных и лиственных древостоев за период май – сентябрь, максимальных $NDVI_{max}$ и климатических изменений (средних значений температуры воздуха и суммы осадков в период с мая по сентябрь).

Методика и объекты исследования. В качестве тестовых участков выбраны лесные массивы, расположенные на территории заповедника Столбы (40 км от Красноярска, 55°38′ – 55°58′ с. ш., 92°38′ – 93°05′ в. д.). Государственный природный заповедник Столбы расположен на северо-западных склонах Восточного Саяна. Естественными рубежами охраняемой территории являются правые притоки реки Енисея: на северо-востоке – река Базаиха, на юге и юго-западе – реки Мана и Большая Слизнева. С северо-востока территория граничит с пригородом Красноярска.

Для данных исследований в качестве тестовых участков выбраны лесные территории со следующими преобладающими породами деревьев: сосна обыкновенная (*Pinus silvestris*), пихта сибирская (*Abies sibirica*), ель сибирская (*Picea obovata*), кедр сибирский (*Pinus sibirica*) и лиственные – осина (*Populus tremula*), береза белая (*Betula alba*) и береза повислая (*Betula pendula).*

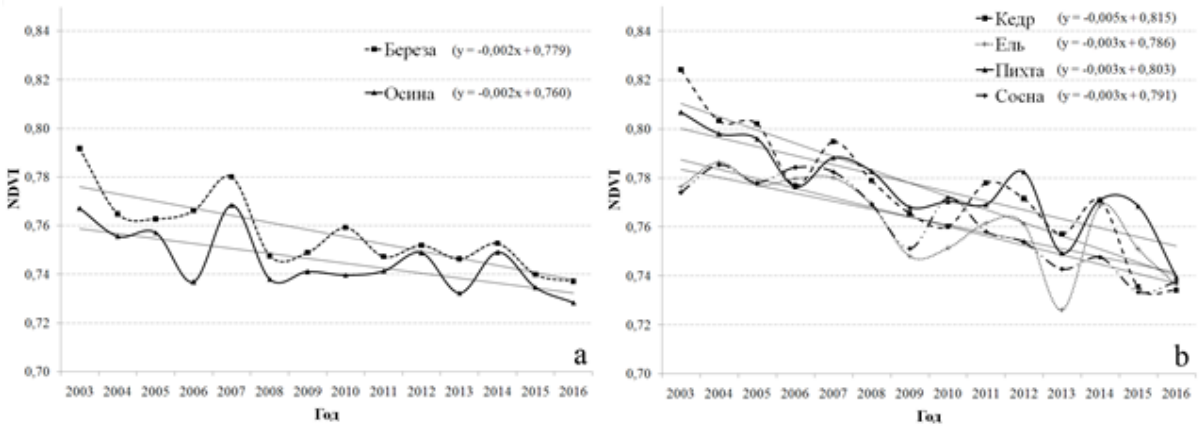
Изучение динамики спектральных оптических характеристик древесной растительности проводилось по спутниковым данным MODIS/Terra (продукты MOD09Q1) в течение вегетационных периодов 2003–2016 гг.

© Ботвич И.Ю., Письман Т.И., Шевырногов А.П., 2018

Исследование основывалось на 8-дневных данных видимого (620–670 нм (1-й канал)) и ближнего инфракрасного (841–876 нм (2-й канал)) каналов с пространственным разрешением 250 м (http://modis.gsfc.nasa.gov/).

Для определения местоположения исследуемых тестовых участков использовали информацию Экологического атласа заповедника Столбы http://stolby.torins.ru/main.php) и пространственную информацию снимков высокого разрешения.

Результаты и обсуждения. Для оценки изменчивости состояния лесных массивов на территории заповедника Столбы построены и проанализированы многолетние ряды усредненных NDVI за период май – сентябрь и максимальных NDVI хвойных и лиственных древостоев. Анализ многолетней динамики средних значений NDVI хвойных и лиственных древостоев за период май – сентябрь выявил отрицательную направленность рядов за 2003–2016 гг. (рисунок). При этом наклон тренда для хвойных древостоев больше, чем для лиственных. Поскольку индекс NDVI является простым показателем количества фотосинтетически активной биомассы, то естественно сделать вывод, что за 14-й период на исследуемой территории происходит уменьшение биомассы лесной растительности как лиственной, так и хвойной.



а *б*

Рисунок. Межгодовая изменчивость средней величины NDVI: *а* – лиственных и *б* – хвойных древостоев в течение периода вегетации (с мая по сентябрь)

В результате анализа трендов максимальных значений $NDVI_{max}$ этих же лесных массивов также выявлена отрицательная направленность. Наклон тренда максимальных NDVI для хвойных древостоев превышает наклон тренда для лиственных. Это подтверждает, что на территории заповедника за исследуемый период уменьшение биомассы хвойной растительности наступает быстрее, чем лиственной.

Заключение. В результате исследования состояния лесной растительности на территории заповедника Столбы (Красноярский край) по спутниковым данным за период 2003 – 2016 гг. выявлены закономерности, на основании которых сделаны следующие выводы:

- на основании отрицательных трендов усредненных NDVI хвойных и лиственных древостоев за период май – сентябрь и максимальных NDVI выявлена тенденция ухудшения состояния лесной растительности. Причиной этого может быть совокупность факторов: изменение климата, антропогенное влияние города и наличие старовозрастного леса;
- анализ динамики NDVI лесной растительности и климатического фактора в 14-тилетнем цикле выявил незначительную корреляционную зависимость между этими переменными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-45-243007 р_мол_а.

Список литературы

1. Анализ изменений сроков сезонных явлений у древесных растений заповедника Столбы в связи с климатическими факторами / Т.М. Овчинникова, В.А. Фомина, Е.Б. Андреева [и др.] // Хвойные бореальной зоны, XXVIII. 2011. № 1–2. С. 54–59.

2. Исследование климатических особенностей заповедника Столбы / Н.В. Фокина, Н.А. Лигаева, Е.Б. Андреева, Н.П. Должковая // Вестн. Краснояр. гос. пед. ун-та им. В.П. Астафьева. 2006. № 2. С. 22–27.

3. Ерунова М.Г., Гостева А.А., Якубайлик О.Э. Геоинформационное обеспечение задач экологического мониторинга особо охраняемых территорий // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия «Техника и технологии». 2008. Т. 1, № 4. С. 366–376.

4. Спутниковое зондирование Земли – уникальный инструмент мониторинга лесов России / А.С. Исаев, С.А. Барталев, Е.А. Лупян, Н.В. Лукина // Вестн. РАН. 2014. Т. 84, № 12. С. 1073–1079.

5. Терехин Э.А. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 112–124.

УДК 502.64

А.Н. Братанов[1], Г.Ю. Ямских[2]

[1]Министерство природных ресурсов и экологии
Республики Хакасия, Абакан, Россия
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: bratanov-an@mail.ru, yamskikh@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДОЛИНЫ РЕКИ КОДЫ МЕТОДОМ ДЕШИФИРИРОВАНИЯ

Представлены результаты анализа и дешифрирования космоснимков долины реки Коды в районе ансамбля археологических памятников «Проспихинская Шивера». В ходе выполнения работ проведен анализ геоморфологических и экологических особенностей района исследования. Выделены благоприятные геоморфологические факторы для пребывания и хозяйственной деятельности древнего человека.

Ключевые слова: дешифрирование, геоморфология, палеогеография, палеоэкология, геоархеология.

В результате геоархеологических работ на ансамбле археологических памятников «Проспихинская шивера» в полевые сезоны 2010–2011 гг. был проведен комплекс геоморфологических исследований, неотъемлемой частью которых было дешифрирование и анализ космоснимков территории.

Цель исследования: выявление и анализ геоморфологических особенностей долины реки Кода методом дешифрирования.

Исследуемая терраса, к которой приурочен ансамбль археологических памятников, располагается между долинами рек Ангара и Кода (рис. 1). Для Ангары на совре-

© Братанов А.Н., Ямских Г.Ю., 2018

менном этапе характерно врезание русла реки. Продольный профиль ее не выработан, современные аллювиальные отложения распространены не достаточно широко для меандрирования. Первая надпойменная терраса в долине развита локально. Близкое залегание консолидированных пород затрудняет эрозионные процессы. В случае повышенного содержания наносов в потоке, относительно динамических характеристик водного потока происходит формирование островов.

Рис. 1. Долина реки Коды

Долина реки Коды на данном участке заполнена аллювием, река интенсивно меандрирует. Ширина поймы значительно больше ширины русла. В условиях денудационного расчлененного рельефа происходит интенсивный вынос твердого вещества, вследствие чего значительная распространенность аллювиальных отложений не характерна для рек района исследования.

Большинство долин рек-притоков Ангары, даже с объемом стока многократно превосходящим расход реки Коды, характеризуются слабым развитием аллювиальных форм рельефа, сосредоточенных преимущественно в устье и направлены перпендикулярно основному руслу. Долина реки Коды направленная под острым углом 25–30^{o} руслу реки Ангары является исключением из указанных закономерностей (рис. 2).

Изучение террасы в полевых условиях, позволяет заключить, что рельеф террасы представлен относительно ровными площадями и возвышенностями, разделенные седловинами. Наибольшие высоты террасы расположены вдоль русла реки Ангары. Наименьшие – вдоль русла Коды. Высота террасы относительно уреза воды в межень на исследуемом участке составляет 8,0–13,0 м.

Анализ строения рыхлых отложений террасы и ее высотных отметок указывают на образование островов узла впадения в позднем плейстоцене. Постепенный их выход из под эродирующего влияния руслового потока, вследствие врезания реки Ангары, и последующая аккумуляция пойменных отложений, предопределили рельеф террасы.

В условиях расчлененного денудационного рельефа указанная особенность долины реки Коды могла сформироваться только в результате тектонических процессов, приведших к опусканию приустьевой части долины.

После опускания части долины аккумуляция аллювиальных отложений и формирование будущей террасы происходило по схеме развития узлов слияния рек, описанной Р.С. Чаловым [1; 2].

В ходе взаимодействия русловых потоков в узле слияния происходит накопления аллювия. Постепенно угол впадения притока снижается, а сам узел впадения смещается вниз по течению, оставляя цепь островов, разделенных протоками. В результате врезания реки в собственные отложения, острова узла слияния переходят из поймы в первую надпойменную террасу.

Многочисленные исследования указывают на формирование первой надпойменной террасы реки Ангары в Каргинское межледниковье.

Выявленное чередование песчаного и галечного материала в толще нижележащих отложений фации прирусловой отмели, свидетельствует в пользу данной гипотезы и указывает на колебания транспортирующей способности водного потока (по всей вероятности из-за колебаний влагообеспеченности в Каргинский период). Терраса на момент исследования испытывала эродирующее действие реки Ангары, что выражалось в отсутствии отложений низкой и средней поймы, а сама терраса со стороны реки Ангары заканчивалась обрывом.

Среди выделенных особенностей рельефа, можно выделить факторы пребывания и хозяйственной деятельности древнего человека:

- расчлененный денудационный рельеф территории определяет высокую степень зависимости хозяйственной деятельности от гидрологических условий;
- расположение террасы между двумя водотоками позволяет использовать водные и биологические ресурсы как Ангары, так и Коды, (дополнительно более 15 км^2 поймы);
- высотные характеристики террасы позволяют подстраиваться к гидрологической обстановке, незначительно меня плановое местоположение, что наглядно демонстрирует приуроченность памятника к различным уровням;
- ансамбль археологических памятников «Проспихинская шивера» расположен на западном краю террасы. Указанная часть террасы характеризуется наибольшей открытостью, лучшей дренируемостью и прогреваемостью территории, подвержена воздействию долинных ветров.

Рис. 2. Расположение аллювиальных форм рельефа в долинах различных притоков реки Ангары (Масштаб 1: 500)

Заключение. Геоморфологическое строение территории во многом определено протеканием процессов денудации в условиях тектонической активности территории и различных по прочности геологических оснований.

Образование исследуемой террасы связано с тектоническим опусканием нижней части долины реки Коды и накоплением аллювия в узле слияния.

В условиях слабой развитости пойменных форм рельефа в долине реки Ангары, наличие дополнительных биологических ресурсов поймы реки Коды могло играть определяющую роль в хозяйственной деятельности древнего человека и определять места расположения стоянок.

Использование методов дешифрирования позволило с необходимой полнотой охарактеризовать региональные особенности геоморфологии речных долин и выделить уникальные свойства объекта исследования.

Список литературы

1. Чалов Р.С., Рулева С.Н. Влияние переформирований русел на развитие узлов слияния рек // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 161–168.

2. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: Крассанд, 2012. 960 с.

УДК 551.465.7

В.И. Бышев, В.Г. Нейман, А.Н. Сидорова,
В.Е. Скляров, М.В. Анисимов

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
e-mail: byshev.v@mail.ru

О МУЛЬТИДЕКАДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА И ПЕРСПЕКТИВАХ ЕЕ МОНИТОРИНГА

Важнейшей особенностью современного климата является мультидекадная изменчивость теплосодержания верхнего деятельного слоя океана. Ее мониторинг может осуществляться путем спутниковых наблюдений двух взаимно дополняющих характеристик: аномалий температуры поверхности и уровня океана.

Ключевые слова: океан, атмосфера, современный климат, глубокая конвекция, аномалии, температура, атмосферное давление, климатическая изменчивость, стерический уровень.

Введение. Важнейшей особенностью современного климата является его мультидекадная фазовая изменчивость [1–6]. Открытие глобальной атмосферной осцилляции (ГАО) [7] и планетарной мультидекадной осцилляции теплосодержания океана (МОСТОК) [8] позволили установить источник и механизм наблюдаемой динамики климата. Было обнаружено [8], что в положительную фазу ГАО (1975–1999 гг.), когда в атмосфере экваториально-тропического пояса (30° ю. ш. 30° с. ш.; 60° з. д. 180° в. д.) формировалась положительная аномалия атмосферного давления, а в океанах (в северных частях Атлантического и Тихого, а также в Южном) обнаруживались области, в которых наблюдалась интенсификация теплообмена между океаном и атмосферой: потоки явного и скрытого тепла в атмосферу возрастали, верхний деятельный слой

© Бышев В.И., Нейман В.Г., Сидорова А.Н., Скляров В.Е., Анисимов М.В., 2018

(ВДС) океана выхолаживался. Глубокая конвекция при этом выступала в качестве механизма тепловой разгрузки ВДС. До середины 70-х гг. прошлого века и в начале XIX в. процессы теплообмена были существенно ослаблены: ВДС океана аккумулировал тепло, восстанавливая свое начальное теплосодержание. Естественно, что тепло, поступающее из океана в атмосферу с 1975 по 1999 г. перераспределялось на континенты и способствовало наблюдаемому потеплению, причем вклад этого фактора еще предстоит оценить.

Материалы и методика. Детальные исследования термических характеристик ВДС в Мировом океане за период 1948–2007 гг. были выполнены на основе численных расчетов по модели Института вычислительной математики РАН [9; 10] с пространственным и временным разрешением 0,5° широты на 1° долготы и 1 ч соответственно. Особое внимание обращено на районы в Атлантическом (55° с. ш. 65° с. ш., 40° з. д. 30° з. д.) и Тихом (40° с. ш. 45° с. ш., 152° з. д. 157° з. д.) океанах, в которых глобальное потепление климата (1975–1999 гг.) сопровождалось значительным выхолаживанием ВДС [11], а также на Южный океан (55° ю. ш. 50° ю. ш., 145° в. д. 150° в. д.). Для района Тихого океана, кроме того, был произведен анализ многолетних гидрологических наблюдений (1960–2015 гг.), который позволил [12] подтвердить согласованность результатов численного моделирования с данными наблюдений. Поскольку изменчивость теплосодержания ВДС должна сопровождаться соответствующими изменениями стерического уровня океана, то последний может быть оценен альтиметрическими измерениями со спутника. Для проверки подобной связи были использованы альтиметрические данные, расположенные на сайте www.sealevel.colorado.edu.

Обсуждение результатов. На рис. 1 представлены результаты модельных расчетов изменчивости термической структуры ВДС в Тихом океане (40° с. ш. 45° с. ш., 152° з. д. 157° з. д.) для холодной половины года в период 1948–2007 гг.: а) эволюция термической структуры; б) средние вертикальные распределения температуры за отдельные фазы климата; в) временной ход теплосодержания. Наиболее примечательными являются факты тепловой разгрузки океана в период 1975 по 1999 г. (рис. 1, *а*), что хорошо иллюстрируется фазовой динамикой среднего профиля температуры в слое 0–800 м (рис. 1, *б*) и заметным сокращением теплосодержания ВДС (рис. 1, *в*) в этот период. Подобные результаты (рисунки не приводятся) получены также по северной Атлантике и Южному океану.

Наблюдения, выполненные в комплексных крупномасштабных гидрофизических экспериментах МЕГАПОЛИГОН [13] и АТЛАНТЭКС-90 [14], действительно подтвердили, что тепловая разгрузка ВДС в периоды проведения этих экспериментов соответственно в Тихом океане (1987 г.) и в Атлантике (1990 г.) совершалась. Обнаруженные ранее [15] разнонаправленные тенденции изменения приповерхностной температуры над океанами и континентами в XX в. явно указывали на связь потепления континентов с тепловой разгрузкой океанов. Оценки понижения уровня океана в результате выхолаживания вод его ВДС (рис. 1, *в*) составили 5–7 см, что согласуется со спутниковыми альтиметрическими наблюдениями (рис. 2).

Заключение. Результаты численного моделирования Мирового океана, анализ многолетних гидрологических наблюдений, данные крупномасштабных гидрологических экспериментов (МЕГАПОЛИГОН, АТЛАНТЕКС-90) позволили сделать вывод о связи мультидекадной изменчивости современного климата с вариациями теплосодержания ВДС океана. В свою очередь, изменения теплосодержания ВДС океана сопровождаются возмущениями его стерического уровня, что открывает возможность мониторинга теплового состояния океана путем долговременных альтиметрических измерений.

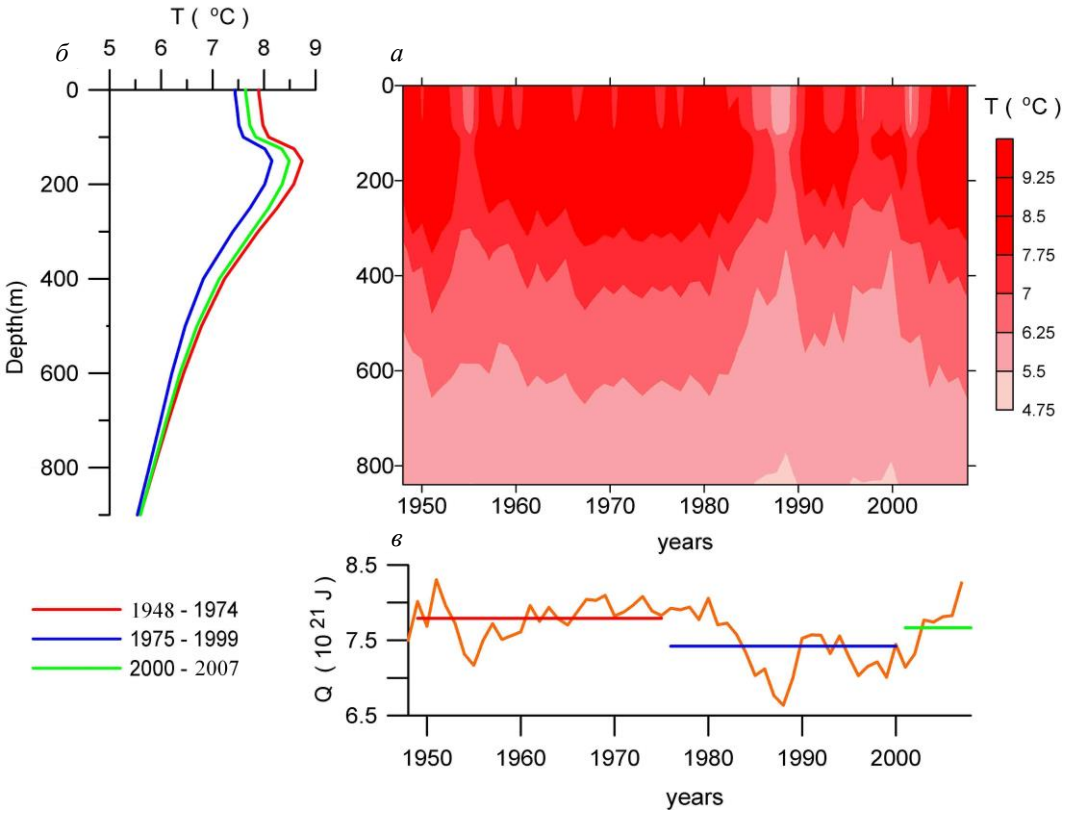


Рис. 1. Эволюция термической структуры ВДС в Тихом океане (400–450 с. ш., 1520–1570 в.д.) в холодную половину года в период 1948–2007гг. [8]: *а* – изоплеты температуры в центре указанного района; *б* – вертикальные распределения средней температуры трех фаз климата; *в* – изменение теплосодержания верхнего 800-метрового слоя. Горизонтальные линии соответствуют значениям средней величины теплосодержания ВДС в пределах трех фаз климата

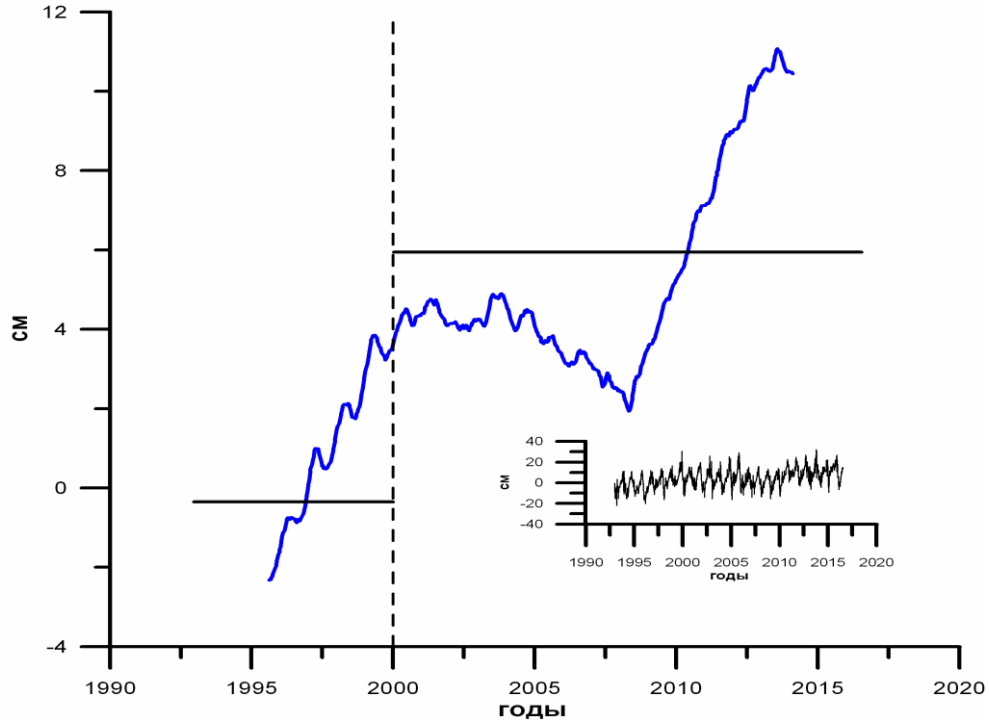


Рис. 2. Ход аномалий уровня (5-летнее скользящее осреднение) в Тихом океане (420 с. ш., 1560 в. д.) по данным (на вставке) спутниковых измерений www.sealevel.colorado.edu. Горизонтальные линии – средние аномалии расчитанного стерического уровня за периоды с 1993 по 1999 г. и с 2000 по 2016 г.

Список литературы

1. Bond N.A., Overland J.E., Stabeno Spillane M. Recent shifts in the state of the North Pacific // Geophysical Research. Letters. 2003. № 30 (23), 2183. DOI: 10.1029/2003GL018597.

2. Minobe S.A. 50–70-year climatic oscillation over the North Pacific and North America // Geophyscal Research Letters. 1997. Vol. 24. P. 683–686.

3. Tsonis A.A., Swanson K., Kravtsov S.A. New dynamical mechanism for major climate shifts // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34, L13705. DOI: 10.1029/2007 GL030288.

4. Lee T., McPhaden M.J. Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20-th Century, Geophysical Research Letters. 2008. № 35, L01605. DOI: 10.1029/2007 GL032419j.

5. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов, И.В. Серых // Доклады РАН. 2011. Т. 438, № 6. С. 817–822.

6. IPCC, 2013, Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. T.F. Stocker [et al.]), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

7. О междекадной изменчивости климатических характеристик океана и атмосферы в регионе Северной Атлантики / В.И. Бышев, М.В. Анисимов, В.Б. Залесный [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 304–311.

8. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content / V.I. Byshev, V.G. Neiman, M.V. Anisimov [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174, № 7. P. 2863–2878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.

9. Модель циркуляции Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана / С.Н. Мошонкин, Н.А. Дианский, Д.А. Эйдинов, А.В. Багно // Океанология. 2004. Т. 44, № 6. С. 811–825.

10. Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948-2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН, Серия «Физика атмосферы и океана». 2014. Т. 50, № 1. С. 3–15.

11. О пространственной неоднородности некоторых параметров глобальной изменчивости современного климата / В.Н. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов, И.В. Серых // Доклады РАН. 2009. Т. 426, № 4. С. 543–548.

12. Бышев В.И., Фигуркин А.Л., Анисимов И.М. Междекадная изменчивость термической структуры вод верхнего деятельного слоя на северо-западе Тихого океана // Доклады РАН. 2017. Т. 477, № 2. С. 240–244.

13. Эксперимент МЕГАПОЛИГОН. М.: Наука, 1992. 415 с.

14. Аномальное состояние Ньюфаундлендской энергоактивной зоны в 1990 г. / В.И. Бышев, Л.Н. Копрова, С.Е. Навроцкая [и др.] //Доклады АН СССР. 1993. Т. 331, № 6. С. 735–738.

15. Бышев В.И., Нейман В.Г. О существенных различиях крупномасштабных изменений приземной температуры над океанами и материками // Океанология. 2006. Т. 46, № 2. С. 165–177.

УДК 551.4; 910.1; 910.27

А.Г. Валеев

Институт географии, Алматы, Казахстан
e-mail: adiletv@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ЦМР ДЛЯ АНАЛИЗА МОРФОМЕТРИИ ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА ОЗЕРА АЛАКОЛЬ

Изложены результаты морфометрического анализа территории трансграничного бассейна Алаколь-Сасыккольской системы озер на основе применения данных дистанционного зондирования. Инструментами ГИС были проведены обработка цифровой модели рельефа SRTM для актуализации и детализации морфометрических условий и их влияния на формирование речных бассейнов.

Ключевые слова: озерный бассейн, морфометрия рельефа, цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование.

Введение. Бассейн озера Алаколь расположен на юго-востоке Казахстана и занимает внутригорную впадину, окаймленную горными системами Жетысу Алатау на юге, Тарбагатая на севере и Барлык на востоке. Юго-восточная часть бассейна расположена на территории КНР. По площади она занимает одну треть бассейна и представлена долиной реки Эмель – главной водной артерией, формирующейся на южных склонах гор Тарбагатай. В тектоническом плане исследуемый бассейн является частью Балкаш-Алакольской впадины. В пределах бассейна на рис. 1 выделяется Алаколь-Сасыккольская низменная аккумулятивная равнина, визуализированная по данным обработки ЦМР [1–4].

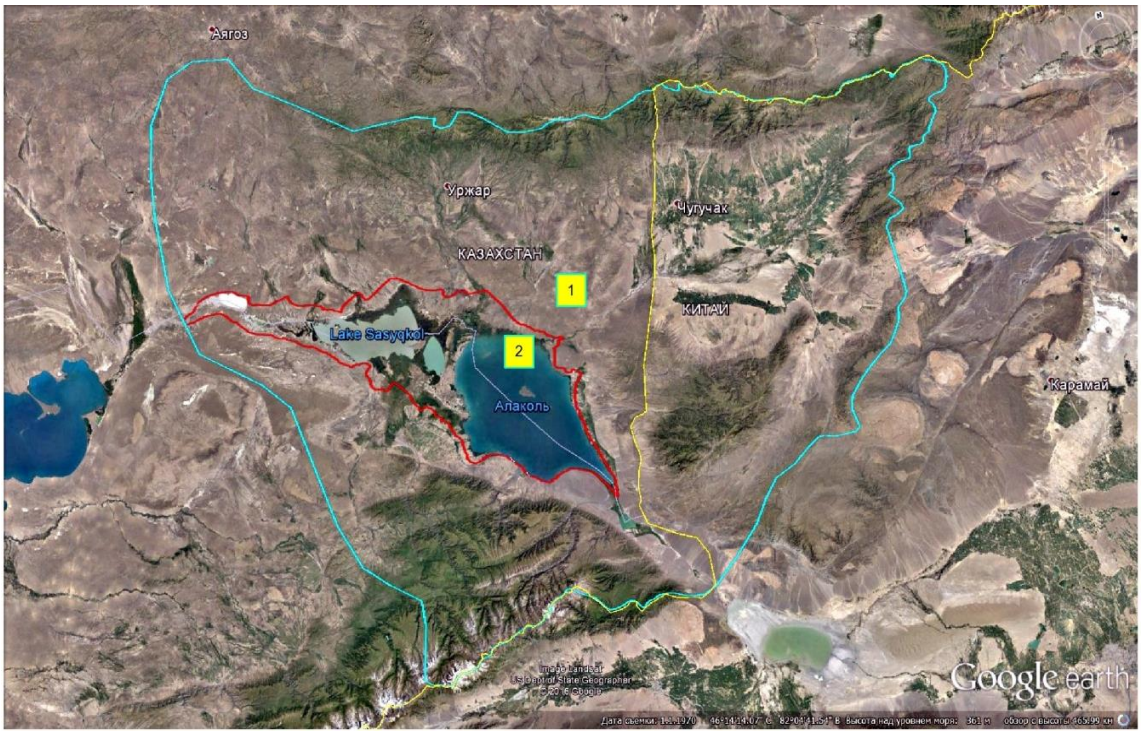


Рис. 1. Водосборный бассейн Алаколь-Сасыккольской системы озер (1),
включающий Алаколь-Сасыккольскую низменную аккумулятивную равнину (2)

© Валеев А.Г., 2018

В статье применены геоинформационные методы морфометрического анализа бассейна Алаколь-Сасыккольской системы озер, хозяйственная, туристско-рекреационная и природоохранная значимость которых велика на республиканском и международном уровнях. Применение новейших дистанционных методов изучения

и уточнения морфометрических параметров бассейнов озер, как целостной геосистемы, и возможность их мониторинга на основе анализа данных дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования дает новые возможности решения задач гидрологии, геоморфологии и в целом рационального природопользования. Актуально их применение для труднодоступных горных частей водосборных бассейнов, но особенно важно их применение для трансграничных бассейнов ввиду сложности их натурных обследований.

Изучение и детализация морфометрических параметров бассейна является важным условием для получения уточненной оценки и картографирования водных ресурсов, оценки риска развития опасных водообусловленных процессов и их возможного воздействия на селитебные и хозяйственные объекты. В исследовании предлагается на основе анализа цифровой модели рельефа и космических снимков определить особенности морфометрического строения бассейна озера Алаколь, влияющие на водноресурсный потенциал территории.

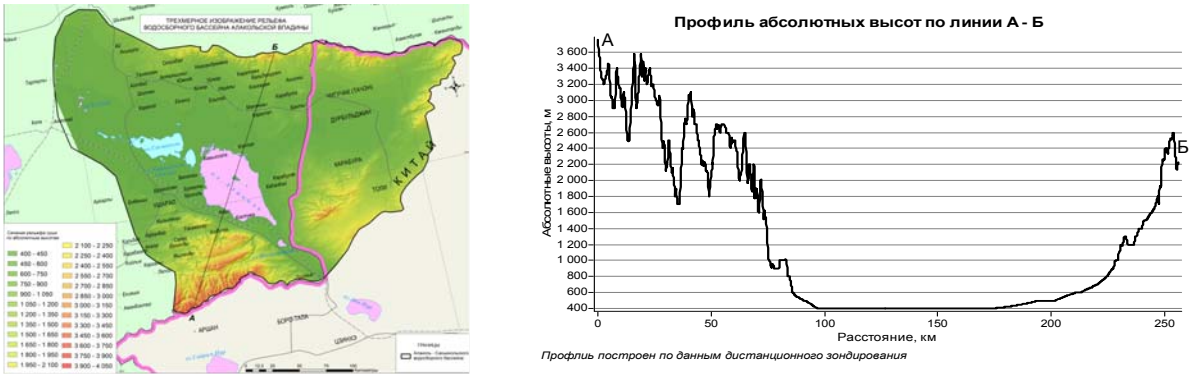
Результаты исследования. Методы проведения и фундаментальные основы морфометрических работ в изучении геоморфологии очень подробно исследовали в 1940 и 1950-х гг. канадские ученые R.E. Horton и A.E. Strahler [5], 1960–1970 гг. коллектив саратовских ученых геоморфологов под руководством В.П. Философова опубликовал несколько научных трудов по применению морфометрических методов при поиске полезных ископаемых [6; 7]. На сегодняшний день методика морфометрического анализа рельефа выполняется с помощью данных дистанционного зондирования в частности с применением геоинформационных систем и цифровых моделей рельефа. Определение морфометрических параметров с помощью обработки ЦМР получило широкое распространение среди геоморфологов ближнего и дальнего зарубежья.

Абсолютные высоты исследуемой территории на рис. 2 находятся в пределах от 350 (береговая линия озера Алаколь по данным обработки ЦМР) – 4 000 (водораздел Жетысу Алатау) метров над уровнем моря [3]. Водосборный бассейн по ширине в его средней части составляет 310 км, по длине – 210 км. Используя инструменты модуля 3D Analyst, программного обеспечения ESRI (ArcGIS), произвели обработку и вычисление входной цифровой модели рельефа для создания трехмерной визуализации рельефа.

Область формирования поверхностных водотоков в северной и северо-восточной частях бассейна озера Алаколь занимает практически две трети от общей площади водосбора. На ней берут начало следующие реки: Эмель, Хатынсу, Уржар, Тасты, Кусак др. Водосборная территория южной и юго-восточной частей бассейна охватывает одну третью часть всей площади бассейна, но, при этом, суммарный сток формирующихся здесь постоянных и временных водотоков составляет основную долю водного баланса всех расположенных здесь озер [2].

Главные реки описываемой территории – Тентек, Жаманты, Ыргайты, Оленды и Токты, их истоки расположены на северном склоне восточной части Жетысу Алатау. Для наглядного представления и анализа морфометрических особенностей исследуемых территорий, влияющих на гидрологические и геоморфологические параметры, построены продольные и поперечные профили рек Эмель, Катынсу, Тентек, Жаманты, Ыргайты и созданы их 3D-модели, на рис. 3 (р. Эмель).

Используя инструменты Spatial Analyst проведена обработка ЦМР, получена уточненная информация по уклонам и экспозициям склонов. Уклоны и экспозиция поверхности – фундаментальные геоморфологические параметры, которые закономерно связаны с экзогенными процессами и явлениями. Уклон представляет скорость изменения высоты для каждой ячейки цифровой модели рельефа (ЦМР). Уклон вычисляется в градусах, значения которого находятся в диапазоне от 0 до 90 [8].



а *б*

Рис. 2. Трехмерная модель рельефа водосборного бассейна озера Алаколь (*а*) и гипсометрический профиль бассейна по линии А–В (*б*)

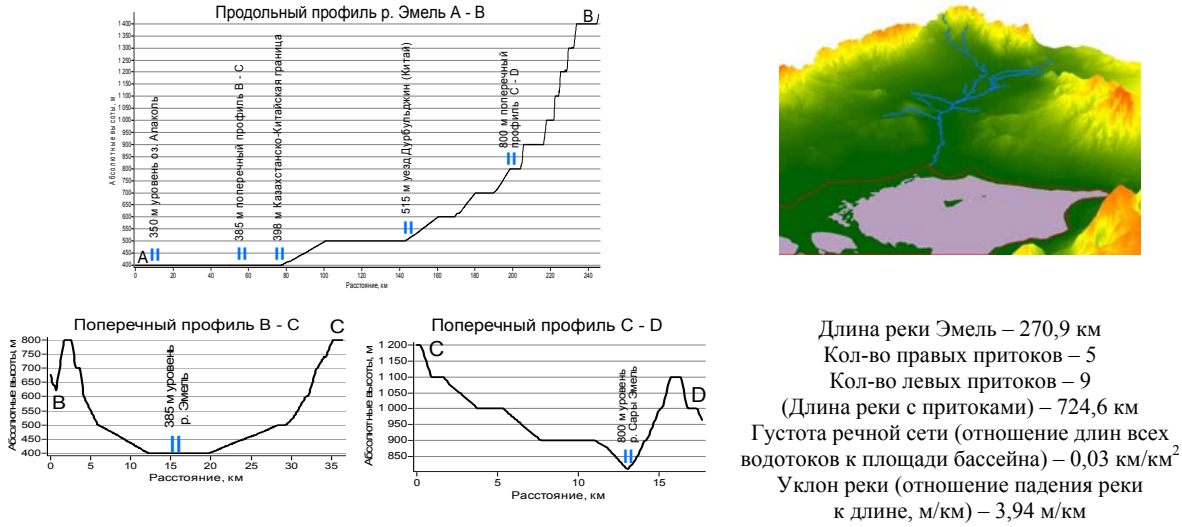


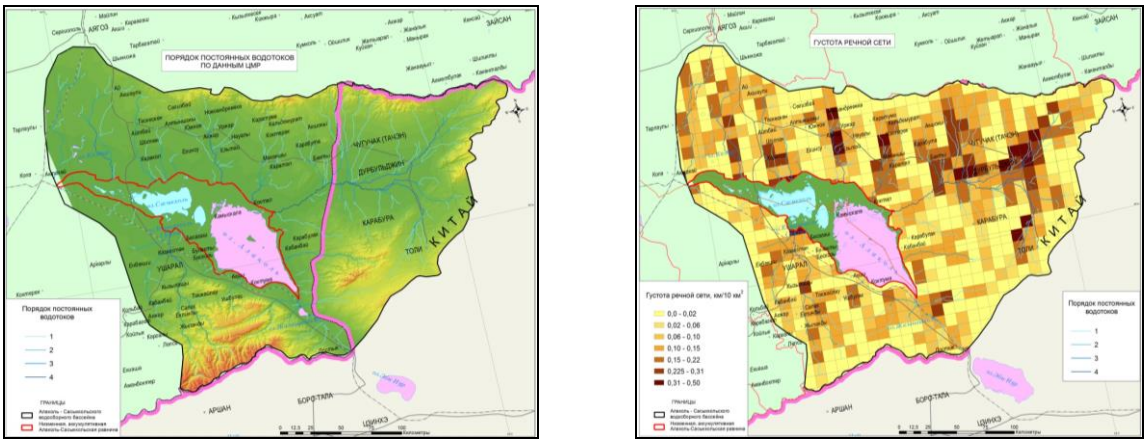
Рис. 3. Продольный (А–В) и поперечные (В–С, С–D) профили реки Эмель с 3D-моделью водосборного бассейна и основными характеристиками

Используя инструменты Spatial Analyst, проведена обработка ЦМР, получена уточненная информация по уклонам и экспозициям склонов. Уклоны и экспозиция поверхности – фундаментальные геоморфологические параметры, которые закономерно связаны с экзогенными процессами и явлениями. Уклон представляет скорость изменения высоты для каждой ячейки цифровой модели рельефа (ЦМР). Уклон вычисляется в градусах, значения которого находятся в диапазоне от 0 до 90 [8]. Статистический анализ соотношения площадей с различными уклонами поверхности над урезом концевых озер свидетельствует о том, что практически для двух третей бассейна характерны уклоны менее 10°, что в целом свидетельствует здесь о небольших скоростях протекания процессов формирования рельефа аккумулятивных равнин. Территории с высокой

активностью денудационных процессов, при уклонах свыше 30°, занимают менее 3 % бассейна.

Экспозицию склона также можно рассмотреть как направление наклона с точки зрения расположения к стороне света или направление по компасу. Измеряется по часовой стрелке в градусах от 0° на севере до 360°. Данным экспозициям склонов свойственно проявление аридности. Основная интенсивность проявления эрозии привязана к сезонным процессам таяния снега. Широкое площадное распространение сходных экспозиций склонов свидетельствует о наличии активных в новейшее время тектонических нарушений.

Следующим этапом исследований явился детальный анализ эрозионной сети (постоянные и временные водотоки), формирующей водосборный бассейн. Используя исходную ЦМР произвели алгоритм вычислений с помощью инструментов «Гидрология» (Spatial Analyst) [9; 10] на рис. 4, *а*. Исходными данными для создания густоты речной сети мы использовали полученные постоянные водотоки и квадратные ячейки со стороной в 10 км, соотношением км/км^2. В качестве показателя горизонтального расчленения, использовалась длина тальвегов постоянной речной сети. По рис. 4, *б* показатели густоты речной сети расположились неравномерно. Участки с длинами водотоков от 30 до 50 км находящихся в 100 км^2 наиболее густо расположены в бассейнах рек Эмель, менее густо Катынсу и Уржар. Территории бассейнов рек Ыргайты, Жаманты и Тентек отличаются не высокими значениями густоты расчленения от 2 до 20 км на 100 км^2.



а *б*

Рис. 4. Результаты трехмерного моделирования бассейна по SRTM: сеть постоянных водотоков (*а*); густота речной сети бассейна на основе ЦМР (*б*)

Заключение. Результатом исследований явился комплекс детальных морфометрических показателей по бассейну Алаколь-Сасыккольской системы озер, полученный на основе анализа цифровой модели рельефа и данных дистанционного зондирования. Использование новейших геоинформационных технологий позволило изучить трансграничный бассейн, как единую целостную систему. При этом существенным вкладом явилось уточнение морфометрических показателей, полученных по китайской части бассейна, а также по труднодоступным горным территориям казахстанской части. Полученные результаты по речным и озерным системам Алаколь-Сасыккольского бассейна являются важной составляющей при изучении водного режима рек и озер бассейна, для уточнения гидрологических расчетов расходов, оценки характера половодья и скорости течения рек, для уточнения изменения уровня озер и других, взаимосвязанных с морфометрией гидрологических характеристик бассейна.

Морфометрические условия Алаколь-Сасыккольского бассейна оказывают влияние на водно-ресурсный потенциал в виде формирования речных бассейнов отдельных горных систем. Где ведущую роль играют перепад абсолютных высот, площадь водосбора, экспозиция и уклон склонов, развитие эрозионной сети, литологический состав подстилающей поверхности. Также данные характеристики оказывают значительное влияние на развитие опасных экзогенных процессов, происходящих в береговой зоне оз. Алаколь. Высокая энергия горного рельефа сформировали значительные конусы выноса из обломочного материала. Подошва шлейфа конусов выноса южного и юго-западного побережий озера отчетливо окаймляет береговую линию и диктует современный облик и литологическое строение береговой зоны.

Список литературы

1. Рельеф Казахстана: в 2 ч. Ч. 2. Алматы: Гылым, 1991. С. 47.

2. Глобально значимые водно-болотные угодья Казахстана (Алаколь-Сасыккольская система озер). Астана, 2007. 271 с.

3. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/.

4. Национальный Атлас Республики Казахстан. Алматы, 2006. Т. 1. С. 52–53.

5. URL: http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10ab.html

6. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Изд-во Сарат. ун-та, 1960. 95 с.

7. Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 232 с.

8. URL: http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/slope-function.htm.

9. Михайлов В.А. Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2. URL: http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640.

10. Погорелов А.В., Думит Ж.А. Морфометрия рельефа бассейна реки Кубани: некоторые результаты цифрового моделирования. URL: https://www.academia.edu.

УДК 528.88

Е.В. Варламова[1], В.С. Соловьев[1, 2]

[1]Институт космофизических исследований и аэрономии
имени Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
[2]Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия
e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru

ИЗМЕНЕНИЯ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ СРОКОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЛЕСОТУНДРЫ ЯКУТИИ (1982–2017)

Проведены исследования изменения фенологических сроков растительного покрова лесотундры с использованием суточных и 15-дневных значений вегетационного индекса NDVI (1982–2017). Показано, что на севере Якутии наблюдается локальная область с высоким показателем положительного тренда вегетации ~10–15 %, существенный вклад в который вносит рост майских значений NDVI. Повышение NDVI хорошо согласуется с ростом температуры воздуха. Расчет начала (SOS) и окончания (EOS) вегетационного сезона проводился с помощью порогового алгоритма BISE [1]. За исследуемый период SOS сместилось на более ранние сроки на ~12 суток, EOS наблюдался позже на ~4 суток,

© Варламова Е.В., Соловьев В.С., 2018

что привело к увеличению продолжительности сезона вегетации на ~16 суток. Максимальное значение усредненного сезонного хода NDVI за 2008–2017 гг. выросло на ~10 % по сравнению с 1982–1991 гг.

Ключевые слова: AVHRR/NOAA, LTDR, GIMMS, алгоритм BISE, NDVI, фенологические сроки, глобальное потепление климата, лесотундра, север Якутии.

Введение. Длинные ряды спутниковых данных позволяют отслеживать изменения в окружающей среде, вызванные процессами глобального изменения климата. Растительный покров является одним из наиболее чувствительных природных индикаторов таких изменений. Для количественной оценки состояния растительности широко используются вегетационные индексы, рассчитываемые по данным ДЗЗ. Существуют различные методы и подходы оценки начала и окончания сезона вегетации с использованием пороговых алгоритмов [2–5, а также см. ссылки в них]. В работах [2–4; 6] приводятся результаты исследований динамики фенологических сроков, показывающих, что за последние несколько десятилетий наблюдаются существенные пространственно-временные изменения параметров растительного покрова. Однако эти работы в целом относятся к североамериканскому континенту или европейской территории. Исследования изменений вегетации на высоких широтах носят усредненный глобальный характер и не отражают локальные, региональные особенности.

Целью работы является исследование изменений фенологических сроков растительного покрова лесотундры (на примере севера Якутии) в условиях глобального потепления климата по данным спутниковых наблюдений 1982–2017 гг.

Данные и методика. В работе использованы данные спутников NOAA проектов LTDR v.4 (Long Term Data Record, 1982–2017 гг.) [7] и GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies, 1982–2015 гг.) [8], представляющие собой набор ежедневных и максимальных 15-дневных значений NDVI соответственно. Значения приземной температуры воздуха и атмосферных осадков за аналогичный период взяты из среднемесячного набора данных CRU TS v.4.01 [9]. Для идентификации типов растительности была использована карта наземных экосистем Северной Евразии, разработанная в рамках проекта Global Land Cover 2000 [10]. Фенологические сроки (начало и конец вегетационного сезона) рассчитывались по методу «NDVI 0,3» изложенному в работе [2]. Для фильтрации и сглаживания ряда ежедневных значений NDVI использована вторая интерпретация алгоритма BISE (Best Index Slope Extraction) [1].

Результаты и обсуждения. По данным проекта GIMMS были рассчитаны сезонные (май – сентябрь) значения вегетационного индекса NDVI и построена карта линейного тренда NDVI за период 1982–2015 гг., представленная на рис. 1. Как следует из рис. 1, на рассматриваемой территории в целом преобладает положительный тренд NDVI, средний показатель которого составил около 4 %. Наиболее обширная область с высокими показателями (~10–15 %) тренда NDVI наблюдается на севере Якутии (выше 64-й параллели), существенный вклад в который, как было получено ранее в [11], вносит рост майских значений NDVI. В работах [12–13] была исследована связь сезонных вариаций NDVI с приземной температурой воздуха и атмосферными осадками. В результате было показано, что на севере Якутии наблюдается обширная область с высокими показателями коэффициентов корреляции NDVI с температурой (R = ~0,7–0,8); корреляция с атмосферными осадками имеет неоднородное распределение с незначительным показателем (R= –0,3 – +0,3).

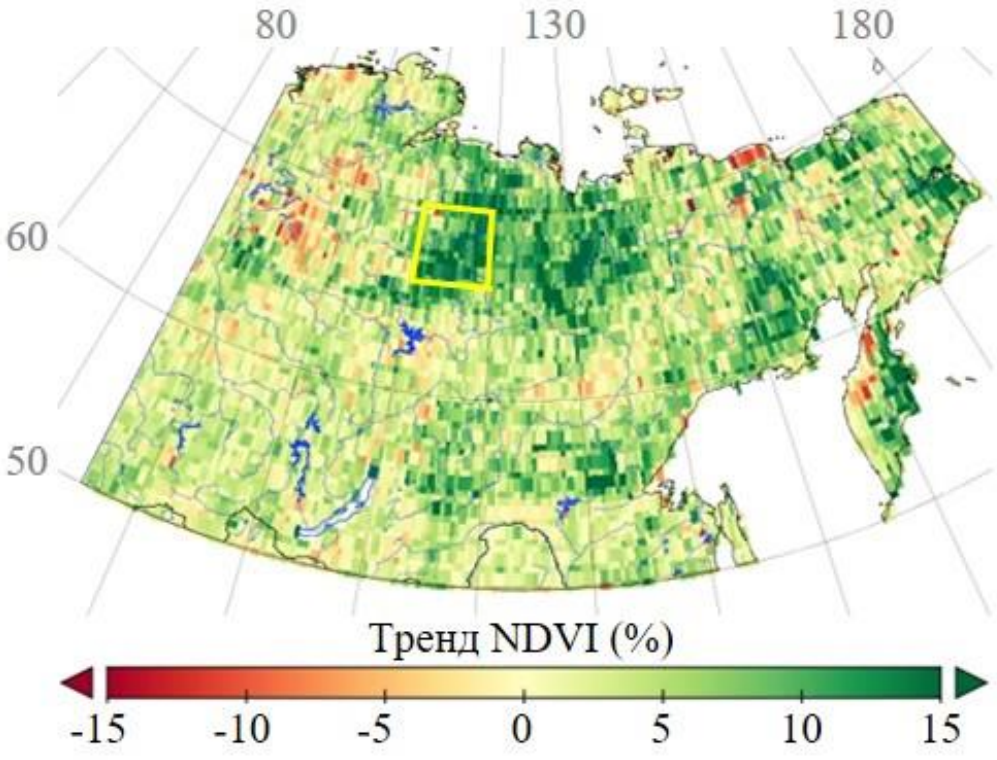


Рис. 1. Карта тренда сезонных (май – сентябрь) значений NDVI за период 1982–2015 гг., прямоугольником отмечен тестовый участок

На севере Якутии, где наблюдается высокие показатели тренда NDVI (~10–15 %), в зоне лесотундры был выбран тестовый участок (отмечен на рис. 1) с низменным рельефом, где произрастают хвойные листопадные леса в сочетании с кустарниковой тундрой. На основе ежедневных значений NDVI данных проекта LTDR были проведены расчеты фенологических сроков растительного покрова тестового участка – начало SOS (Start of Growing Season) и окончание EOS (End of Growing Season) вегетационного сезона.

Предварительно для устранения остаточного влияния возмущающих факторов (облачный покров, аппаратные шумы, случайные помехи и пр.) была проведена фильтрация и сглаживание ряда ежедневных значений NDVI с использованием алгоритма BISE [1] с размером скользящего окна 40 дней. Фенологические сроки начала SOS и окончания EOS вегетационного сезона рассчитывались методом «NDVI 0,3» [2]. Согласно данному методу SOS и EOS определялись по достижению порогового значения NDVI = 0,3. Метод «NDVI 0,3» по сравнению с другими описанными в работе [2] методами наиболее оптимален для исследуемого региона.

На рис. 2, *а* показаны вариации SOS и линейные тренды среднегодовой приземной температуры воздуха (рис. 2, *а*, *б*) тестового участка ($T_{уч}$) и северного полушария ($T_{СП}$) за период 1982–2017 гг. Из рис. 2, *а* видно, что SOS тестового участка имеет довольно изменчивый межгодовой характер, сроки SOS варьируют в пределах от одного до 30 дней в отдельные годы. Тем не менее SOS описывается выраженным отрицательным трендом в ~ –12 дней, что говорит о более раннем начале сезона вегетации. Напротив, EOS (рис. 2, *б*) имеет положительный тренд (~4 дня), что означает более позднее завершение сезона вегетации. Таким образом, наблюдается увеличение продолжительности сезона вегетации тестового участка, тренд которого составил ~16 дней. Отметим,

что за исследуемый период наблюдается тенденция роста (~0,9 °С) среднегодовой приземной температуры воздуха по всему Северному полушарию (рис. 2, *а*, *б*). При этом на тестовом участке наблюдается значительный рост тренда среднегодовой температуры воздуха на ~2,4 °С (рис. 2, *а*, *б*).

Анализ связи фенологических сроков тестового участка со среднегодовыми метеопараметрами (температура, осадки) показал, что между вариациями SOS и температурой отмечается отрицательная корреляция (R= –0,5), при этом связь EOS с температурой отсутствует. Анализ связи вариаций SOS и EOS со среднемесячными вариациями метеопараметров выявил антикорреляцию SOS с температурой мая (R= –0,7), т.е. чем выше температура воздуха в мае, тем раньше наступает SOS. Связь между фенологическими сроками и атмосферными осадками не наблюдается. Стоит отметить, что на фоне увеличения продолжительности сезона вегетации наблюдается и увеличение максимальных значений NDVI (рис. 3).

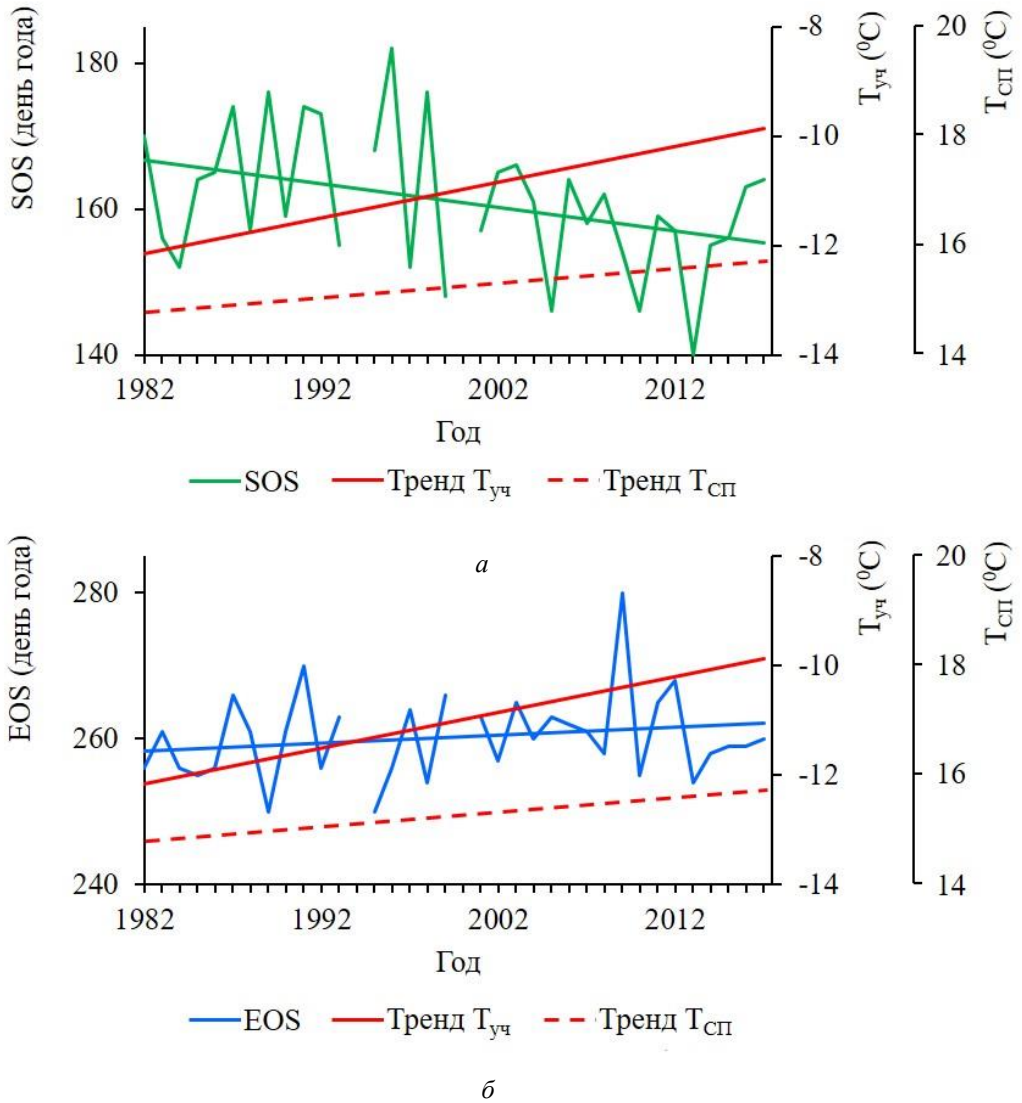


Рис. 2. Вариации фенологических сроков (SOS, EOS) вегетации и линейные тренды вариаций среднегодовой приземной температуры воздуха для тестового участка ($T_{уч}$), а также тренд температуры северного полушария ($T_{СП}$) за период 1982–2017 гг.: *а* – SOS, $T_{уч}$, $T_{СП}$; *б* – EOS, $T_{уч}$, $T_{СП}$

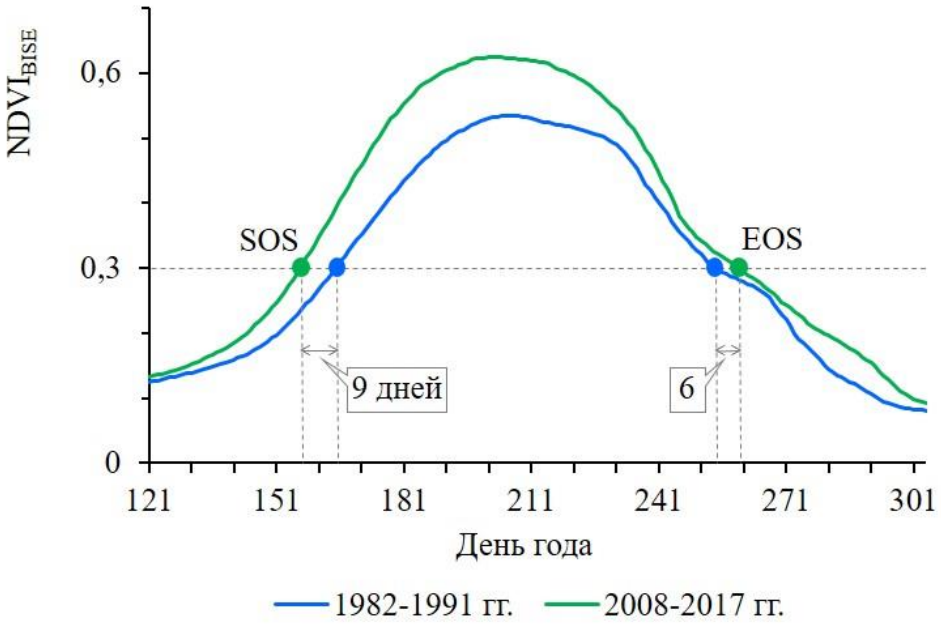


Рис. 3. Сезонный ход NDVIBISE растительности тестового участка, усредненный за 1982–1991 и 2008–2017 гг.

На рис. 3 приведены графики сезонного хода $NDVI_{BISE}$ тестового участка для периода 1982–1991 и 2008–2017 гг. Как видно из рис. 3, динамика сезонного хода $NDVI_{BISE}$ двух рассматриваемых десятилетий заметно отражает сдвиги фенологических сроков SOS и EOS сезона вегетации в течение исследуемого периода. В последнем десятилетии (2008–2017) начало сезона вегетации наступило на ~9 дней раньше, чем в первом десятилетии (1982–1991). А окончание сезона вегетации в последнем десятилетии наступило на ~6 дней позже, чем в первом. Таким образом, продолжительность сезона вегетации растительного покрова лесотундры на тестовом участке в 2008–2017 гг. увеличилась на ~15 дней по сравнению с 1982–1991 гг.

В 2008–2017 гг. также наблюдается увеличение максимальных значений $NDVI_{BISE}$, что может быть вызвано как увеличением биомассы растительности лесотундры, так и улучшением качества вегетации тестового участка. В максимуме сезона вегетации (июль) в 2008–2017 гг. значение $NDVI_{BISE}$ превысил значение $NDVI_{BISE}$ в 1982–1991 гг. на ~10 %.

Заключение. В целом за 1982–2015 гг. растительный покров на территории, представленной на рис. 1, демонстрирует положительный тренд со средним показателем NDVI ~4 %. На севере Якутии наблюдается локальная область с наиболее высокими показателями (~10–15 %) тренда NDVI, существенный вклад в который вносит рост майских значений NDVI, коррелирующий с ростом температуры воздуха.

В отмеченной области наблюдается тенденция более раннего наступления начала сезона вегетации (на ~12 дней) и более позднего его окончания (на ~4 дня), что привело к увеличению продолжительности сезона вегетации на ~16 дней.

Оценка связи изменений фенологических сроков с метеопараметрами показал хорошую связь вариаций SOS с температурой мая месяца (R = –0,7). Связи между изменениями фенологических сроков и атмосферными осадками не наблюдается.

Анализ сезонного хода $NDVI_{BISE}$ растительного покрова лесотундры за исследуемый период показал увеличение его максимальных значений в 2008–2017 гг. на ~10 % по сравнению с 1982–1991 гг.

Список литературы

1. Viovy N., Arino O., Belward A.S. The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series // International Journal of Remote Sensing. 1992. Vol. 13. P. 1585–1590. DOI: 10.1080/01431169208904212.

2. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 / M.A. White, K.M. De Beurs, K. Didan [et al.] // Global Change Biology. 2009. Vol. 15. P. 2335–2359. DOI:10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x.

3. Satellite monitoring of boreal forest phenology and its climatic responses in Eurasia / Haibo Li, Cuizhen Wang, Lijuan Zhang, Xiaxiang Li & Shuying Zang // International Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 38, № 19. P. 5446–5463. DOI: 10.1080/01431161.2017.1339925.

4. Lanhui Wang, Rasmus Fensholt. Temporal Changes in Coupled Vegetation Phenology and Productivity are Biome-Specific in the Northern Hemisphere // Remote Sensing. 2017. № 9. P. 1277. DOI: 10.3390/rs9121277.

5. Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century / P. Frich, L.V. Alexander, P. Della-Marta [et al.] // Climate Research. 2002. Vol. 19, № 3. P. 193–212.

6. Spatial and Temporal Changes in Vegetation Phenology at Middle and High Latitudes of the Northern Hemisphere over the Past Three Decades / J. Zhao, H. Zhang, Z. Zhang [et al.] // Remote Sensing. 2015. № 7. P. 10973–10995.

7. Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS instruments / J. Pedelty, S. Devadiga, E. Masuoka [et al.] // Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona. Spain. 23–28 July 2007. P. 1021–1025.

8. Pinzon J.E, Tucker C.J. A Non-Stationary 1981-2012 AVHRR NDVI3g Time Series // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. P. 6929-6960.

9. Harris I.C., Jones P.D. University of East Anglia Climatic Research Unit, CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901 – Dec. 2016). Centre for Environmental Data Analysis. 4 December 2017. DOI: 10.5285/58a8802721c94c66ae45c3baa4d814d0.

10. A new Spot4-vegetation derived land cover map of northern Eurasia / S.A. Bartalev, A.S. Belward, D.V. Erchov, A.S. Isaev // International Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 24, № 9. P. 1977–1982.

11. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Особенности многолетней динамики индекса NDVI растительности Восточной Сибири на фоне потепления климата / Геонауки: проблемы, достижения и перспективы развития: материалы Всерос. молодеж. науч.-практ. конф., 27–28 апреля 2018 г. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2018. С. 56–59.

12. Varlamova E.V., Solovyev V.S. Study of NDVI vegetation index in East Siberia under global warming // Proceedings of SPIE on 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2016. V. 10035. P. 100355K. DOI: 10.1117/12.2248092.

13. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование трендов NDVI и фенологических параметров растительности мерзлотного региона Сибири по спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 206–214.

УДК 551.551, 551.501.8

Т.Ф. Газимов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия, e-mail: tf.gazimov@gmail.com

ДИАГНОЗ ЗОН ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрен пример использования спутниковой информации для диагноза зон атмосферной турбулентности в районе аэродрома Томск. Проанализированы случаи с болтанкой самолетов по данным бортовой погоды, рассмотрены годовой ход дней с болтанкой, распределение в зависимости от интенсивности, а также метеорологические и синоптические условия формирования турбулентных зон, вызвавших сильную болтанку воздушных судов.

Ключевые слова: турбулентность, аэродром Томск, ИСЗ, спектрорадиометр MODIS, Terra, Aqua, оптическая толщина облаков.

Одним из наиболее опасных метеорологических явлений, которые оказывают влияние на авиасообщение, является атмосферная турбулентность, вызывающая болтанку воздушного судна. Так, попадание самолета в зону сильной турбулентности может явиться причиной серьезных авиационных происшествий, вплоть до катастроф.

Вследствие этого появляется необходимость в наиболее качественном диагнозе и прогнозе зон с возможной болтанкой. Возникающие трудности связаны с неравномерностью сети наблюдений и в частности несовершенства температурно-ветрового зондирования атмосферы. Добиться улучшения качества прогноза можно с помощью комплексного анализа синоптических ситуаций с применением информации, получаемой с искусственных спутников земли (ИСЗ).

Для анализа турбулентности при наличии облачности, а также в зоне атмосферных фронтов наиболее информативными являются данные об оптической толщине облачности (cloud optical thickness – COT), которая является продуктом спектрорадиометра MODIS с космических аппаратов (КА) Terra и Aqua. Лучше всего восстановить значения COT удается при одновременном измерении функции отражения в непоглащающем и поглощающем спектральном канале (ближний и коротковолновый инфракрасный каналы), а затем сравнения полученных результатов с теоретическими модельными расчетами [1]. Чем выше значения оптической толщины, тем мощнее облачность. Фактически значения оптической толщины изменяется от 0 до 100 и является безразмерной величиной. Самым высоким значениям соответствуют мощные кучевые облака.

Атмосфера практически всегда находится в турбулентном состоянии. Однако интенсивность атмосферной турбулентности сильно изменяется во времени и в пространстве. Обычно вне пограничного слоя атмосферы воздушный поток является слабо возмущенным и только в отдельных слоях или целых зонах наблюдается усиленное перемешивание воздуха. Основными причинами турбулизации воздушных течений в атмосфере являются возникающие по тем или иным причинам контрасты в полях температуры и скорости ветра [2].

Цель работы заключается в комплексном анализе случаев болтанки воздушных судов: анализ годового хода случаев болтанки, оценка синоптических условий с использованием синоптических карт и облачных продуктов MODIS Atmosphere.

© Газимов Т.Ф., 2018

Информационной базой послужили данные о случаях болтанки воздушных судов по данным бортовой погоды с АМСГ Томск за 2012–2017 гг. [3], продукты спектрорадиометра MODIS с КА Terra и Aqua, а также синоптические карты [4; 5].

Рассмотрим число дней с турбулентностью за исследуемый период (таблица). Исследование показало, что за рассмотренный период турбулентность в районе аэродрома Томск наблюдалась в течение 212 дней. Оценивая годовой ход данного явления, следует отметить, что наиболее часто турбулентность наблюдается в весенний период, а также с ноября по январь, с максимумом за 6 лет в декабре (36 дней – 17 %).

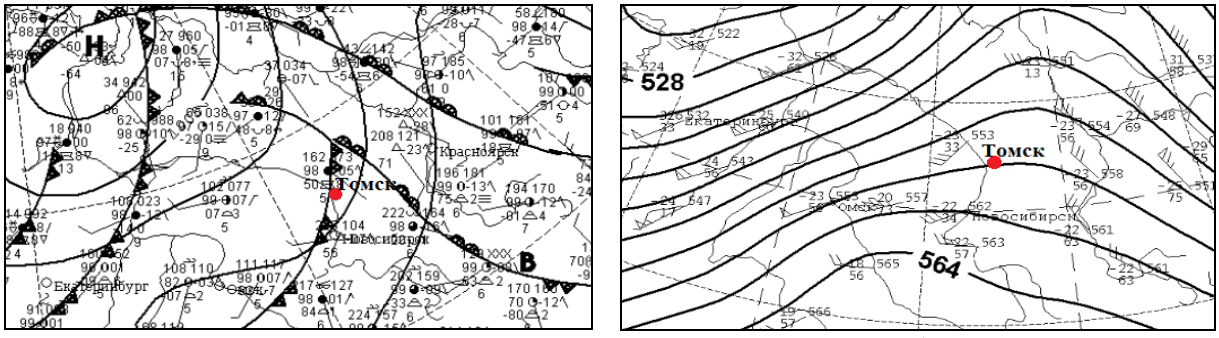
Таблица

Число дней с турбулентностью в период с 2012-2017 гг.

Год	Месяцы												Σ
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2012	1	–	7	7	11	1	2	1	2	–	3	3	38
2013	6	6	5	5	6	1	2		1	1	1	8	42
2014	2	–	15	6	6	-	–	1	2	5	3	8	48
2015	4	–	–	2	4	3	–	–	3	2	3	3	24
2016	3	–	3	–	1	1	1	–	–	–	2	12	23
2017	6	8	4	6	5	–	–	2	3	–	1	2	37
Σ	22	14	34	26	33	6	5	4	11	8	13	36	212

В ранее выполненной работе [6] был проведен анализ случаев болтанки ВС в зависимости от интенсивности (за 2012–2016 гг.), который показал по данным бортовых сообщений преобладание случаев болтанки умеренной интенсивности (97 %). Болтанка слабой и сильной интенсивности была зафиксирована на 4-й и 1-й день соответственно (из 175 дней). Сильная болтанка наблюдалась 22 апреля 2015 г., ее продолжительность составила 3 ч. В 2017 г. был зафиксирован еще один случай сильной болтанки, который наблюдался 28 декабря 2017 г. (продолжительность – 1 ч и 22 мин). Рассмотрим данные случаи комплексно с применением синоптической и спутниковой информации.

На рис. 1 приведены фрагменты приземной карты за 06 ВСВ 22.04.15 и карта АТ-500 за 00 ВСВ 22.04.15. На высотных картах барической топографии вплоть до уровня АТ-300 Томск находился в области высотного гребня в зоне расходимости изогипс. Такое барическое поле способствует образованию атмосферной турбулентности.



а *б*

Рис. 1. Фрагменты приземной карты 06:00 UTC (*а*)
и высотной карты АТ-500 00:00 UTC (*б*) за 22.04.2015

В приземном слое Томск находился в барической ложбине и под влиянием циклона. Данному циклону соответствовало сразу несколько атмосферных фронтов, а в момент фиксирования болтанки через Томск проходил холодный фронт. Данный фронт давал осадки в виде снега на протяжении всего времени, когда регистрировалась бол-

танка. Приземный циклон, представленный на рис. 1, *а*, также хорошо прослеживается и на спутниковой информации, полученной с КА Terra (рис. 2) за 22.04.15.

Облачное поле соответствует атмосферным фронтам и легко идентифицируются. На холодном фронте значения COT достигают значений, равным 100, что соответствует мошной кучевой облачности. Район аэродрома Томск в момент пролета над ним космического аппарата (04:55 UTC) находился в теплом секторе циклона, но в дальнейшем окажется под влиянием холодного фронта и конвективной облачности, которая, вероятно, и стала причиной болтанки.

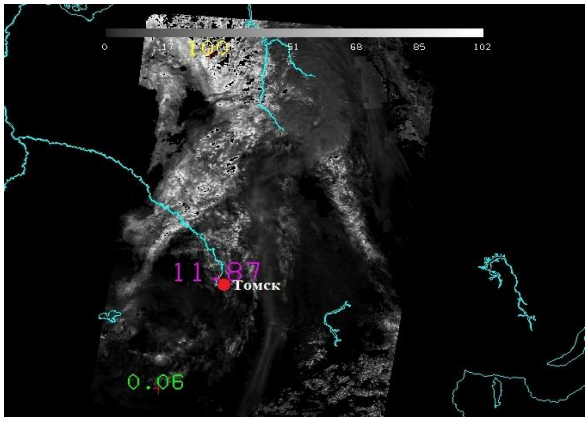


Рис. 2. Облачные продукты MODIS: КА Terra, время пролета – 04:55 UTC 22.04.2015

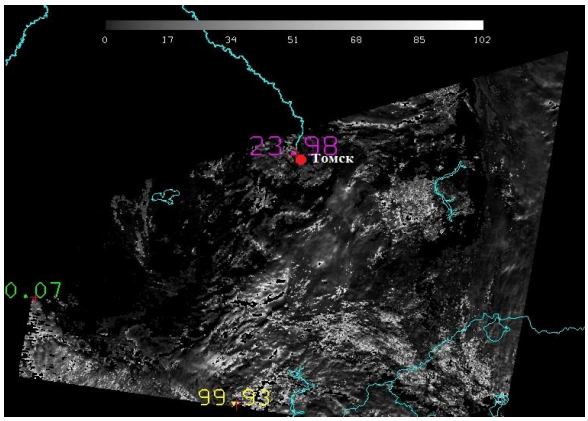


Рис. 3. Облачные продукты MODIS: КА Terra, время пролета – 05:15 UTC 28.12.2017

На рис. 3 приведен второй случай сильной болтанки, отмечавшейся 28 декабря 2017 г. Согласно данным об оптической толщине облачности, в районе Томска наблюдалась маломощная облачность в виде отдельных редких скоплений облаков. Основываясь на данных, полученных из дневников погоды с АМСГ Томск, можно говорить о том, что это было кучево-дождевая и слоисто-кучевая облачность. Из кучево-дождевой облачности выпадали осадки в виде ливневого снега различной интенсивности, а также наблюдался снежный поземок. По данным бортовой погоды болтанка наблюдалась при посадке в слое 1500/100 м, что говорит о том, что наиболее вероятно болтанка связана также с кучево-дождевой облачностью. При наличии облачности вертикального развития на эшелоне полета повторяемость болтанки самолетов составляет 90–95 %. Самая сильная болтанка – в растущих Cb (calvus – лысые), так как сильные восходящие движения (до 40 м/с), особенно в центре облака, на втором месте по опасности – Cb (capillatus incus – волосатые с наковальней). Так, за рассмотренный период кучево-дождевая облачность наблюдалась в 80 % дней с турбулентностью.

Таким образом, спутниковая информация позволяет получить большее количество информации высокого пространственного разрешения о ситуации, способствующей развитию атмосферную турбулентности, которая влечет за собой болтанку воздушного судна. Так, например, можно получить сведения о состоянии атмосферы между метеорологическими сроками, а также дополнительную информацию об облачности.

Список литературы

1. Cloud Optical Properties Algorithm. URL: https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/products/cloud/algorithm-overview.

2. Пинус Н.З., Шметер С.М. Атмосферная турбулентность, вызывающая болтанку самолетов. М.: Гидрометеоиздат, 1962. 166 с.

3. Дневник погоды АВ-6, АМСГ Томск. 2012–2016 гг.

4. Синоптические бюллетени Северного полушария. Ч. 1. Электронные данные. М., Гидрометцентр России. 2006–2015.

5. MODIS Atmosphere Cloud Product site. URL: https://modis-atmosphere.gsfc.nasa.gov/products/cloud.

6. Газимов Т.Ф., Волкова М.А. Характеристика турбулентности на аэродроме Томск // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2018.

УДК 004.9:528:622

О.С. Герасимова, Е.Л. Счастливцев, О.Л. Гиниятуллина

Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемерово, Россия
e-mail: gos-kem@mail.ru

УЧЕТ И ОЦЕНКА ТЕРРИТОРИЙ ХРАНЕНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрена проблема ведения непрерывного мониторинга за состоянием территорий хранения отходов. Проанализированы существующие методы контроля негативного воздействия указанных территорий на окружающую среду. Предложен метод мониторинга и выявления изменений на территориях хранения отходов при помощи данных дистанционного зондирования Земли и последующее создание необходимой информационной системы.

Ключевые слова: отходы, данные дистанционного зондирования, экологический мониторинг, спектральные библиотеки.

Кемеровская область является крупнейшим угледобывающим регионом страны. Высокие объемы добычи приводят к серьезным последствиям, связанным с ухудшением экологического состояния региона в целом, обусловленного высокими техногенными нагрузками на окружающую среду. Большое количество отходов, производимых в подавляющем большинстве угледобывающей промышленностью, оказывает существенное воздействие на экологию региона. Места размещения отходов производства сосредоточены вблизи крупных муниципальных образований Кемеровской области – такое расположение приводит к негативному воздействию не только на окружающую среду, но и на санитарно-эпидемиологическое благополучие человека.

Экономическая специфика региона приводит к пропорциональному росту количества объектов размещения отходов, таких как отвалы породы, хвостохранилища, отстойники карьерных вод. Кемеровская область входит в тройку субъектов страны по количеству зарегистрированных объектов в государственном реестре объектов размещения отходов (более 400 по состоянию на начало 2018 г.) [1]. В связи с этим становится актуальной задача создания системы, которая будет осуществлять учет и непрерывный мониторинг территорий хранения отходов угледобывающих предприятий и давать оценку негативного воздействия на окружающую среду с целью последующего принятия необходимых управленческих решений.

© Герасимова О.С., Счастливцев Е.Л., Гиниятуллина О.Л., 2018

Постоянный наземный мониторинг затруднен сложностью физического доступа к удаленным территориям хранения отходов и высокой стоимостью лабораторных исследований; кроме того, эксплуатирующие объекты размещения отходов собственники обязаны предоставлять сведения в контролирующие органы раз в год [2], что не позволяет вовремя увидеть и устранить негативные изменения качества окружающей среды. Существующие на данный момент информационные системы мониторинга объектов размещения отходов имеют ряд недостатков: неполное отображение пространственных данных о территориях хранения отходов (отсутствие границ территорий), учет только полигонов твердых коммунальных отходов, невозможность мониторинга состояния отходов на объектах.

В рамках создания информационной системы учета и мониторинга территорий хранения отходов угледобывающих предприятий сформирована база данных территорий отходов Кемеровской области. При обработке данных государственного реестра объектов размещения отходов отмечено, что периодически сведения дублируются или не содержат достаточной информации для идентификации объектов, в связи с чем, ведется работа по устранению данных недостатков.

Дистанционный мониторинг мест хранения отходов основывается на применении созданной спектральной библиотеки объектов отходов, которая содержит кривые отраженного излучения каждого типа объектов. Это позволяет идентифицировать объекты на снимках и отслеживать изменения в их состоянии.

Спектральная библиотека территорий хранения отходов создана на основе мультиспектральных снимков, полученных спутниками дистанционного зондирования. Среди них Landsat-8 (ввиду нахождения в свободном доступе большого количества снимков, публикуемых с небольшим временным интервалом), Канопус-В и Ресурс-П (предоставляются бесплатно субъектам РФ на основе заявок). Следует отметить, что снимки, получаемые с российских космических аппаратов, требуют геометрической коррекции и имеют большой временной интервал съемки. Это затрудняет их использование в целях построения адекватной модели поведения изучаемых территорий, учитывающей изменения на территориях объектов размещения отходов и их негативное воздействие на окружающую среду.

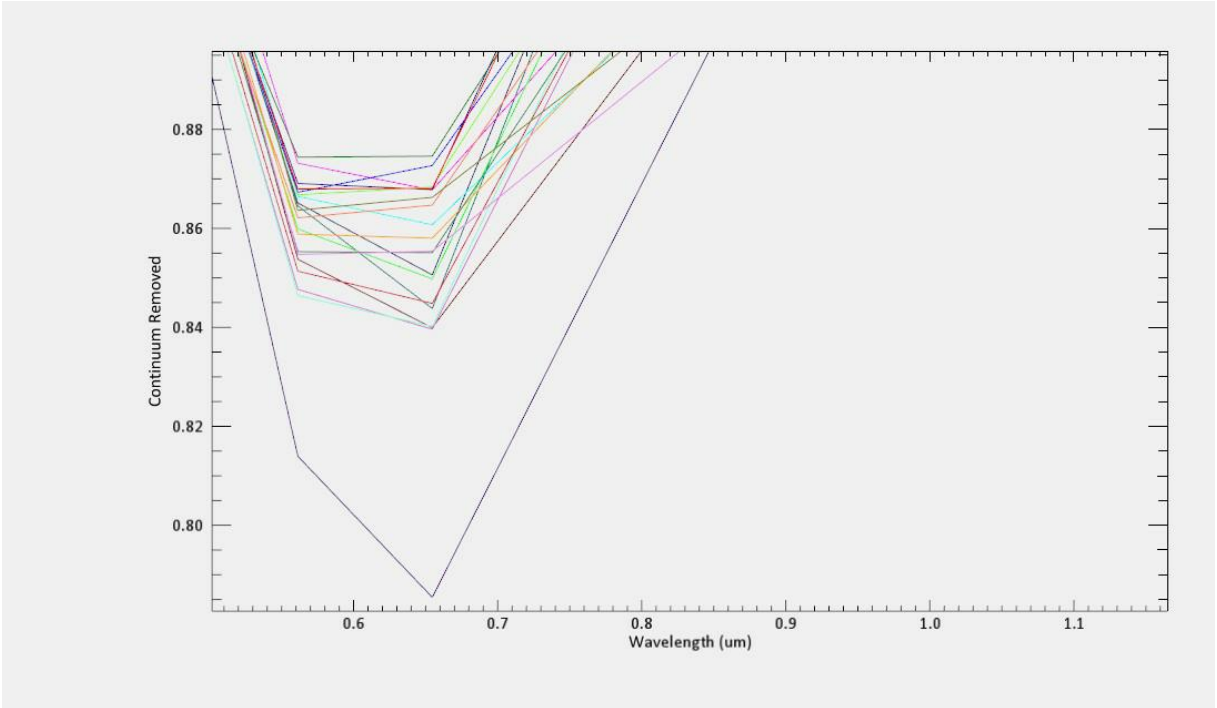


Рисунок. Спектральные кривые

Приведем пример исследования территории хранения отходов. На основе созданной спектральной библиотеки проведен временной анализ одного из объектов размещения отходов (породный отвал). Для исследований принят бесснежный период 2014–2017 гг. Полученное множество точек принимает близкие значения, однако в один из периодов (сентябрь 2016 г.) спектральная кривая имеет значительные отклонения. Такое поведение может служить сигналом изменения состояния отходов на территории полигона, что является основанием для контроля негативного воздействия данной территории. Спектральные кривые указанной территории, полученные на основании анализа космических снимков Landsat-8, представлены на рисунке.

На основании полученных данных можно говорить об эффективности применения данных дистанционного зондирования для непрерывного мониторинга территорий хранения отходов. В рамках разрабатываемой системы ведется автоматизация анализа территорий на основании получаемых спектральных библиотек, формируемых в соответствии с типом отходов территорий, способом хранения и даты ввода объекта в эксплуатацию. Непрерывная оценка состояния объектов хранения отходов поможет выявить проблемные территории и принять необходимые меры для устранения нарушений и последующего снижения техногенной нагрузки с целью рационального природопользования.

Список литературы

1. Территориальная схема обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Кемеровской области // Департамент природных ресурсов и экологии Кемеровской области: сайт. URL: http://kuzbasseco.ru/?page_id=73.

2. Положение о государственном экологическом мониторинге (государственном мониторинге окружающей среды) и государственном фонде данных государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды): утв. Пост. Правительства РФ от 09.08.2013 № 681: в ред. Пост. Правительства РФ от 10.07.2014. № 639 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: http://www.pravo.gov.ru. – 2013.

3. Documentation Center // Harris Geospatial Solutions. URL: https://www.harrisgeospatial.com/docs/home.html.

4. Папуловская Н.В., Бадьина Т.А., Бадьин И.Д. Роль геоинформационных технологий в современном экологическом образовании // Фундаментальные исследования. 2014. № 9–8. С. 1849–1853.

5. Алябьева Г.Н., Фахрина М.В. Антропогенное воздействие на природный потенциал Кемеровской области // Современные наукоемкие технологии. 2008. № 2. С. 83–87.

6. Батракова Г.М., Ивенских О.В., Пономарчук А.И. Применение дистанционного зондирования земли для экологической оценки территорий складирования отходов // Вестн. Перм. нац. исслед. политех. ун-та. Серия «Урбанистика». 2012. № 4. С. 73–84.

УДК 004.9:528:622

О.Л. Гиниятуллина, А.А. Быков

Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемерово, Россия
e-mail: skiporol@mail.ru

ОЦЕНКА ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрена проблема мониторинга выбросов угледобывающих предприятий по данным дистанционного зондирования. Приведен подход к обработке космических снимков объектно-ориентированным алгоритмом выделения сегментов загрязнения снежного покрова как индикатора распространения пыли от источников загрязнения в комплексе с расчетными значениями модели распространения выбросов. Предложенный подход позволяет перейти от расчетных значений к визуальной интерпретации в виде тематических карт.

Ключевые слова: пылевое загрязнение, объектно-ориентированный алгоритм, сегменты.

Современные темпы добычи полезных ископаемых, особенно угля, приводят к серьезным ухудшениям экологического состояния регионов страны. Особенно серьезные изменения в состоянии атмосферного воздуха испытывают районы с добычей угля открытым способом, где пылевая нагрузка увеличивается в десятки, а то и сотни раз. Согласно данным [1], общая масса выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников Кемеровской области в 2015 г. составила 1 344,459 тыс. т. Особенно сильное воздействие оказывают предприятия по добыче полезных ископаемых (61,1 %), обрабатывающие производства (20,1 %), предприятия по производству и распределению электроэнергии, газа и воды (16,7 %). Основная масса выбросов о области в целом приходится на газообразные и жидкие вещества (90,4 %), твердые вещества составляют 9,6 %. Самая высокая антропогенная нагрузка наблюдается в Новокузнецком районе – 5 005 кг/чел., в Беловском районе – 2033 кг/чел., Прокопьевском районе – 2786 кг/чел., Ленинск-Кузнецком районе – 2 741 кг/чел. Эти районы являются основными кластерами по добыче угля в Кузбассе. Общая динамика выбросов за последние годы представлена на рис. 1.

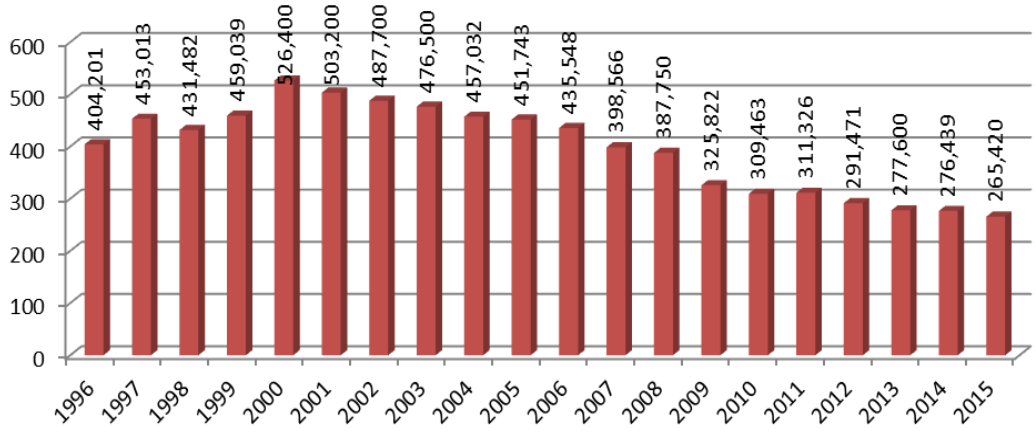


Рис. 1. Показатели выбросов в Кемеровской области, тыс. т

© Гиниятуллина О.Л., Быков А.А., 2018

Как видно из рис. 1, имеется устойчивая тенденция снижения уровня выбросов, однако до сих пор данные показателя являются достаточно высокими и требуют принятия эффективных управляющих решений для их локализации. Другая важная проблема, возникающая в настоящее время, заключается в том, что границы угольных разрезов передвигаются напрямую к жилым застройкам поселков и городов. Вследствие этого зоны распространения загрязняющих веществ также сдвигаются, и их воздействие на человека становится более заметным. В связи с этим важно производить постоянный мониторинг возникновения подобных зон пыления и производит оценку их характера. В [2] авторами рассмотрены различные системы мониторинга состояния атмосферы (инструментальный, расчетный, дистанционный), сформулирован принципиально новый подход к решению данной задачи с использованием комбинации указанных методов. В предложенном подходе главное место уделяется использованию данных дистанционного зондирования в качестве основного источника информации о состоянии атмосферы региона.

Ранее авторы для выделения пылевых выбросов использовали обработку мультиспектральных данных со спутника Landsat-7 алгоритмами расчета индекса снега NDSI (нормализованный дифференциальный индекс снега) [3]. Применение данного индекса дает устойчивое пятно распространения пылевых частиц на снеге, однако провести градации внутри пятна на отдельные показатели достаточно сложно. В связи с этим предложен новый подход к обработке космоснимков со спутника Sentinel-2a, которые относятся к классу гиперспектральных снимков и обладают большей информативностью. Предлагается использовать объектно-ориентированные методы обработки изображений (Future extraction method). При обработке снимков мы ориентируемся на закон распространения загрязняющих веществ [4], согласно которому наибольшее количество частиц выпадает непосредственно у источника выброса и с увеличением дистанции происходит резкое уменьшение концентраций (рис. 2).

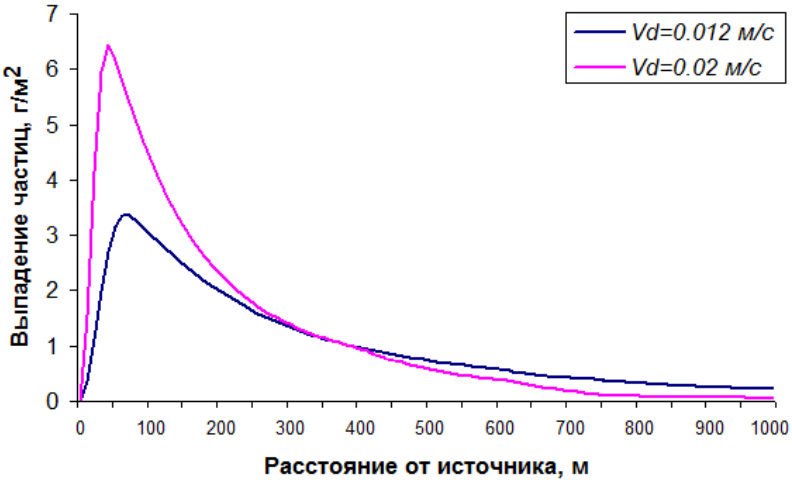
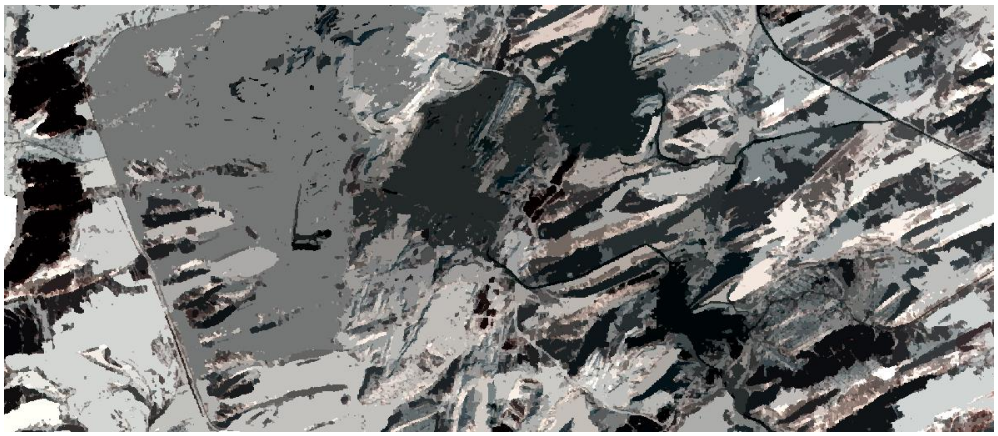


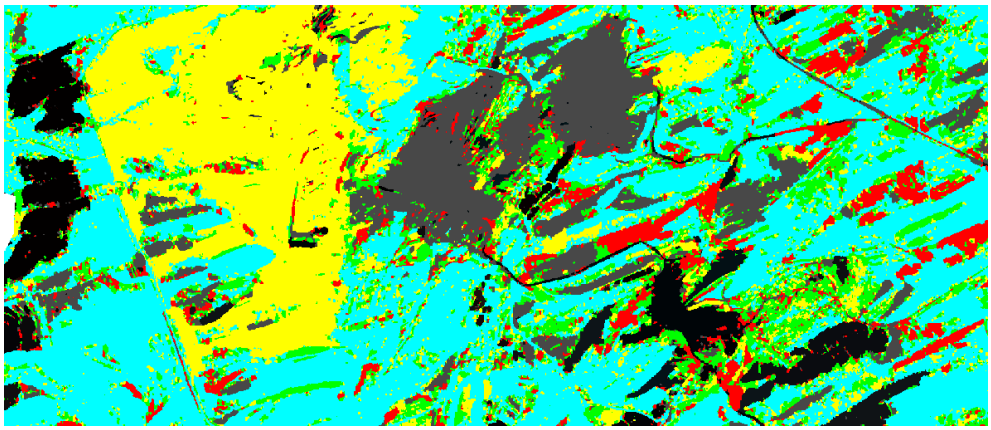
Рис. 2. Изменение выпадения частиц за зимний период с различной скоростью *Vd* от источника высотой 10 м с постоянным выбросом 1 г/с

Таким образом, необходимо выделить на космоснимках сегменты, в которые значение спектральной отражательной яркости имеет условно среднее значение. Предложено использовать объектно-ориентированный алгоритм выделения сегментов с использованием полного списка значений λ (длины волны) и определения границы сегмента при изменении интенсивности в любом спектральном канале. Следует особенно отметить, что данный алгоритм позволяет учитывать все каналы изображения, в то время как индекс NDSI работает только с красным и инфракрасным каналами. В результате работы алгоритма получено сегментированное изображение поверхности

снежного покрытия (рис. 3), причем интенсивность отражения снега внутри сегментов (рис. 4) при удалении от источника загрязнения существенно возрастает, что согласуется с законом переноса примесей (рис. 2).



а



б

Рис. 3. Выделение сегментов снежного покрытия на снимке: *а* – результат работы алгоритма; *б* – классификация полученных сегментов по степени интенсивности внутри сегмента

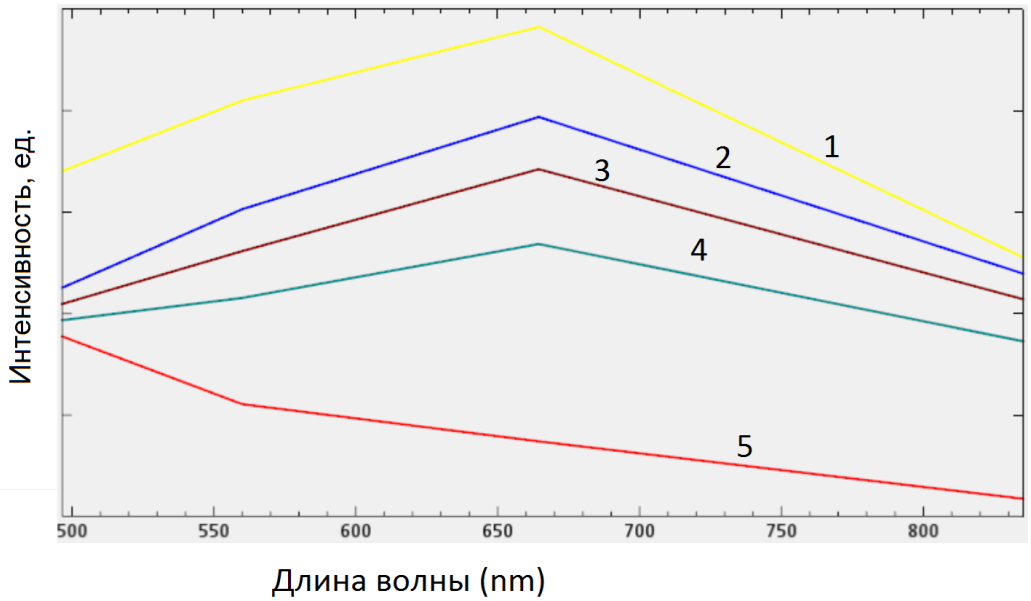


Рис. 4. Спектральная отражательная способность снега в выделенных сегментах изображения (обозначения и цвета линий соответствуют уровням загрязнения 1–5 г/м^2)

На полученные результаты обработки снимков были наложены расчетные данные распространения пылевого загрязнения из программного комплекса ЭРА (www.logos-plus.ru). В результате совмещения данных получены спектральные кривые интенсивности пылевого загрязнения снега, которые соответствуют нормативным показателям – 1–5 г/м^3 (рис. 4). Причем следует отметить тот факт, что при наложении на результаты обработки снимков, которые отражают фактическую картину распространения, расчетных изолиний распространения выбросов, были обнаружены новые источники выбросов, которые не учитывались в модели, что привело к актуализации соответствующей базы данных. Также необходимо отметить, что результаты обработки были подтверждены исследованием проб снега в данном районе.

Таким образом, в настоящее время разработан принципиально новый подход к обработке оптических снимков за зимний период, позволяющий получать расчетные значения выбросов угледобывающих предприятий. Полученные на его основе тематические продукты обеспечивают проведение мониторинга пылевой нагрузки региона с высоким техногенным воздействием по всей площади, а не только в точках наземного контроля.

Список литературы

1. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2015 году г. Кемерово. Кемерово: Департамент природных ресурсов и экологии Кемеровской области, 2015. 211 с.

2. Комплексный мониторинг техногенной нагрузки на атмосферу горнопромышленного региона / В.Н. Опарин, В.П. Потапов, О.Л. Гиниятуллина [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 5. С. 162–171.

3. Оценка пылевого загрязнения атмосферы угледобывающих районов Кузбасса в зимний период по данным дистанционного зондирования Земли / В.Н. Опарин, В.П. Потапов, О.Л. Гиниятуллина [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 3. С. 126–137.

4. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). СПб.: ГГО им. А.И.Воейкова, 2005.

УДК 004.9:528:622

О.Л. Гиниятуллина, Е.Л. Счастливцев, В.А. Ковалев

Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемерово, Россия,
e-mail: skiporol@mail.ru

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ЗАДАЧАХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО РАЙОНА

Приводится опыт решения задач геоэкологического мониторинга угледобывающего региона с использованием данных дистанционного зондирования. Показаны результаты контроля границ угледобывающих предприятий, оценки степени самозарастания отвалов, мониторинга состояния растительности вблизи объектов угледобычи и пылевой нагрузки района.

Ключевые слова: космоснимки, геоэкологический мониторинг, вегетационные индексы, объектно-ориентированные алгоритмы.

Современное состояние окружающей среды в регионах с высоким антропогенным воздействием требует постоянного контроля со стороны специальных служб и приме-

© Гиниятуллина О.Л., Счастливцев Е.Л., Ковалев В.А., 2018

нения активных инструментов экологического мониторинга. Особенно остро данная проблема стоит в угледобывающих районах, где в результате добычи полезных ископаемых происходят кардинальные изменения структур земель, ландшафтов, водной среды, биологических сообществ и т.п. Классические методы оценки качества окружающей среды, например, отбор проб и их анализ в лаборатории, дают характеристики объектов только в конкретной точке, в то время как реальные изменения могу захватывать большие по протяженности территории, которые могут намного превосходить санитарные зоны предприятий добычи. Применение данных дистанционного зондирования для решения ряда задач геоэкологического мониторинга позволяет оценивать состояние территорий региона в целом. Следует отметить, что при этом данные лабораторных исследований проб становятся авторитетным источником подтверждения результатов обработки космоснимков, обеспечивая тем самым их высокую достоверность.

В Кемеровском филиале ИВТ СО РАН более 10 лет разрабатываются новые подходы к решению задач геоэкологического мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования. В данной статье приводятся наиболее успешные разработки, которые применяются в работе ряда угледобывающих предприятий Кузбасса. В общем случае мониторинг проводится по четырем направлениям:

- определение границ нарушенных земель;
- мониторинг процесса рекультивации/восстановления земель;
- оценка состояния биомассы на территории объекта и за пределами его санитарной зоны;
- получение зон пылевой нагрузки.

Приведем примеры решения подобных задач из каждого направления.

Одной из актуальных задач является контроль границ лицензионных участков добычи угля, или так называемая «проблема черных копателей». Нарушение официальных границ приводит к огромным денежным потерям в бюджете области. В данном случает решение вопроса сводится к выделению границ исследуемого объекта на снимках высокого разрешения (например, данные Sentinel-2A разрешения 10 м/пикс) и соотнесении их с официальными границами лицензионных участков с использованием стандартных ГИС-методов (рис. 1).

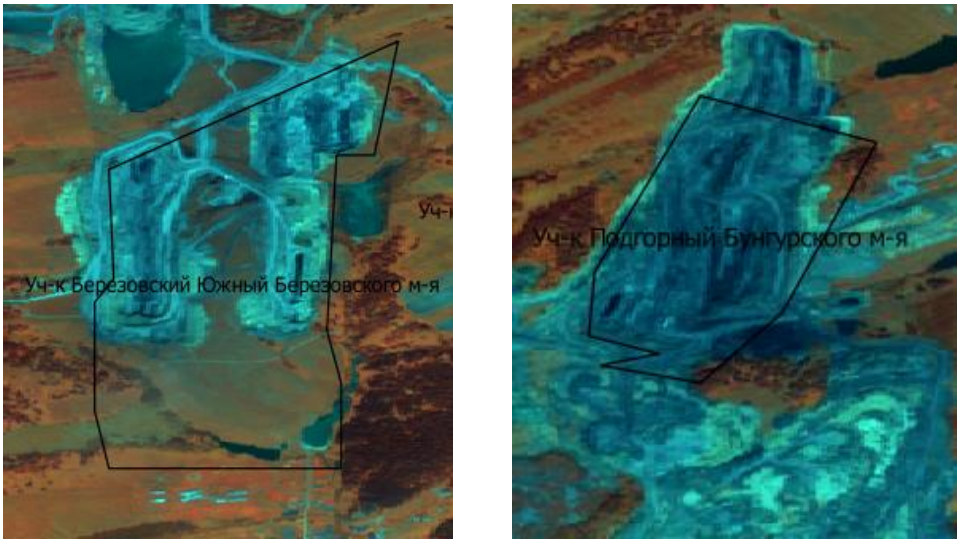
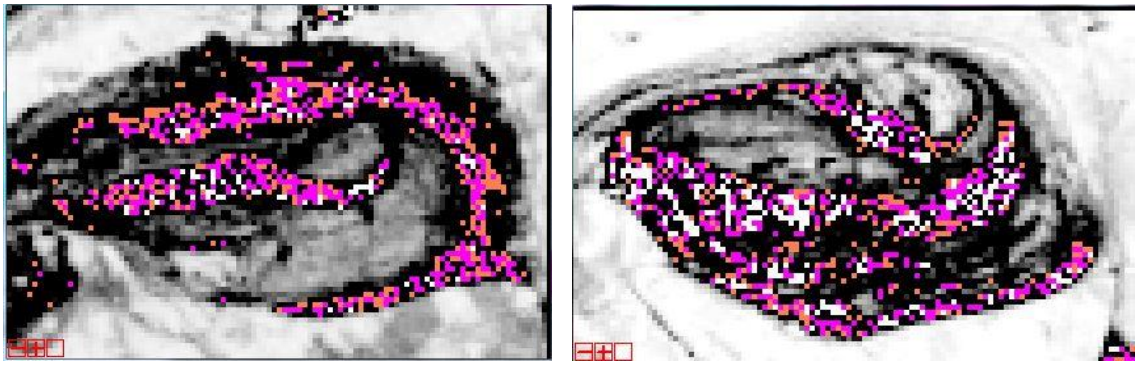


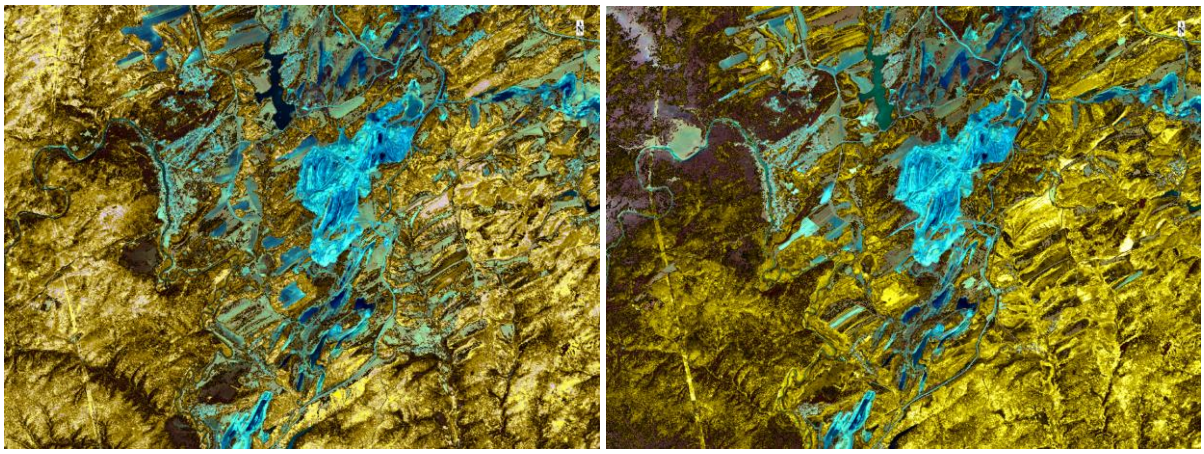
Рис. 1. Контроль границ угледобывающего предприятия
(черная линия – граница лицензионного участка)

Довольно сложным является вопрос мониторинга процесса рекультивации земель после добычи угля. Более подробно решение данной задачи описано авторами в [1]. Предложенная методика базируется на обработке ряда снимков за несколько лет почвенным индексом SAVI, позволяет получать изменения состояния биомассы, причем фиксировать ее даже в минимальных количествах, что характерно для процессов самозарастания. С 1992 по 2010 г. зафиксировано изменение индексов с –0,25 до 0,05, что свидетельствует о появлении биомассы на поверхности. На рис. 2 приводится пример мониторинга отвала разреза Бачатский (Кемеровская область).

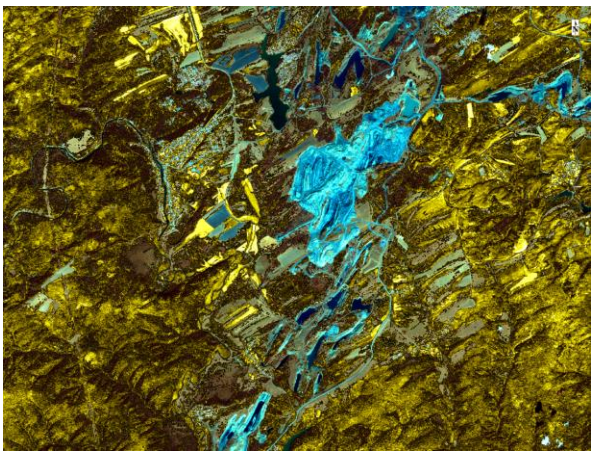


1992 2010

Рис. 2. Результаты расчета почвенного вегетационного индекса SAVI



04.06.2016 14.07.2016



30.08.2016

Рис. 3. Результаты расчета комбинации индексов NDVI, SRI и ARI

Как видно из рис. 2, формирование отвала шло снизу вверх, а к 2010 г. наблюдался активный процесс самозарастания южной стороны отвала.

Довольно распространенной является задача оценки биомассы по космоснимкам на основе использования вегетационных индексов [2]. В настоящее время имеется более 160 различных вегетационных индексов. Наиболее распространенным считается NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). В ходе исследований применимости различных индексов для оценки состояния растительности угледобывающих регионов предложено использовать комбинацию таких индексов, как NDVI, Simple Ratio Index (SRI) и Anthocyanin Reflectance Index (ARI). Если первые два индекса ориентированы на выделение биомассы в целом, то третий индекс улавливает интенсивность антоцианов в листьях. Получены интегрированные карты растительности на основе совместной обработки индексов (рис. 3).

Согласно официально принятой градации нормальное состояние растительности оценивается в желто-зеленых тонах, чему соответствует и биомасса района. Наличие коричневых оттенков говорит об ослаблении роста растительности. Однако, поскольку 2016 г. был очень засушливый, то довольно большое наличие данного цвета объясняется естественными природными причинами, а не влиянием угледобычи.

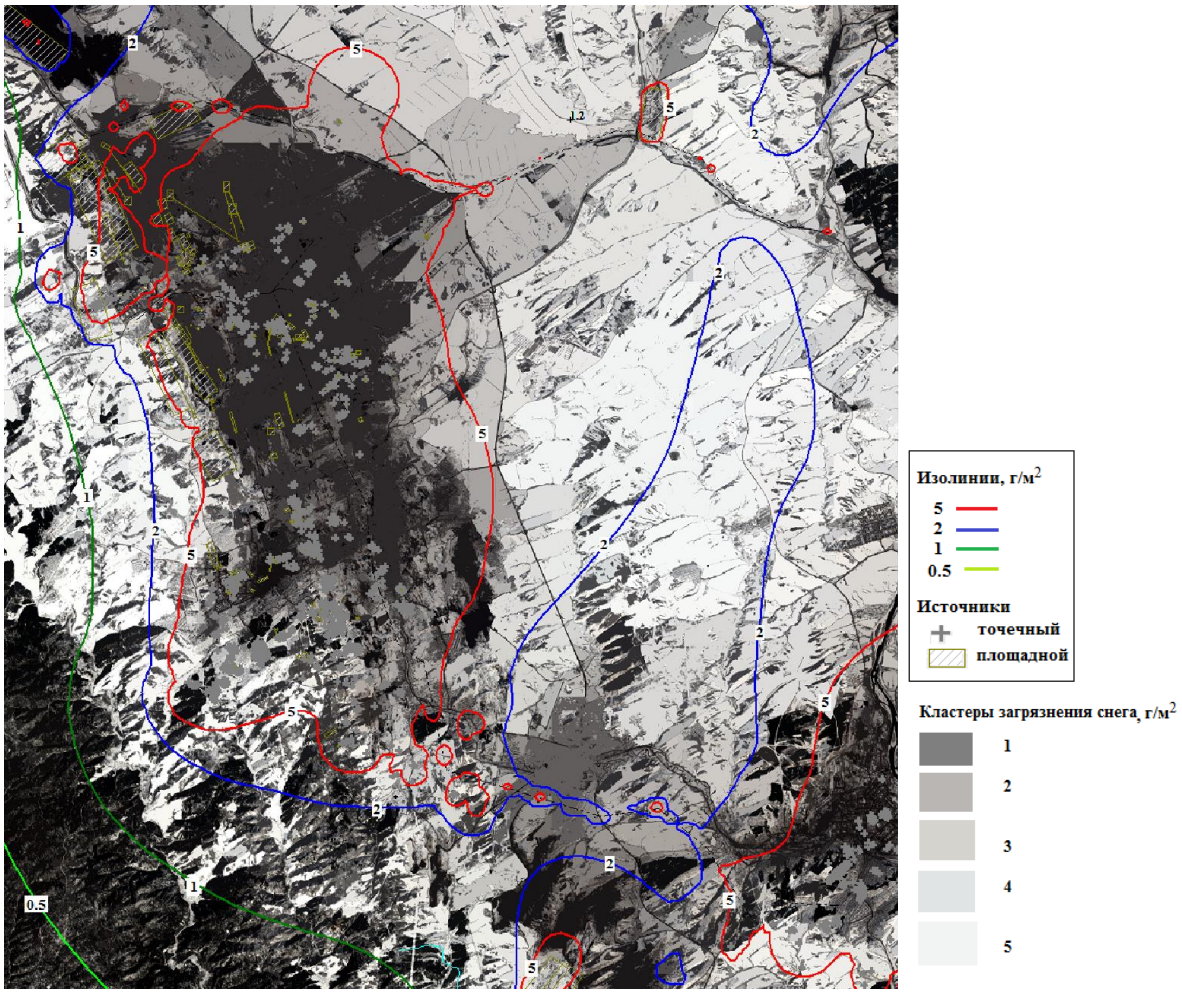


Рис. 4. Совмещение результатов обработки космоснимков
и расчета математической модели

Следующим важным направлением дистанционного мониторинга является оценка пылевой нагрузки по снимкам за зимний период времени. Оценка производится по изу-

чению интенсивности снежного покрова вблизи объектов угледобычи. В [3] авторами подробно расписана методика обработки снимков объектно-ориентированными алгоритмами выделения сегментов на изображении. Следует отметить, что в данной методике авторами проведено уникальное исследование подтверждения результатов обработки снимков с расчетными значениями из программного комплекса ЭРА и данными лабораторных исследований проб снега. На рис. 4 приводятся результаты обработки спутникового снимка Sentinel-2A по данной методике с расчетными значениями математической модели. Как видно из рисунка, разработанный авторами подход к обработке снимков позволяет получать актуальную картину пылевой нагрузки угледобывающего региона.

Конечно, приведенный перечень задач, не является исчерпывающим. В данной статье мы затронули только наиболее часто решаемые задачи геоэкологического мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования для угледобывающего региона. Данный перечень активно расширяется. Появление новых данных дистанционного зондирования, методов и подходов к их обработке позволяет создавать принципиально новые тематические продукты и инструменты контроля состояния окружающей среды.

Список литературы

1. Исследование процессов зарастания отвалов предприятий горного производства по данным дистанционного зондирования / В.Н. Опарин, В.П. Потапов, О.Л. Гиниятуллина, Е.Л. Счастливцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 6. С. 133–141.

2. A change detection experiment using vegetation indices / John G. Lyon, Ding Yuan, Ross S. Lunetta, Chris D. Elvidge // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1998. Vol. 64, № 2. P. 143–150.

3. Комплексный мониторинг техногенной нагрузки на атмосферу горнопромышленного региона / В.Н. Опарин, В.П. Потапов, О.Л. Гиниятуллина [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 5. С. 162–171.

УДК 528.88

А.С. Голюков[1, 2], И.А. Петров[1]

[1]Институт леса имени В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: jedirevan@ya.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ УВЛАЖНЕНИЯ НА ПРИРОСТ ДРЕВОСТОЕВ

На основе гравиметрических (спутниковая система GRACE), модельных (MERRA2 ROOT ZONE) и наземных данных (образцов древесины) исследована водная масса на территории усыхания древесных растений темнохвойной тайги Южной Сибири. Выявлена связь между радиальным приростом темнохвойных с данными GRACE и MERRA2.

Ключевые слова: GRACE, MERRA2, усыхание древостоев, водная масса.

© Голюков А.С., Петров И.А., 2018

Лес – важная часть нашего окружающего мира, он не только определяет качество окружающей среды, но и является ценным экологическим, экономическим и социальным ресурсом. Возрастание температуры и увеличение аридности климата, наблюдаемое в последние десятилетия, приводит к усыханию древесных растений по всей территории бореальных лесов [1–6]. Одной из основных причин усыхания древостоев в тайге является водный стресс. Для своевременного выявление зон, подверженных водному стрессу, необходима разработка методов оценки условий увлажнения на древесные растения.

Цель исследования – определить возможность использования данных GRACE и MERRA2 ROOT ZONE для индикации влияния изменений водной массы на состояние темнохвойных древостоев. Объект исследования темнохвойные древостои (кедр, пихта и ель) на территории гор Южной Сибири (Кузнецкий Алатау, Западный и Восточный Саян, хребет Хамар-Дабан).

В работе использовались данные спутниковой системы GRACE – эксперимент по исследованию гравитационного поля Земли и изменению климата. Временное разрешение – среднемесячное (2002–2016); пространственное – 1×1 (~112×112 км на экваторе). В исследовании используются данные GRACE из центра обработки GFZ Level-3, представляющие собой аномалии водных эквивалентов масс (АВЭМ), в сантиметрах. АВЭМ охватывает изменение включающие в себя водную массу всей глубины влагосодержания. Из-за профилактических работ на спутниковой системе, некоторые среднемесячные данных отсутствую, они заменялись усреднением данных АВЭМ соседних месяцев. Для восстановления сигнала, ослабленного в ходе фильтрации, среднемесячные данные были помножены на коэффициенты масштабирования (scale factor) [7]. MERRA2 ROOT ZONE – данные реанализа, показывающие среднее количество воды на глубине до 1 м ($м^3м^{-3}$). Пространственное разрешение 0,5 °×0,625°, временное разрешение – среднемесячное (1980–2017). Все вышеописанные данные, находятся в свободном доступе.

В качестве источника наземных данных использовались хронологии, полученные для временных пробных площадей на исследуемой территории.

Связь АВЭМ с приростом древесных растений. В зоне усыхания темнохвойной тайги на Восточном Саяне и хребте Хамар-Дабан наблюдается прямая значимая зависимость (r = 0,75 для пихты и r = 0,72 для кедра соответственно) между индексом прироста темнохвойных и АВЭМ за гидрологический год (сентябрь – август). На территории Западного Саяна выявлена прямая зависимость между радиальным приростом ели и АВЭМ начала периода вегетации (r = 0,79). В лесостепной зоне с недостаточным увлажнением (~300 мм в год) радиальный прирост лиственницы положительно коррелирует с АВЭМ июля (r = 0,64). В зоне избыточного увлажнения (> 1 500 мм) в высокогорьях Кузнецкого Алатау и Западного Саяна связь между радиальным приростом лиственницы и кедра и АВЭМ периода вегетации отрицательная (r = –0,71 и r = –0,65 соответственно).

Связь влагосодержания корнеобитаемого слоя с приростом древесных растений. В зоне усыхания темнохвойной тайги на хребте Хамар-Дабан выявлена зависимость между приростом усыхающих темнохвойных древостоев и влагосодержанием корнеобитаемого слоя за июль (r = 0,62 для кедра и пихты). На территории с избыточным увлажнением в высокогорьях Западного Саяна выявлена отрицательная связь между радиальным приростом кедра и влагосодержанием корнеобитаемого слоя второй половины вегетационного периода (r = –0,53). В лесостепной зоне с недостаточным увлажнением положительная корреляция прироста лиственницы выявлена с влагосодержанием корнеобитаемого слоя (r = 0,62).

Заключение. Показана связь радиального прироста темнохвойных с данными MERRA2 ROOT ZONE и GRACE. Полученные зависимости позволяют использовать

АВЭМ и влагосодержание корнеобитаемого слоя для выделения зон, где темнохвойные древостои наиболее вероятно испытывают водный стресс, что особенно актуально для труднодоступных и малонаселенных районов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 17-74-10113).

Список литературы

1. О сопоставлении изменений климата в 1981–2000 гг. с палеоаналогами глобального потепления / Н.А. Ефимова, Е.Л. Жильцова, Н.А. Лемешко, Л.А. Строкина // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 18–23.

2. Профилактика и меры предупреждения лесных пожаров в системе лесоуправления Российской Федерации / Д.Ф. Ефремов, А.С. Захаренков, М.А. Копейкин [и др.]; под ред. Е.П. Кузьмичева. М.: Всемирный банк, 2012. 104 с.

3. Замолодчиков Д.Г. Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учетов лесного фонда // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131, № 4. С. 382–392.

4. Оценка роли корневых патогенов в ухудшении состояния лесного фонда Сибирского федерального округа / И.Н. Павлов, О.В. Рухуллаева, О.А. Барабанова, А.А. Агеев // Хвойные бореальной зоны. 2008. № 3–4. С. 262–268.

5. Siberian Pine Decline and Mortality in Southern Siberian Mountains / V.I. Kharuk, S.T. Im, P.A. Oskorbin [et al.] // Forest Ecology and Management. 2013. P. 289, 310, 312–320, 385–392.

6. Climate induced birch mortality in trans-Baikal lake region, Siberia / V.I. Kharuk, K.J. Ranson, P.A. Oskorbin [et al.] // Forest Ecology and Management. 2013. V. 289. P. 385–392.

7. Landerer F.W., Swenson S.C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // Water Resources Research, 2012. Vol. 48. Is. 4.

УДК 528.88

М.А. Голятина

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
e-mail: Marina-Sosnina1993@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПНЫХ ОЗЕР ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

С помощью спектрального водного индекса MNDWI была изучена динамика изменения количества озер юго-востока Забайкальского края, и их суммарная площадь за период 1989–2016 гг. Для детального исследования озера были разделены в соответствии с классификацией П.В. Иванова.

Ключевые слова: Забайкальский край, степные озера, MNDWI.

Для исследования водных ресурсов Земли незаменимой становится информация, полученная с помощью космических аппаратов. С ее помощью стало возможным производить инвентаризацию водных объектов [1], оценивать последствия от наводнений [2], оценивать биологическую продуктивность водоемов [3]. В настоящее время данные, полученные с помощью космических аппаратов, довольно часто используются в современных исследованиях, потому что они позволяют получать информацию о тер-

© Голятина М.А., 2018

риториях недоступных для человека по разным причинам. Современные спутниковые системы имеют различное временное и пространственное разрешение, что обеспечивает исследователей непрерывной и оперативной информацией.

В основу настоящего исследования положены степные озера Юго-Восточного района Забайкальского края (рис. 1).

Степные озера Забайкальского края расположены в сухой степной климатической зоне. Коэффициент озерности для данной территории составляет 15,87, в то время как для всего района в целом – 0,48 [4]. Изучение этих озер актуально потому, что они отражают макроклиматическую обстановку региона.

Целью исследования является выявление динамики изменения площадей озер в степной зоне Забайкальского края за период с 1989 по 2016 г.

Климатические условия исследуемого района характеризуются недостаточным увлажнением, избытком солнечного света, островным распределением вечной мерзлоты. За последние пятьдесят лет среднегодовая температура воздуха в среднем по территории составляет –0,8°С и колеблется от 1,5 до –2,8 °С. Для исследуемого района свойственна холодная ясная зима со средними температурами января –24,1 °С и слабым ветром. Такая погода устанавливается под влиянием мощного Сибирского антициклона. Отличительной чертой летнего сезона является его разделение на два периода увлажнения: засушливый и влажный. Во время влажного периода выпадает более 60 % всех годовых атмосферных осадков. Среднегодовая температура июля за последние пятьдесят лет по району составляет 19,8 °С.

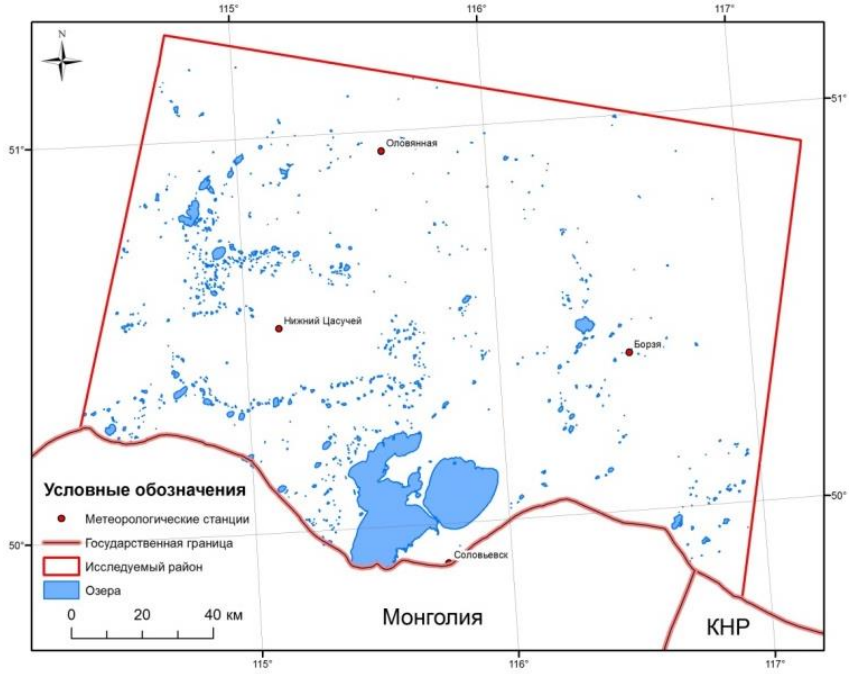


Рис. 1. Исследуемые озера

Космические снимки спутников Landsat TM, ETM+ и OLI послужили исходными данными для исследования, они имеют пространственное разрешение 30 м. Всего было дешифрировано 28 снимков уровня обработки Level 1, полученных с помощью сервиса EarthExplorer. На каждый год выбирался наилучший снимок территории в период летнего сезона и с покрытием облачностью не более 20 %.

Для автоматизированного выделения водных поверхностей по спутниковым снимкам существуют следующие методы обработки [5; 6] – определение многоканальных спектральных индексов (водных индексов), тематическая классификация с обуче-

нием, линейное разделение, одноканальная классификация с использованием порога разделения. Для изучаемой территории среди всех предложенных методов наиболее достоверным является метод определения водного индекса MNDWI, он позволяет выделять площади водных объектов с минимальной величиной среднеквадратической ошибки [7]. Вычисляется по формуле

$$MNDWI = \frac{\rho_{band2} - \rho_{band5}}{\rho_{band2} + \rho_{band5}}$$

где $\rho_{band\ 2,5}$ – интенсивность излучения в 2-м и 5-м спектральных каналах LandSat TM, ETM+.

Перед автоматизированным выделением водных поверхностей была произведена процедура радиометрической коррекции космоснимков.

С помощью водного индекса MNDWI в программном обеспечении ArcGIS 10 посредством инструментов Image Classification и Spatial Analyst были дешифрированы площади водных зеркал исследуемого района за период с 1989 по 2016 г. На основе полученных данных удалость произвести инвентаризацию озер по годам (рис. 2) и вычислить суммарную площадь соответственно (рис. 3). На рис. 2 отмечается, что в 1992–1993 гг. произошло существенное изменение количества озер.

Для более детального анализа озера были разобраны на группы по классификации П.В. Иванова [8] и проанализированы, построены соответствующие графики (рис. 4): озерки (площадь зеркала равна 0,001–0,01 км^2 и 0,02–0,1 км^2); очень малые (0,1–1,0 км^2); малые (1,0–10 км^2); средние (10,1–100 км^2); большие (100,1–1 000 км^2); очень большие (1000,1–10 000 км^2); великие озера мира (10 000,0–100 000 км^2).

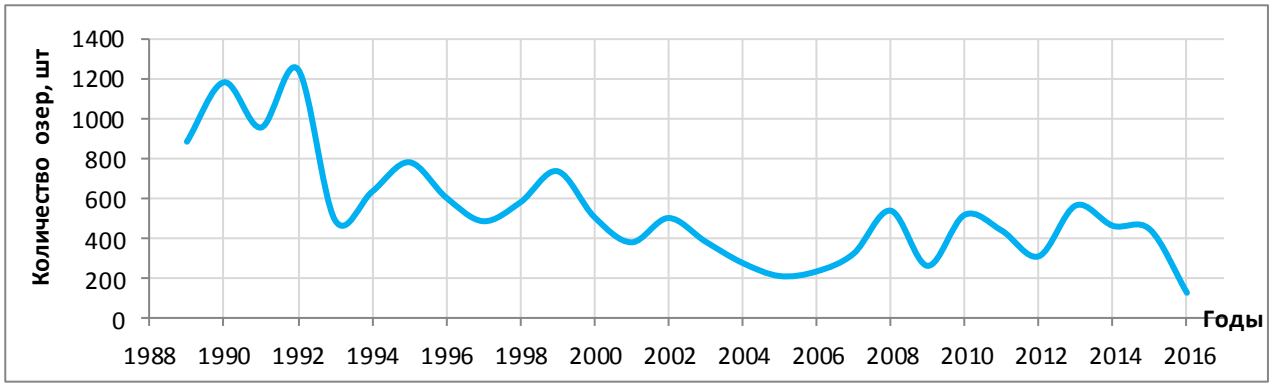


Рис. 2. Изменение количества озер исследуемого района за период с 1989 по 2016 г.

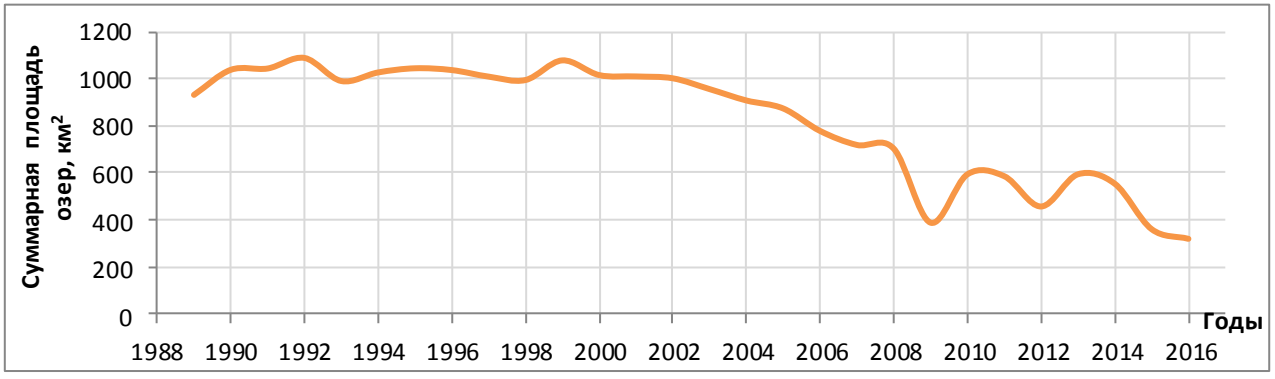


Рис. 3. Изменение суммарной площади озер исследуемого района за период с 1989 по 2016 г.

Из рис. 4 следует, что сокращение общего количества озер произошло в большей степени из-за высыхания озерков и очень малых озер.

Заключение. За весь период исследования общий максимальный уровень водности наблюдался в 1992 г., суммарная площадь водных поверхностей на территории составила 1 088,4 км^2. Также в этом году зафиксировано максимальное количество озер – 1 245, из них 77,5 % составляют озерки. Для разных групп озер максимальным по уровню водности и количеству озер были разные годы. Таким образом, для озерков таким годом был 1992 г., для очень малых озер по суммарной площади водных поверхностей – 1991 г., а по количеству – 1990 г.

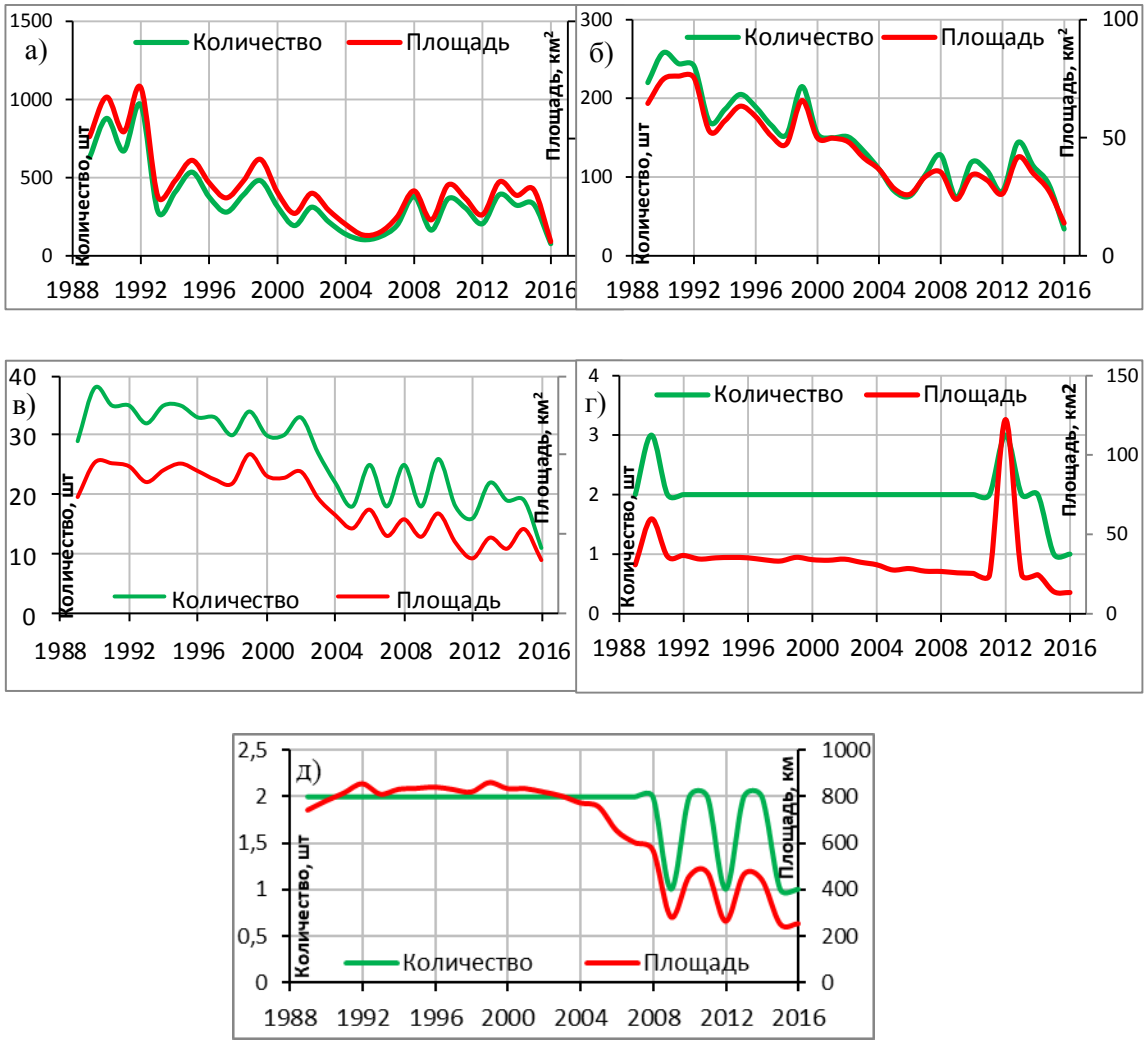


Рис. 4. Графики изменения количества и суммарной площади водной поверхности разных групп озер: *а* – озерки; *б* – очень малые; *в* – малые; *г* – средние; *д* – большие – за период с 1989 по 2016 г.

Максимальное количество малых озер за весь период наблюдения составило 35, такое количество было зафиксировано в 1990–1992, 1994, 1995 гг., максимальная суммарная площадь равная 100,54 км^2 отмечалась в 1999 г. К средним озерам на исследуемой территории относятся два озера: Хара-Нор и Ножий, но в 1990 г. в эту категорию попал разлив озера Барун-Торей, а в 2012 г. Барун-Торей уменьшился до размеров среднего озера. Суммарная максимальная площадь водного зеркала этой категории составила 122,326 км^2 в 2012 г. Озера Барун-Торей и Зун-Торей являются большими озерами территории, здесь существенные изменения происходили в 2009 [9] и 2012 гг., когда Барун-Торей полностью высыхал.

2016 г. характеризуется самым маловодным годом для всех категорий, кроме категории больших озер – самый маловодный 2015 г. Всего в 2016 г. отмечается 124 озера общей площадью водной поверхности 319,36 км^2.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00104 А).

Список литературы

1. Голятина М.А. Инвентаризация озер Забайкальского края по данным дистанционного зондирования Landsat // Материалы XLIII междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей «Молодежная научная весна: молодая наука ЗабГУ на научной карте Байкальского региона и дальнего Востока Российской Федерации». Чита: Изд-во ЗабГУ, 2016. С. 86–88.

2. «ГИС Амур»: Система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях / А.В. Фролов, В.В. Асмус, С.В Борщ [и др.] // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 5–21.

3. Гончаров А.Ю. Связь морфометрических параметров и внешнего водообмена с первичной продукцией в водоемах северо-западного Причерноморья // Экология моря. 2005. Вып. 68. С. 31–36.

4. Атлас Забайкалья. Иркутск: Главное управление геодезии и картографии, 1967.

5. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G.L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, S.R. Proud // Remote Sensing of Environment. 2014. № 140. P. 23–35.

6. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2009. № 75. P. 1307–1317.

7. Курганович К.А., Носкова Е.В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья по данным дистанционного зондирования // Вестник ЗабГУ. 2015. № 6. С. 16–24.

8. Голятина М.А. Оценка изменения морфометрических характеристик степных озер юго – востока Забайкалья с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Записки Забайкальского отделения Русского географического общества № 135. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2016. С. 68–75.

9. Соснина М.А., Курганович К.А. Оценка изменения площадей водного зеркала оз. Барун-Торей за период 1976–2014 гг. с использованием данных дистанционного зондирования Landsat // Водные ресурсы и водопользование: сб. тр. преподавателей и студентов кафедры водного хозяйства и инженерной экологии Забайкальского государственного университета. Чита: ЗабГУ, 2015. Вып. 7. С. 23–31.

УДК 631.4

Ю.В. Горбунова, Т.Н. Демьяненко, В.В. Чупрова

Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
e-mail: t-demyanen@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТРУКТУР ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ОПТИМИЗАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Рассмотрены возможности использования данных дистанционного зондирования Земли для построения геоморфологического профиля с целью агроэкологической оценки структур почвенного покрова и последующей типизации земель как базовой основы проектирования адаптивно-ландшафтного земледелия в Красноярском крае. Геоморфологический профиль иллюстрирует особенности рельефа и распределение почвенных структур с определенным набором агроэкологических условий и лимитирующих факторов, обусловливающих выбор агротехнологий и систем земледелия.

Ключевые слова: SRTM данные, цифровая модель рельефа, цифровая почвенная карта, геоморфологический профиль (катена), структура почвенного покрова.

Данные, полученные с помощью методов дистанционного зондирования Земли, имеют огромный потенциал для оптимизации земледелия. Основная особенность таких данных – их масштабность и возможность анализировать большие по площади территории выявлять закономерности миграционных процессов, составлять серии специальных карт по отдельным параметрам, характеризующим агроландшафты в разных аспектах.

Для рационального использования своих землепользований и землевладений сельскохозяйственные предприятия должны иметь четкое представление, прежде всего, о рельефе и структуре почвенного покрова пахотных массивов [1; 2]. Рельеф является ведущим фактором почвообразования, непосредственно влияет на протекающие процессы в почвенной толще, в том числе на развитие эрозионных явлений. Для исследования рельефа используют SRTM данные [3]. SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) – программа топографической радиолокационной съемки «Шаттл» – данные рельефа практически на всю территорию Земли, полученные с космического аппарата «Спейс шаттл» для построения наиболее полной цифровой базы данных рельефа Земли высокого разрешения.

Для исследований был выбран агроландшафт в землепользовании ЗАО «Искра» Ужурского района Красноярского края. Территория этого хозяйства находится в Чулымо-Енисейской котловине, ограниченной на юге Батеневским кряжем (отрог Кузнецкого Алатау) и на севере – Солгонским кряжем (отрог Восточного Саяна). Поверхность здесь равнинная с грядами, холмами и сопками из моноклинально залегающих пород девонского и каменноугольного периодов. Склоновое местоположение и «гористое» обрамление (720–815 м над уровнем моря) пространства обусловливают развитие делювиальных и эрозионно-аккумулятивных процессов.

На рис. 1 представлена цифровая модель рельефа исследуемой территории. Выделяемые на основе анализа рельефа агроландшафты дифференцируются в зависимости от состава почвообразующих пород, уровня грунтовых вод и условий увлажнения, ха-

© Горбунова Ю.В., Демьяненко Т.Н., Чупрова В.В., 2018

рактера неоднородности почвенного покрова и физико-химических свойств почв, степени выпаханности гумусово-аккумулятивных горизонтов, наличия или отсутствие эрозионных воздействий. Пространственное распределение агроландшафтов определяется особенностями мезо- и микрорельефа, который существенно различается на разных участках землепользования ЗАО «Искра».

Для детального изучения всех этих факторов заложен геоморфологический профиль, представляющий собой катену (координаты средней части 89,76° и 55,40°) на выпукло-крутопокатом склоне крутизной до 4,5° под сельскохозяйственной растительностью. Протяженность катены – 2 250 м. Склон характеризуется близким залеганием к поверхности почвообразующих и подстилающих пород, на что указывает частая встречаемость и большое количество грубого обломочного материала. Катена заканчивается обширным понижением.

По условиям рельефа на катене в период натурного обследования выделены три позиции или элементарные геохимические ландшафты, заложены и описаны почвенные разрезы, отобраны образцы из генетических горизонтов, обозначены основные контуры почвенных комплексов. Натурному обследованию предшествовали выбор и построение геоморфологического профиля в режиме дистанционного зондирования Земли. Для этого использовали программное обеспечение MapInfo Professional. По материалам космический съемки определено местоположение катены, составлены тематические крупномасштабные карты «Рельеф» и «Почвенный покров», совмещенные в два слоя (рис. 2). В дальнейшем, используя опыт полевого (натурного) обследования и определенный опыт крупномасштабного картографирования форм рельефа и структуры почвенного покрова, возможно уточнение выделенных позиций элементарных ландшафтов или даже разделение на дополнительные категории. Уже сейчас видно, что катена отличается сложностью и контрастностью как по литологическим признакам, так и миграционным потокам, обусловливающим на отдельных участках доминирование денудации над эрозией, или, напротив, преобладание эрозионных процессов.

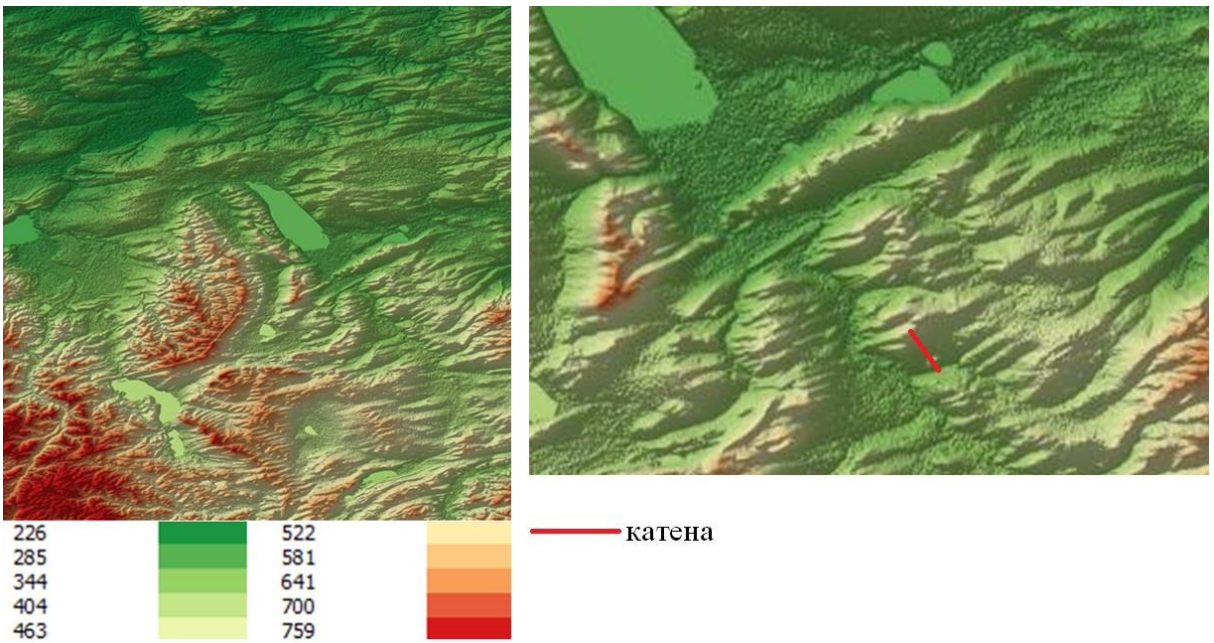


Рис. 1. Цифровая модель рельефа исследуемой территории
(легенда – высота над уровнем моря, м)

Выделенные на данном этапе исследований позиции: элювиально-денудационный ландшафт (I), транзитный ландшафт (II), элювиально-аккумулятивный ландшафт (III) – могут рассматриваться как микрокатены более низкого порядка (рис. 3).

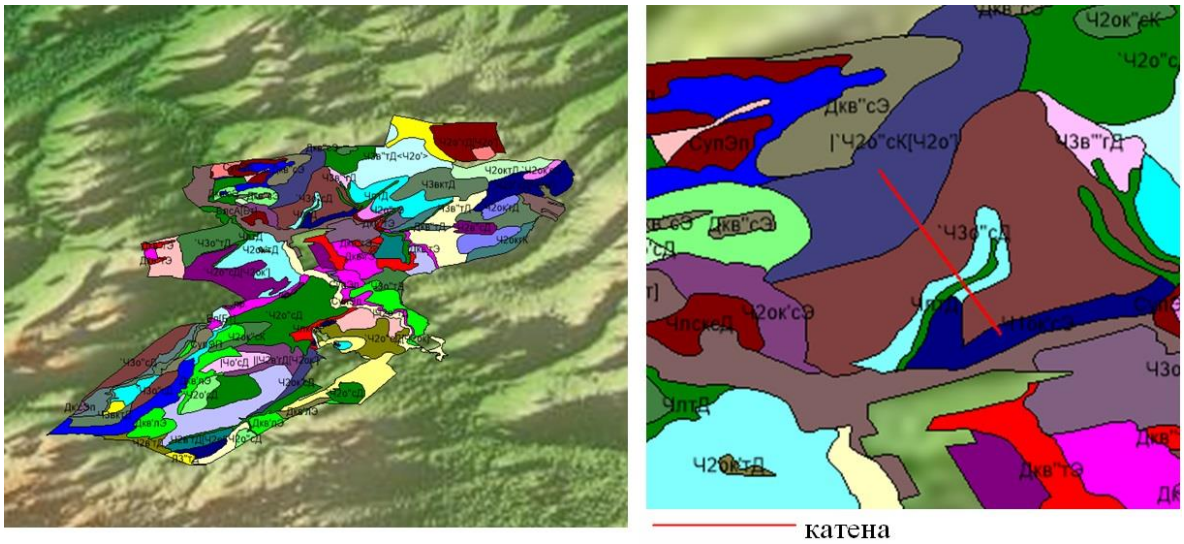


Рис. 2. Совмещенное изображение двух слоев –
«рельеф» и «цифровая почвенная карта»

Участок I – наиболее возвышенная водораздельная часть катены с отметками от 380 до 460 м над уровнем моря имеет довольно большой угол наклона, благоприятствующий преимущественно горизонтальной, плоскостной миграции веществ с атмосферными осадками. Этот поток связывает данный участок с нижележащими позициями катены. Вертикальное поступление веществ с атмосферными осадками обеспечивает функционирование почвенного профиля сформировавшихся комплексов черноземов обыкновенных средне- и маломощных эродированных. Верхняя часть почвенного профиля характеризуется высокой вариабельностью мощности гумусового горизонта и признаков иллювиирования карбонатов. Нижняя часть профиля отличается пестрой буро-красной окраской, генетически обязанной породам девонского происхождения. Гранулометрический состав всего почвенного профиля довольно однородный.

Участок II занимает среднюю часть склона (высота над у. м. 380–385 м), имеет небольшой угол наклона и отличается слегка вогнутой поверхностью с многочисленными микропонижениями. Здесь преобладает атмосферно-сточное увлажнение, доминируют эрозионные процессы, следствием которых является обеднение почв гумусом и элементами питания. В пониженных формах рельефа наблюдается выщелачивание карбонатов. Поэтому основной фон здесь образуют комплексы черноземов обыкновенных и выщелоченных с долей участия до 10–25 %. Развитию поверхностного стока в этой части катены способствует вода, стекающая с поверхности прилегающего выше (I – позиция) крутого склона агроландшафта.

Участок III геоморфологического профиля характеризуется довольно выраженным уклоном и заканчивается в долинной части территории. Абсолютные отметки – 385–360 м над уровнем моря. Увлажнение – атмосферно-натечное, но часто и за счет грунтовых вод. Здесь продолжается миграция веществ по смешанному типу: вертикально-плоскостная, осложненная влиянием грунтовых вод по микрозападинам. На данном участке протекают элювиально-аккумулятивные процессы, что обусловливает большую неоднородность структуры почвенного покрова. Совокупность автоморфного и полугидроморфного режимов способствовала формированию черноземов

обыкновенных карбонатных маломощных на локальных микроповышениях и сложных вариаций черноземов обыкновенных мощных, лугово-черноземных и черноземно-луговых почв на микропонижениях.

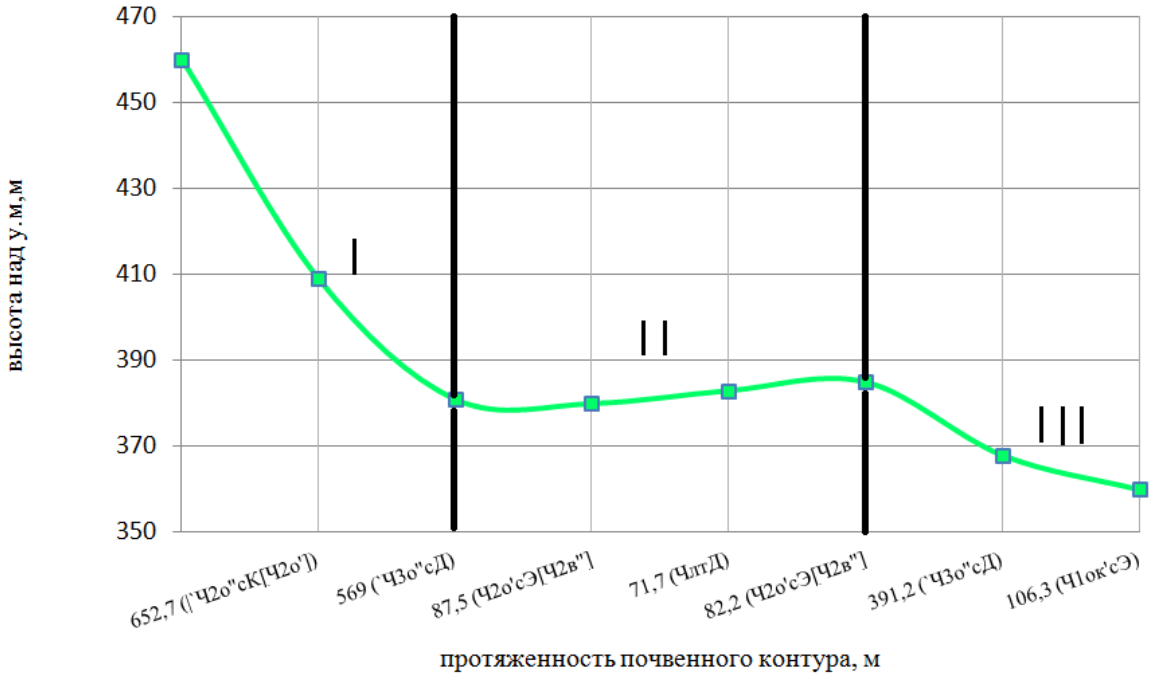


Рис. 3. Геоморфологический профиль южного склона в ЗАО «Искра»: Ч2о"сК[Ч2о'] – чернозем обыкновенный среднегумусный, среднемощный, слабосмытый, слаборазвеянный в комплексе с черноземами обыкновенными маломощными (10–25 %); `Ч3о"сД – чернозем обыкновенный тучный, среднемощный, слаборазвеянный; Ч2о'сЭ[Ч2в"] – чернозем обыкновенный среднегумусный, маломощный в комплексе с черноземами выщелоченными, среднегумусными, среднемощными (10–25 %); ЧлтД – лугово-черноземные почвы в комплексе с черноземно-луговыми; Ч1ок'сЭ – чернозем обыкновенный карбонатный, малогумусный, маломощный

Таким образом, использование данных дистанционного зондирования Земли открывает новые возможности в исследовании катенарных особенностей агроландшафтов для оценки их агроэкологического состояния. На примере катены, заложенной в землепользовании Ужурского района, установлено, что сложный склоновый характер рельефа приводит к чередованию доминирования элювиальных и аккумулятивных процессов на отдельных участках пахотного массива. Поэтому на таких массивах следует выделять соответствующие типы земель и учитывать их при разработке адаптивно-ландшафтных систем земледелия, планировании и организации мероприятий по охране почвенного покрова.

Список литературы

1. Власенко А.Н., Добротворская Н.И., Семендяева Н.В. Агроэкологическая оценка и типизация земель как базовый элемент проектирования адаптивно-ландшафтного земледелия: метод. рекомендации. Новосибирск, 2011. 55 с.

2. Эколого-географические аспекты выделения типов комплексов почв на плоскогорье Укок с использованием дистанционных исследований / С.Я. Кудряшова, Л.Ю. Дитц, А.В. Чичулин [и др.] // Сиб. экол. журн. 2012. № 5. С. 703–710.

3. Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. 2011 № 3. С. 40–46.

УДК 528.88, 551.513.22

А.В. Дергунов, В.Б. Кашкин, Т.В. Рублева, А.А. Романов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: alexanderdergunov94@gmail.com, rtcvbk@rambler.ru,
tvrubleva@mail.ru, aaromanov@sfu-kras.ru

АНТАРКТИЧЕСКАЯ ОЗОНОВАЯ ДЫРА КАК ЕСТЕСТВЕННЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

Использованы спутниковые озоновые данные за 1985–2015 гг. Создана методика оценки дефицита озона в полярной области и его избытка в умеренных широтах Южного полушария. Показано, что во время существования Антарктической озоновой дыры дефицит озона в полярной области и его избыток в умеренных широтах практически совпадают. Возникновение озоновой дыры и ее заполнение – это естественный геофизический процесс.

Ключевые слова: космический мониторинг, спутниковые данные, озоносфера, атмосферные процессы, Антарктическая озоновая аномалия.

Озоновый слой защищает нашу планету от жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Общее содержание озона (ОСО) – это толщина слоя газообразного озона в вертикальном столбе атмосферы, помещенного при температуре 0° С и атмосферном давлении 1 013 ГП. ОСО измеряется в единицах Добсона (е.Д.), 1 е.Д. = 10^{-5} м. Озоновые аномалии – это локальные области существенного уменьшения общего содержания озона в озоновом слое Земли ниже 220 е.Д.

В 1985 г. было обнаружено, что в Южном полушарии над Антарктидой весной образуется озоновая дыра (АОД) [1]. В последние годы ее площадь варьируется в пределах 18–25 млн км^2 [2]. АОД окружена кольцом с повышенным ОСО, значения которого могут достигать 450 е.Д. В 1986 г. сотрудники NASA Р. Столярски и М. Шеберл предположили, что во время образования АОД происходит перенос масс озона из приполярной области Южного полушария в умеренные широты, а с конца сентября массы озона перемещаются в направлении полюса. АОД исчезает в ноябре – декабре [3].

В настоящее время общепринятой является теория, согласно которой причиной истощения озонового слоя в полярной области Южного полушария является разрушение озона хлорфторуглеродами (фреонами) [4]. Были подписаны Венская конвенция (1985 г.) и Монреальский протокол (1987 г.) о запрете производства озоноразрушающих веществ. При подписании Монреальского протокола было объявлено, что АОД исчезнет в 2010 г., однако в последние годы данная аномалия продолжает появляться.

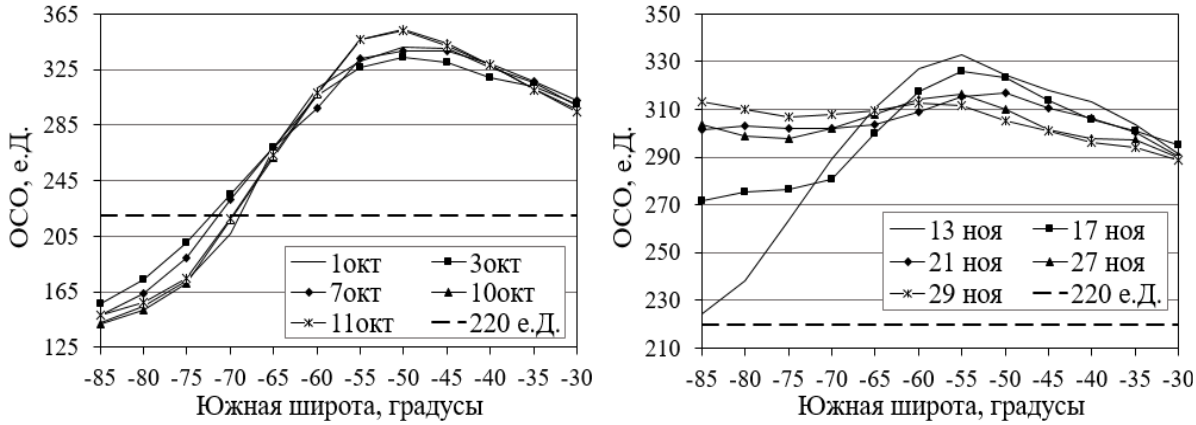
В данной работе изучалось перераспределение количества озона из умеренных широт в полярную область Южного полушария весной 1985–2015 гг. по спутниковым данным TOMS (КА Nimbus-7, Earth Probe) и OMI (КА Aura). Измерения ОСО проводились в диапазоне 300–380 нм с погрешностью 2–4 % [5]. Нами анализировались средние зональные ОСО с сайта NASA [5]. Средние зональные ОСО – это ежедневные значения общего содержания озона в различных пятиградусных кольцах широт, усредненные по долготе от 0 до 360 градусов. Предварительно нами выполнялось преобразование исходных текстовых файлов в формат Excel. В результате был сформирован архив зональных средних ОСО за 1985–2015 гг. для Южного полушария.

© Дергунов А.В., Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Романов А.А., 2018

Для иллюстрации происходящих динамических процессов весной 2013 г. рассмотрим графики зависимости зональных средних ОСО от широты в отдельные дни октября и ноября, которые приведены на рис. 1.

На рис. 1, *а* показано изменение содержания озона во время существования АОД. Над полярной областью зональные средние значения ОСО в октябре находятся ниже климатической нормы в 220 е.Д.; 1 октября в кольце широт 85–90° ю.ш. зональное ОСО составляет 142 е.Д. В умеренных широтах ОСО значительно превышает климатическую норму и 11 октября в широтном кольце 50–55° ю. ш. ОСО равно 353 е.Д. Таким образом, в диапазоне широт 45–55° ю. ш. образуется кольцо с повышенным ОСО.

На рис. 1, *б* представлены графики изменения зонального ОСО во время активных атмосферных процессов при заполнении АОД в ноябре. Отметим, что эти значения в полярных и умеренных широтах превышают климатическую норму. В полярных широтах содержание озона увеличилось, в умеренных – уменьшилось. К концу ноября кольцо с повышенным ОСО в умеренных широтах исчезает (29 ноября, рис. 1, *б*), а озоновая дыра перестает существовать.



а *б*

Рис. 1. Изменение содержания озона в Южном полушарии весной 2013 г.

Для повышения достоверности результатов анализа был исследован не одиночный график зависимости зональных ОСО от широты, а усредненный график – за несколько дней. Необходимо было определить временной интервал усреднения ΔT.

Известно, что Антарктическая озоновая дыра от момента своего образования до «заполнения» существует в течение 3–4 месяцев [6], т.е. фактически с 20-х чисел августа до середины декабря. Зональные данные об общем содержании озона с августа по конец сентября отсутствуют [5]. В это время нижняя стратосфера над Антарктидой не освещена Солнцем, и измерения не проводились. За начало временного интервала ΔT была выбрана дата, для которой в базе NASA данные об ОСО. В 2013 г. – это 1 октября.

Для определения конца интервала ΔT во время которого начинаются процессы «заполнения» озоновой дыры, анализировался дефицит масс озона ΔM. Данная характеристика согласно [2] определяется в виде разности между массой озона в АОД с границей в 220 е.Д. и массой озона, заключенной в фактических границах аномалии. Проведено сопоставление зональных ОСО и дефицита ΔM в АОД, показывающее, что датой начала резкого восстановления озонового слоя в полярной области в 2013 г. является 14 октября. Этот день и был выбран в качестве конца временного интервала ΔT. Таким образом, в 2013 г. $\Delta T = 14$ дням.

Сравним количество озона, которое «покинуло» полярную область, и избыток содержания озона в средних широтах. Для этого необходимо определить, что такое избыток озона в средних широтах и его дефицит в полярных. Выбираем некоторое пороговое значение ОСО, обозначим его как X_0. Превышение значения X_0 соответствует избытку, а ниже порога X_0 наблюдается дефицит. Экспериментальным путем установлено, что в качестве порогового значения X_0 следует выбирать среднегодовое значение общего содержания озона в диапазоне широт от 32,5° до 52,5° ю. ш. за каждый год. В данном широтном диапазоне в большинстве случаев присутствуют без пропусков все зональные средние. Для 2013 г. пороговое значение X_0 = 295,5 е.Д.

На рис. 2 показано отклонение содержания озона в полярных и умеренных широтах Южного полушария от порога X_0 в выбранном интервале ΔT. Пороговое значение X_0 показано пунктиром. График на рис. 2, *а* аналогичен графику на рис. 1, *а* и представляет собой зависимость ежедневных зональных средних от широты φ, усредненных за 1–14 октября. Обозначим усредненные зональные значения через x_φ. Видно, что на рис. 2, *а* в полярной области количество озона x_φ меньше порогового X_0 на широтах, превышающих 63° ю. ш. Эта область характеризуется дефицитом озона и на рис. 2, *а* она обозначена как «–». На рис. 2, *а* на широтах менее 63° ю. ш. количество озона x_φ превышает пороговое ОСО. Эта область характеризуется избытком озона, она обозначена как «+».

Из рис. 2, *а* видно, что области «–» и «+» различаются по величине. Здесь не учитывается сферичность Земли. Для учета сферичности зональные ОСО достаточно умножить их на косинус широты φ. Обозначим: X_φ – откорректированное значение ОСО. X_φ рассчитывалось по следующей формуле:

$$X_\varphi = x_\varphi \cos\varphi. \qquad (1)$$

Обозначим отклонение значения X_φ от порога как $\Delta X_\varphi = X_\varphi - X_0$. Зависимость значений ΔX_φ от широты приведена на рис. 2, *б*.

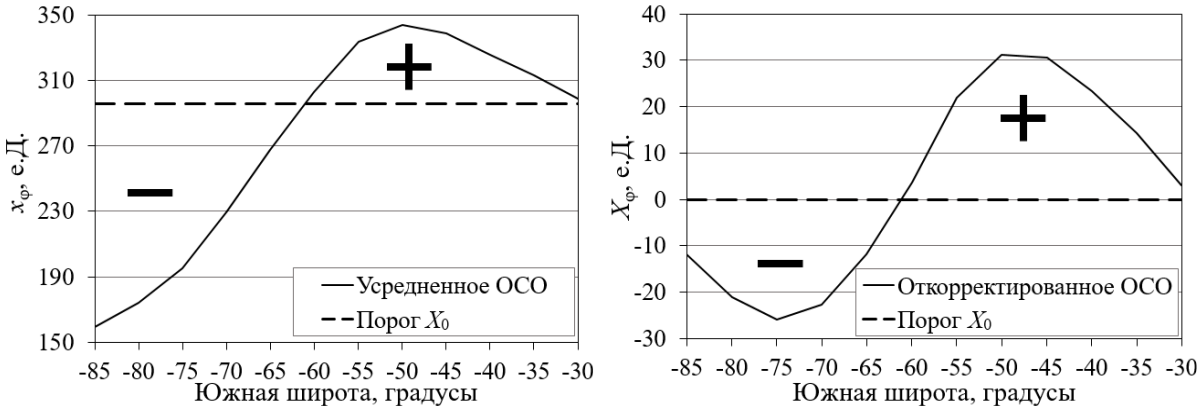
Просуммируем отклонения от порога ΔX_φ отдельно для области со знаком «–» и для области со знаком «+». В первом случае сумма значений ΔX_φ характеризует дефицит озона *D* (deficit) в полярной области. Во втором – сумма значений ΔX_φ для области со знаком «+» – это избыток озона *E* (excess) в умеренных широтах.

Результаты исследований зонального ОСО за 1985–2015 гг. представлены в таблице. В первом столбце указаны годы, во втором – пороговые значения X_0, дефицит *D* показан в третьем столбце, избыток *E* – в четвертом. Разница *Q* дефицита и избытка показана в последнему столбце в процентах. Величина *Q* вычисляется по формуле

$$Q = \frac{D-E}{(D+E)/2}. \qquad (2)$$

В знаменателе выражения (2) стоит среднее от суммы дефицита *D* и избытка *E*.

Оценки, приведенные в таблице, показывают, что дефицит озона *D* в полярной области и его избыток *E* в умеренных широтах практически совпадают, а величина *Q* имеет тот же порядок, что и погрешность измерений. Исключение составляют 1991 и 2015 гг., когда *Q* равнялось 43,7 % и 70,9 % соответственно. По-видимому, это связано с деятельностью вулканов Пинатубо и Кальбуко. Во время вулканической активности происходит выброс продуктов извержения (например, двуокиси серы), которые могут разрушать озоновый слой [7]. Извержение вулкана Пинатубо (15,07° с. ш.; 120,21° в. д.) с индексом VEI = 6 баллов (Volcanic Explosivity Index) произошло на Филиппинах 12 –17 июня 1991 г. Извержение вулкана Кальбуко (41,326° ю. ш.; 72,614° з. д.) с индексом VEI = 4 балла произошло в Чили 22–30 апреля 2015 г. Эти события могли привести к частичному разрушению озона в Южном полушарии.



а *б*

Рис. 2. Отклонение содержания озона от порогового ОСО в полярных и умеренных широтах Южного полушария

Таблица

Результаты исследований зонального ОСО за 1985–2015 гг.

Год	X_0, е.Д.	D, е.Д.	E, е.Д.	Q, %
1987	305,7	151,8	153,6	–1,2
1989	312,9	149,1	152,4	–2,2
1990	304,4	138,1	135,4	2,0
1991	311,2	130,5	203,5	–43,7
1999	299,2	161,5	151,6	6,3
2005	302,3	128,5	130,4	–1,4
2010	295,7	121,7	115,9	4,9
2013	295,5	89,7	98,1	–8,9
2014	302,8	123,6	129,8	–4,9
2015	296,5	198,3	94,5	70,9

К сожалению, не за все годы удалось выполнить анализ соответствия дефицита и избытка озона. Главная причина – частичное или полное отсутствие данных об ОСО. Например, в 1993–1995 гг. эти данные отсутствуют полностью. Недостаток данных не позволяет корректно выбрать временной интервал ΔT и пороговое значение X_0.

В ходе выполнения работы скорректирован архив зональных ОСО для Южного полушария за 1985–2015 гг. с учетом сферичности Земли. Создана методика оценки дефицита озона в полярной области и его избытка в умеренных широтах Южного полушария во время существования АОД.

Проведены оценки, показывающие, что во время существования Антарктической озоновой дыры дефицит озона в полярной области и его избыток в умеренных широтах Южного полушария практически совпадают. Оценки разности дефицита и избытка в большинстве случаев имеют тот же порядок, что и погрешность измерений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что Антарктическая озоновая дыра – это естественное геофизическое образование. В начале весны из полярной области происходит отток молекул озона, образуется озоновая аномалия. В умеренные широты поступает озон, его общее содержание возрастает и формируется кольцо с повышенным ОСО. В октябре – ноябре происходит обратный динамический процесс, из кольца молекулы озона переносятся в полярные широты.

Список литературы

1. Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D. Large Losses of Total Ozone in Antarctica Reveal Seasonal ClO/NO_2 Interaction. // Nature. 1985. Vol. 315. P. 207–210.

2. Ozone Watch. URL: http://www.ozonewatch.gsfc.nasa.gov.

3. Stolarski R.S., Schoeberl M.R. Further interpretation of satellite measurements of Antarctic total ozone // Geophys. Res. Lett. 1986. Vol. 13, № 12. P. 1210–1212.

4. Emergence of healing in the Antarctic ozone layer / Solomon S. [et al.] // Science. 2016.

5. NASA. URL: ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/.

6. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 221 с.

7. Зуев В.В., Зуева Н.Е. Вулканогенные возмущения стратосферы – главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 30–34.

УДК 631.6:556.1:528.8

Е.А. Дунаева, Е.С. Головастова,
В.В. Вечерков, В.В. Попович

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма,
Симферополь, Россия, e-mail: water_crimea@hotmail.com

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ПОСЕВОВ

Целью данной работы является оценка потенциала совместного использования данных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для сельскохозяйственного мониторинга. Исходными данными послужили снимки, полученные при съемке территории с БПЛА DJI Phantom4 с пространственным разрешением 0,8 м, спутниковые снимки Landsat-8 Oli/TIRS и Sentinel-2A. В исследовании рассмотрены возможности совместного использования данных аэрофотосъемки и данных ДЗЗ с применением ПО QGIS 2.14 Essen, сервиса Maps Made Easy и сервиса Вега-Science.

Ключевые слова: БПЛА, ДЗЗ, ГИС, мониторинг, сельскохозяйственная культура, NDVI, Вега-Science.

Совместное использование современных средств информации, таких как данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является актуальным, так позволяет провести оценку состояния растительности с различным пространственным и временным разрешением с потенциальной возможностью их дальнейшей интеграции.

В последние годы существенно возросло использование БПЛА и область применения таких приборов для дистанционного зондирования Земли и сбора научных данных достаточно обширна: картирование пастбищ и сенокосов [1], оценка гидрологических параметров [2], точное земледелие [3; 4], картирование пожаров [5], оценка потенциальной урожайности и биомассы сельскохозяйственных культур [6–8], мониторинг чрезвычайных ситуаций [8; 9]. Совместное использование данных

© Е.А. Дунаева, Е.С. Головастова, В.В. Вечерков, В.В. Попович, 2018

различных источников имеет большой потенциал для оценки сельскохозяйственных посевов. Вопросам взаимосвязи между данными БПЛА и данными дистанционного зондирования Земли посвящен целый ряд исследований [10; 11].

Целью данной работы является оценка потенциала совместного использования данных БПЛА и ДЗЗ для сельскохозяйственного мониторинга.

Исследования проводились на землях сельскохозяйственного назначения ФГБУН «НИИСХ Крыма» в Крымскорозовском сельском поселении Белогорского района и Клепининском сельском поселении Красногвардейского района.

Материалы и методы исследования. Исходными данными послужили снимки, полученные при съемке территории с БПЛА DJI Phantom4 с пространственным разрешением 0,8 м. К достоинствам данного беспилотного аппарата можно отнести: разрешение камеры – 12,4 Мп (разрешение фотосъемки – 4 000×3 000 пикселей), угол обзора камеры – 94°, время полета – 28 мин, интеллектуальный контроль ориентации [12]. Съемка земель в Красногвардейском и Белогорском районах производилась 1 июня и 1 августа 2017 г. соответственно. В данном исследовании применялись методы сбора и анализа исходных данных, картографический метод. При выполнении работ были использованы программный продукт QGIS 2.14 Essen со встроенным плагином OpenStreetMap и онлайн-сервис Maps Made Easy. Также использован сервис Вега-Science [13] для загрузки спутниковых снимков Landsat-8 Oli/TIRS и Sentinel-2A, и проведения расчета индекса NDVI.

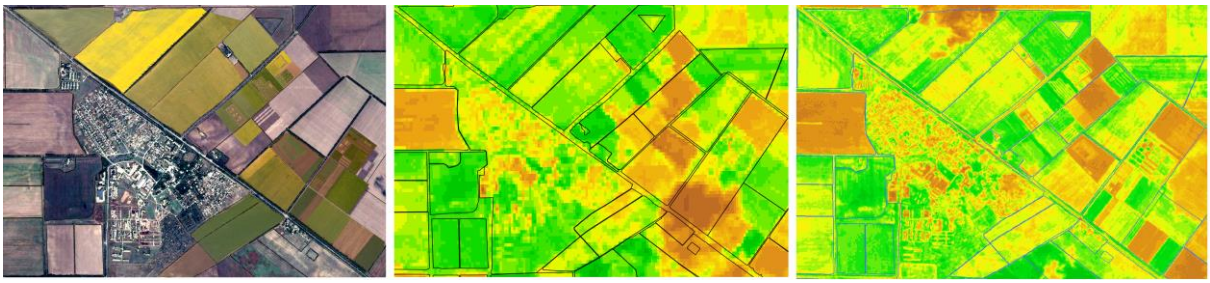
Результаты и их обсуждение. Обработка аэрофотоснимков осуществлялась в два этапа. Первый этап заключался в обработке первоначальных снимков, полученных с БПЛА в формате *.dng. В результате были получены выходные растровые изображения формата *.jpeg, пространственно-ориентированные в глобальной системе координат WGS-84. На втором этапе проводилась географическая привязка снимков в программе Maps Made Easy и QGIS 2.14 [14].

В программе Maps Made Easy доступны 4 способа привязки полученных снимков. В работе использовались методы привязки изображений Georeferenced w/Basemap и Stitched Imagery. Первым шагом является загрузка снимков, которых должно быть не менее трех и они должны иметь 60%-ное перекрытие. По выбранным снимкам программа автоматически определяет разрешение камеры, размеры снимков в пикселях и координаты снятой территории. Затем необходимо самостоятельно установить точки привязки на аэроснимках и на карте с помощью кнопки «Add New GCP». Важным аспектом является то, что необходимо указать 3 точки географической привязки, дважды предоставляющих одни и те же координаты. После выполнения данной операции необходимо нажать кнопку «Upload Now» для вывода склеенного изображения. Результат привязки отправляется на указанный адрес электронной почты. Привязка осуществилась с большим погрешностями, причиной этому могла послужить некорректная съемка (разный ракурс съемки, расположение оси снимка не перпендикулярно к поверхности Земли).

В программе QGIS 2.14 привязка проводилась при помощи модуля географической привязки Georeferencer GDAL. После его запуска, в появившемся окне подгружается необходимый растровый файл с указанием локальной системы координат WGS 84/UTM zone 36N (для степной части Крыма). Для привязки данного файла требуется последовательное установление контрольных точек на растре и соответствующих им точек в области карты, указываются параметры преобразования для привязки. Вследствие того, что исходные растровые изображения были сняты не под углом 90° к горизонту, был выбран тип трансформации Thin plate spline и метод интерполяции – Nearest Neighbour. Пиксели с нулевыми значениями за границами изображения устранены с использованием функции Clipper с режимом обрезки Layer Mask. Обрезанные снимки объединены в композиционное изображение с по-

мощью функции Merge, при этом файлы автоматически сохраняются в формате *.vrt, после чего конвертируются в *.geotiff.

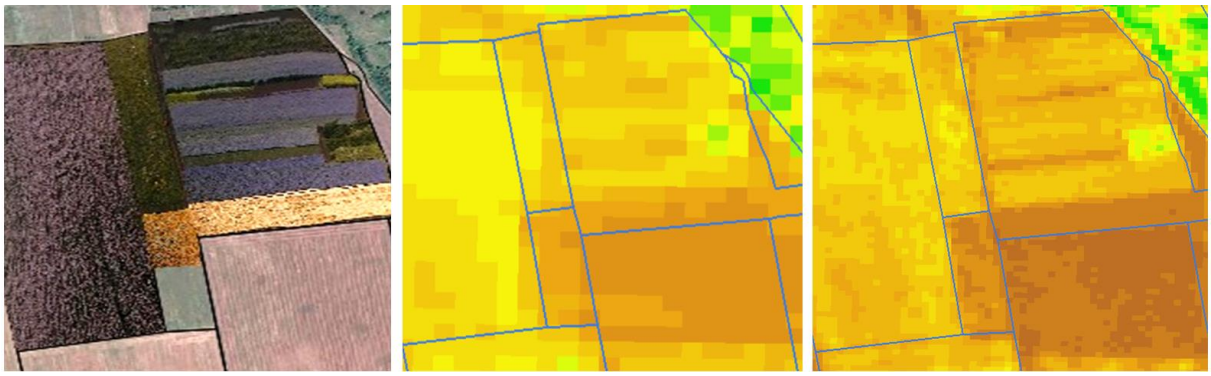
Привязанные аэрофотоснимоки с обработанными данными NDVI представлены на рис. 1 и 2 соответственно.



а *б* *в*

Рис. 1. Сельскохозяйственные земли ФГБУН «НИИСХ Крыма» (Красногвардейский район):
а – аэрофотосъемка; *б* – NDVI, OLI-TIRS (USGS); *в* – NDVI, MSI (ESA), 17.05.2017

Совместное использование данных БПЛА позволило скорректировать информацию о структуре посевов и уточнить классификацию сельскохозяйственных культур, получить данные об участках с депрессивным состоянием посевов, определить динамику NDVI на этих участках и его отклонения от средних значений по полю для данной культуры. Период времени с середины мая по середину июня в степной части Крыма, как правило, характеризуется интенсивной облачностью (более 5 %), что не позволяет получать достаточное количество качественных спутниковых снимков для обработки информации по исследуемой территории.



а *б* *в*

Рис. 2. Сельскохозяйственные земли ФГБУН «НИИСХ Крыма» (Белогорский район):
а – аэрофотосъемка; *б* – NDVI, OLI-TIRS (USGS), 05.08.2017; *в* – NDVI, MSI (ESA), 05.08.2017

Также для территорий исследования были получены проекционные покрытия сельскохозяйственных культур на полях за конкретную дату, что позволило провести оценку связи параметров биопродуктивности с вегетационными индексами.

Приведенные примеры показывают возможность уточнения распределения спутниковых данных с использованием БПЛА. Так как значения NDVI имеют достаточную высокую степень связи с урожайностью [15; 16 и др.], что позволит уточнить уровень биопродуктивности и соответственно улучшить прогноз урожайности, в том числе уточнить параметры агрогидрологических моделей (см. рис. 3) в данной фазе развития растений.

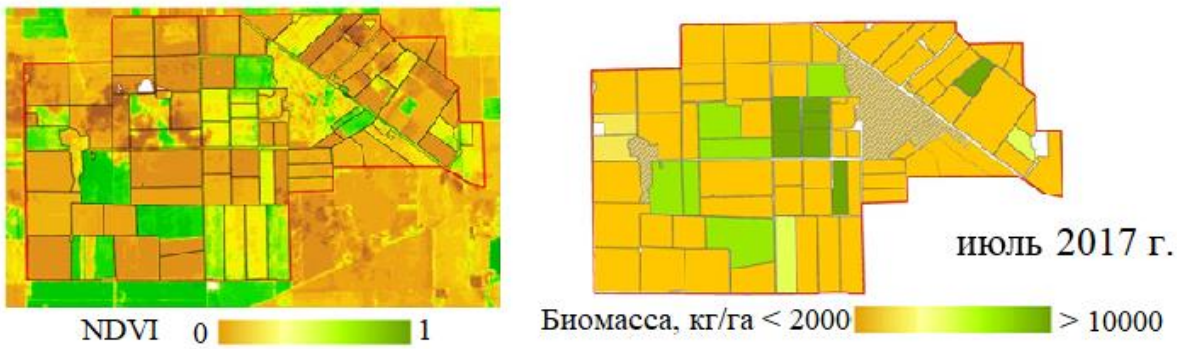


Рис. 3. Сравнение данных NDVI и биомассы

Заключение. Предварительная апробация совместного использования данных БПЛА и ДЗЗ для территории степной и предгорной зон Крыма показала потенциал данного направления для решения задач сельского хозяйства. В результате работ установлено, что для корректного создания цифровой карты по данным БПЛА необходимыми элементами являются всесторонняя съемка территории объекта, соблюдение требования перпендикулярности аппарата к горизонтальной поверхности, а также перекрытие соседних снимков на 60–80 %, что дает возможность проводить соответствующую корректировку для минимизации искажений.

Список литературы

1. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. Earth Surf. Proc. Land, 32 / J. Lejot, C. Delacourt, H. Piegay [et al.]. 2007. P. 1705–1725.

2. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. Precis. Agric., 6. / E.R. Hunt, M. Cavigelli, C.S.T. Daugherty [et al.]. 2005. P. 359–378.

3. Salamí E., Barrado C., Pastor E. UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas, Remote Sens., 6. 2014. P.11051–11081.

4. Homainejad N., Rizos C. Application of multiple categories of unmanned aircraft systems (UAS) in different airspaces for bushfire monitoring and response, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug. – 02 Sep. 2015, Toronto, Canada, XL-1/W4. 2015.

5. Swain K.C., Thomson S.J., Jayasuriya H.P.W. Adoption of an unmanned helicopter for low-altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop. Trans. ASABE, 53. 2010. P. 21–27.

6. Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery. Remote Sens. Environ 114 / L. Suarez; P.J. Zarco-Tejada; V. Gonzalez-Dugo [et al.]. 2010. P. 286–298.

7. Modelling Relationship between NDVI and Climatic Variables Using Geographicaly Weighted Regression, Journal of Mathematical Sciences and Applications, 1/2 / U. Usman, S.A. Yelwa, S.U. Gulumbe, A. Danbaba. 2013. P. 24–28.

8. Kyoungah Choi, Impyeong Lee. A UAV based close-range rapid aerial monitoring system for emergency responses, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-1/C22, ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14–16 September 2011, Zurich, Switzerland. 2011. P. 247–252.

9. Begni G., Escadafal R., Fontannaz D., Hong-Nga Nguyen A.-T. Remote sensing: a tool to monitor and assess desertification, Les dossiers thématiques du CSFD, 2, 2005. 44 p.

10. Ho Pei-Gee Peter (ed.), Geosciences and Remote Sensing, InTech, 2009. 598 p.

11. Laliberte Andrea S., Goforth Mark A., Steele Caitriana M., Rango Albert, 2011, Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments, Remote Sens. 2011. № 3 (11). P. 2529–2551.

12. Phantom comparison. URL: https://www.dji.com/phantom-4-pro.

13. Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, В.А. Толпин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 215–232.

14. Дунаева Е.А, Головастова Е.С, Вечерков В.В. Мониторинг сельскохозяйственных земель использованием аэрофотосъемки // Материалы III межрегион. с междунар. участием научно-практической конференции «Тенденции, направления и перспективы развития экономических отношений в современных условиях хозяйствования»: сб. тр. Симферополь, 2018. С. 305–308.

15. Береза О.В., Страшная А.И., Лупян Е.А. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 18–30.

16. Дунаева Е.Е. Апробация агрогидрологической модели SWAT для моделирования биопродуктивности посевов // Коняевские чтения: сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. (13–15 декабря 2017 г.). Екатеринбург: Уральский ГАУ, 2018. С. 245–248.

УДК 551.589.1

Д.А. Жохова, И.В. Кужевская, В.В. Чурсин

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия, e-mail: darijazhohova@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО И ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ДНИ МЕСТНОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА

В результате исследования термических условий в слое от поверхности Земли до 200 гПа по данным спутникового и аэрологического зондирований выявлены различия вертикальных и горизонтальных градиентов при местном циклогенезе для теплого и холодного периодов года. Получены различия для теплого и холодного периодов в локализации районов и типов циклогенеза.

Ключевые слова: циклогенез, Западная Сибирь.

Введение. Представления о механизме возникновения циклонов до XX в. не отличались ясностью и были весьма упрощенными. В XX в. были развиты термическая (конденсационная), механическая, волновая, дивергентная, адвективно-динамическая теории формирования циклонов, которые были более подробными, но продолжали быть недостаточно полными, и не учитывали всех факторов. К настоящему времени установлено, что подавляющее большинство циклонов, которые возникают в умеренных широтах, является фронтальными волновыми возмущениями. Такие циклоны являются важнейшим элементом общей циркуляции атмосферы [1], на фоне которых над различными районами могут формироваться циклоны меньшего масштаба, так называемые мезовихри [2], или местные циклоны (МЦ). В таких циклонах погода становится неустойчивой, возможно выпадение значительного количества осадков, усиление контрастов температуры и давления. Как правило,

© Жохова Д.А., Кужевская И.В., Чурсин В.В., 2018

с местными циклонами часто связаны ошибки в прогнозах метеорологических полей, так как расположение центра такого барического образования трудно выявляется и прогнозируется. Это вносит значительные ошибки в оправдываемость региональных прогнозов. Причиной тому служат особенности проявления местного циклогенеза и редкая, для значительной территории Западной Сибири, сеть метеорологических станций, не позволяющая получать достоверную информацию о полях метеорологических величин с достаточным разрешением.

В связи со сказанным актуально более подробно исследовать условия образования МЦ над Западной Сибирью. Особенно если обратить внимание на то, что одним из активных очагов местного циклогенеза является междуречье Обь – Иртыш. Известно, что число циклонов, возникших непосредственно над территорией Сибири, составляет примерно 20 % от всех циклонов, определяющих погоду этой территории.

Целью настоящего исследования является изучение вертикальной и горизонтальной структур распределения температуры в свободной атмосфере до высоты 500 гПа, и характеристик облачности, сопряженной с МЦ до высоты 200 гПа. Территория исследования ограничена 50–64° с. ш. и 60–90° в. д., для исследования был выбран 2016 г., как один из аномальных лет, в течение которого наблюдалось 34 местных циклона, при среднем многолетнем значении около 25 МЦ в год.

Исследуемая территория занимает обширные пространства от Большого Васюганского болота на севере до степей юга Сибири и севера Казахстана, от междуречья Обь – Иртыш на западе до Среднесибирского плоскогорья и гор Алтая на востоке. Все это, в свою очередь, определяет наличие разных температурно-влажностных условий подстилающей поверхности, имеющих огромное значение для формирования и развития местных циклонов [3].

Исходные данные и методика обработки. Развиваемый в настоящей работе методический подход, базируется на анализе территориального распределения МЦ по данным приземных синоптических карт, приземных кольцевых карт погоды, а также карт барической топографии за основные метеорологические сроки (00, 06, 12 и 18 ч UTC) архива данных Западно-Сибирского регионального информационно-вычислительного центра. Термические условия подстилающей и облачной поверхностей были проанализированы на основе результатов спутникового зондирования радиометра MODIS [4], установленного на спутниках TERRA/AQUA. Также изучены результаты аэрологического зондирования атмосферы на станциях, расположенных в непосредственной близости от очага формирования МЦ, для расчета вертикального температурного градиента (500/1000 гПа).

В качестве местных циклонов рассматривалась область пониженного давления при наличии хотя бы одной замкнутой изобары с характерной циркуляцией и структурой метеорологических полей. Рассматривались только те барические образования, которые обнаруживались на кольцевых картах погоды не менее четырех соседних сроков, а на приземных синоптических картах – не менее двух сроков. Для данных циклонов оценивались такие характеристики, как их число, среднее давление в центрах и продолжительность влияния на исследуемую территорию. Сопоставлялись результаты анализа приземных синоптических, кольцевых карт погоды с картами барической топографии.

В ходе исследований все образовавшиеся циклоны были изучены по ряду признаков: по характеру синоптической ситуации, на фоне которой они образуются; по району локализации центра; высоты развития облачности и вертикального градиента температуры в толще атмосферы. Условия циклогенеза рассматривались как в целом для 2016 г., так и отдельно для теплого (апрель – октябрь) и холодного (ноябрь – март) периода [3].

Результаты исследования. Анализируя внутригодовое распределение местных циклонов (рис. 1), удалось выявить значительное увеличение их повторяемости в апре-

ле (7 случаев) и декабре (9 случаев), причем средняя продолжительность жизни МЦ в эти месяцы составляет 2-3 дня. В эти же месяцы фиксировались сильные температурные аномалии практически по всей территории Западной Сибири.

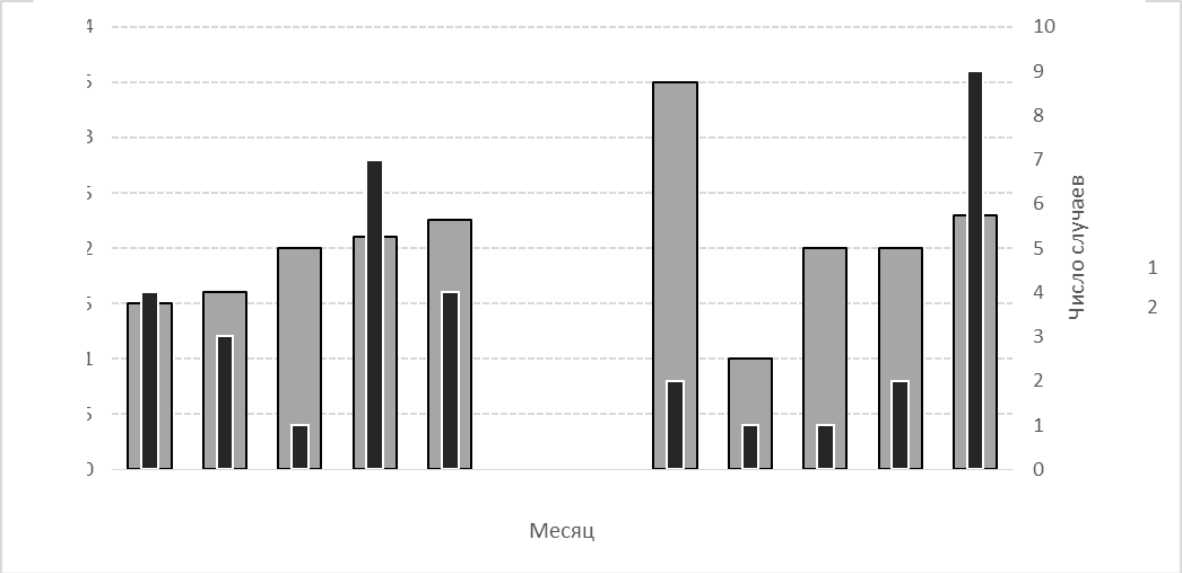


Рис. 1. Годовой ход повторяемости МЦ (*2*) и их средняя продолжительность (*1*)

Это связано с тем, что в декабре 2016 г. циклоническая деятельность в Западной Сибири ослабила северную и западную периферии Сибирского максимума (аномалия давления –7 гПа). Площадь, занятая антициклоном, была меньше, чем обычно. Однако, очень активными, в течение всего месяца, оставались его восточные и северо-восточные гребни, которые распространялись далеко на север (аномалия 5 гПа над полуостровом Таймыр). На этом фоне в середине месяца в ряде пунктов были установлены новые рекорды суточного максимума температуры воздуха до +2 ºС. При этом, в декабре 2016 г. отмечалась неустойчивая погода с резкими колебаниями температуры воздуха по территории юга Западной Сибири, температурные контрасты днем могли составлять от –5...–10 до –25...–30 ºС. Осадки в виде снега выпадали часто, в отдельные дни до 9 мм [5].

В апреле 2016 г. аномалия температуры воздуха для юга Западной Сибири составила +2 ºС, и для целого ряда станций произошло обновление суточных максимумов. Так, 21 апреля 2016 г. на станциях Новосибирск, Барнаул и Кемерово максимальная температура воздуха превысила свой исторический максимум более чем на 1 ºС. Такие условия сформировались на фоне аномалий циркуляции атмосферы. Положение высотной фронтальной зоны в апреле 2016 г. значительно отклонялось от климатического, и на севере Западной Сибири эти отклонения составили 10º. Интенсивность зональной циркуляции в средней тропосфере была меньше нормы, а меридиональный перенос был интенсивнее обычного [5]. Наибольшая продолжительность жизни МЦ зафиксирована в августе и составила 4 дня, при наличии двух МЦ в этом месяце. Особенностью 2016 г. является отсутствие МЦ в июне и июле, в то время как, в среднем в эти месяцы образуется по 2–3 циклона ежегодно.

При анализе территориального распределения очагов формирования МЦ (рис. 2) можно заметить, что в холодный период года (ноябрь-март) формирование МЦ происходит, в основном, в ложбинах основного циклона. Оказалось, что сформировавшиеся МЦ локализованы между 53 и 56º с. ш. В теплый период года (апрель – октябрь) значительно преобладают волновые циклоны, расположенные в ложбине основного.

Как можно заметить (рис. 2), распределение очагов формирования в теплый период имеет меридиональный характер.

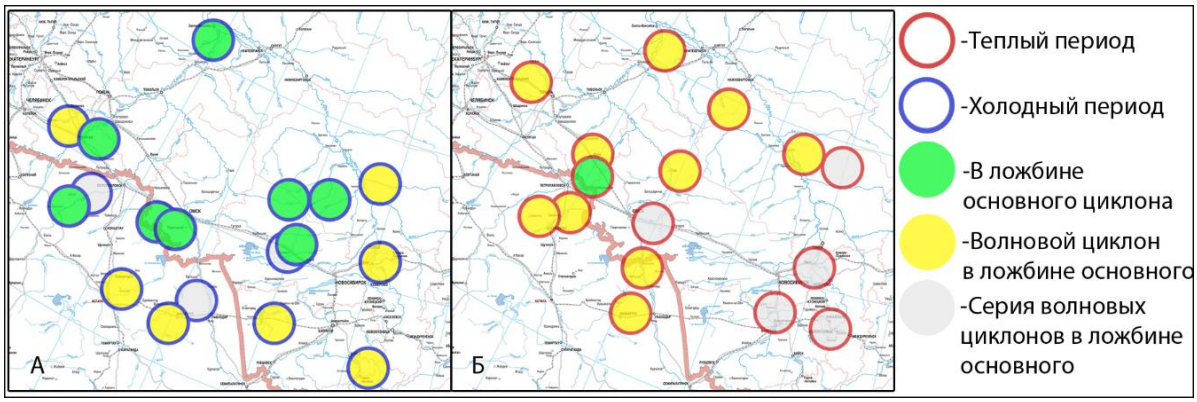


Рис. 2. Распределение очагов формирования МЦ над рассматриваемой территорией

Это обусловлено термическим фактором, тепло- и влагообменом с подстилающей поверхностью, поскольку их роль в этом случае очень велика. При перемещении на теплую поверхность холодная и сухая воздушная масса насыщается теплом и влагой. Быстрое образование облачности с выделением скрытого тепла может привести к развитию глубокой конвекции и образованию МЦ. Как правило, такие циклоны являются результатом возникновения на тропосферном фронте динамически неустойчивых бароклинных волн. Бароклинная неустойчивость определяется как динамическая неустойчивость в основном зональном переносе и связана с наличием меридионального градиента температуры, и, как следствие, термического ветра [6].

В нашем случае средний меридиональный градиент температур в первый день образования МЦ над рассматриваемой территорией в теплый период составляет 12 ºС на 100 км, а в холодный 7 ºС на 100 км, что свидетельствует о том, что в летний период наблюдаются большие горизонтальные контрасты температур. Это обусловлено неоднородностью подстилающей поверхности и, как следствие, неоднородным нагревом приземного слоя воздуха. В холодный период, когда большая часть территории покрыта снегом, горизонтальные градиенты температуры, соответственно, меньше. При анализе вертикального профиля температуры воздуха в дни с МЦ было обнаружено, что в теплый период вертикальный градиент в слое от поверхности Земли до высоты 500 гПа составляет 34 ºС, а в холодный – 24 ºС, что является важнейшим фактором циклогенеза.

Заключение. Подчеркнем, что исследованный 2016 г. являлся аномальным в температурном режиме для территории Западной Сибири. Так, в этом году апрель и сентябрь были отмечены как наиболее теплые, а ноябрь как аномально холодный месяцы. В декабре, в отдельные дни, среднесуточная температура превышала норму на 20 ºС и более.

Несмотря на то, что в среднем в большинстве месяцев замечено образование, как минимум, одного местного циклона, во внутригодовом ходе максимум повторяемости (7–9 циклонов) приходится на апрель и декабрь. Средняя продолжительность влияния местных циклонов на погоду в эти месяцы достигает 2 дня. Минимум повторяемости приходится на март, сентябрь и октябрь (1 циклон за месяц). Средняя продолжительность варьируется от 1 до 2 дней. В летние месяцы (июнь, июль) образование МЦ не наблюдалось.

Местные циклоны в теплый период, в основном, формируются в междуречье Обь – Иртыш, имеют волновой тип циклогенеза и меридиональную локализацию. При этом, меридиональный градиент температуры в первый день образования МЦ в теплый

период составляет 12 ºС на 100 км, а в холодный 7 ºС на 100 км. В дни с МЦ было обнаружено, что в теплый период вертикальный градиент в слое от поверхности Земли до высоты 500 гПа составляет 34 ºС, а в холодный – 24 ºС, что является важнейшим фактором циклогенеза.

Список литературы

1. Kalinin N.A. Monitoring, modelirovanye i prognoz sostojanya atmosfery v umerennykh shirotakh [Monitoring, modeling and prediction of atmospheric conditions in temperate latitudes], Perm State University. Perm, 2015. 308 p.
2. Thermodynamic Conditions of Mesoscale Convection Formation in the Atmosphere over West Siberia / V.P. Gorbatenko, D.A. Konstantinova, O.I. Zolotukhina, E.L. Tunaev // Izvestiya Vuzov. Fizika. 2011. Vol. 54, № 11/3. P. 148–156.
3. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976-2015 гг. / Тр. Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, 2017. № 364. С. 81–92.
4. MODIS. URL: https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov.
5. Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2016. № 7; 2017. № 3.
6. Hoskins B.J., West N.V. Baroclinic waves and frontogenesis. P. II: Uniform potential vorticity jet flows – Cold and warm fronts // J. Atmos. Sci. 1979. № 36. P. 1663–1680.

УДК 551.515.6

В.А. Жукова

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия, e-mail: jukowa.vera2017@yandex.ru

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ОБЛАЧНЫЕ СИСТЕМЫ НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ

Получены значения повторяемости и локализации по территории Западной Сибири мезомасштабных облачных элементов при использовании изображений облачного покрова с космических аппаратов Aqua/MODIS и Terra/MODIS за теплый период с 2008 по 2017 г.

Ключевые слова: мезомасштабный конвективный комплекс, мезовихри, линии шквалов, спутниковая информация.

На сегодняшний день отмечается хорошо выраженная тенденция увеличения частоты появления конвективной облачности и суммы осадков за теплый период на территории Западной Сибири [4]. Анализ и прогноз мезомасштабных облачных систем (МОС) представляет наибольший интерес для практики, так как с ними могут быть связаны опасные явления погоды, причиняющие значительный материальный ущерб.

Целью работы является изучение повторяемости мезомасштабных облачных элементов на территории Западной Сибири.

В качестве объектов исследования были выбраны: мезомасштабный конвективный комплекс (МКК), линии шквалов (ЛШ) и мезомасштабные вихри (МВ).

По мнению Н.Ф. Вельтищева [3], наилучшее представление об эволюции конвективных систем дают снимки с геостационарных спутников. Данные обычных наблюдений в свободной атмосфере (радиозондирования) не обеспечивают необходимого

© Жукова В.А., 2018

пространственно-временного разрешения для составления прогноза развития конвекции. В свою очередь, на территории Западной Сибири наиболее доступными являются данные наблюдений с полярно-орбитальных спутников, например, с космических аппаратов Terra, Aqua и NOAA. С их помощью проводится мониторинг и своевременное оповещение о зарождении и приближении объектов мезомасштаба. На спутниках Terra и Aqua одним из ключевых приборов является спектрорадиометр MODIS, который имеет 36 каналов и позволяет производить регулярную съемку территории с пространственным разрешением от 250 до 1 000 м [6].

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- дешифрировать отдельные облачные составляющие мезомасштабной конвективной системы;
- рассчитать повторяемость МКК, линий шквалов и мезовихрей;
- проанализировать динамику и пространственное распределение наблюдаемых облачных элементов.

МКК выделяется в классификации Р.А. Мэддокса как отдельная составляющая и определяется как комплекс кучево-дождевых облаков, инфракрасные изображения которых имеют: площадь непрерывного облачного покрова с температурой верхней границы ниже –32 ºС составляет не менее 10^5 км^2; площадь внутреннего района с температурой верхней границы ниже –52 ºС не менее $5 \cdot 10^4$ км^2; в период максимального развития отношение малой оси облачной системы к большой не менее 0,7. Жизненный цикл МКК составляет около 16 ч, его влияние на условия погоды может ощущаться до 24–36 ч.

Линия шквалов (ЛШ) представляет собой зону из скопления кучево-дождевых облаков. Протяженность ее достигает тысячи километров, а ширина – 50–100 км. Время жизни линии шквалов может составлять более суток, а время жизни отдельных мезомасштабных скоплений, из которых она состоит, не превышает обычно 5–6 ч.

Мезомасштабными вихрями (МВ) называют циклонические циркуляции в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами 100–500 км, в отдельных случаях они достигают 1 000 км, которые зарождаются и существуют вне связи с фронтальными системами синоптического масштаба. Время жизни вихрей составляет 1–2 суток.

В качестве материалов для исследования были использованы изображения облачного покрова с космических аппаратов (КА) Aqua/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и Terra/MODIS [1], за теплый период с 2008 по 2017 г. на территории Западной Сибири. Территория исследования была условно поделена на шесть секторов (рис. 1) для удобства определения расположения облачного элемента.

При анализе было выявлено, что наибольшая повторяемость среди исследуемых элементов приходится на МКК и скопления кучево-дождевых облаков, затем на ЛШ, и наименьшую повторяемость имеют МВ.

В секторах 1 и 2 мезомасштабных элементов не наблюдалось и в дальнейшем анализе эти сектора не рассматриваются.

Проанализировав повторяемость МКК и скоплений кучево-дождевых облаков, можно выделить 2015 г. как год с наибольшей повторяемостью дней с МКК практически на всей исследуемой территории, за исключением сектора 6. Максимум дней с МКК и скоплениями кучево-дождевых облаков за исследуемый период на территории Западной Сибири наблюдается в секторе 6 и составляет 57 дней. В свою очередь, максимум повторяемости дней с ЛШ отмечается в 2016 г., наблюдаемый по всей территории, кроме сектора 5. Их максимальная повторяемость составляет 32 дня в секторе 6. Мезовихри в сравнении с МКК и ЛШ в 3–5 раз встречаются реже. Частота их появления не превышает 10–11 дней.

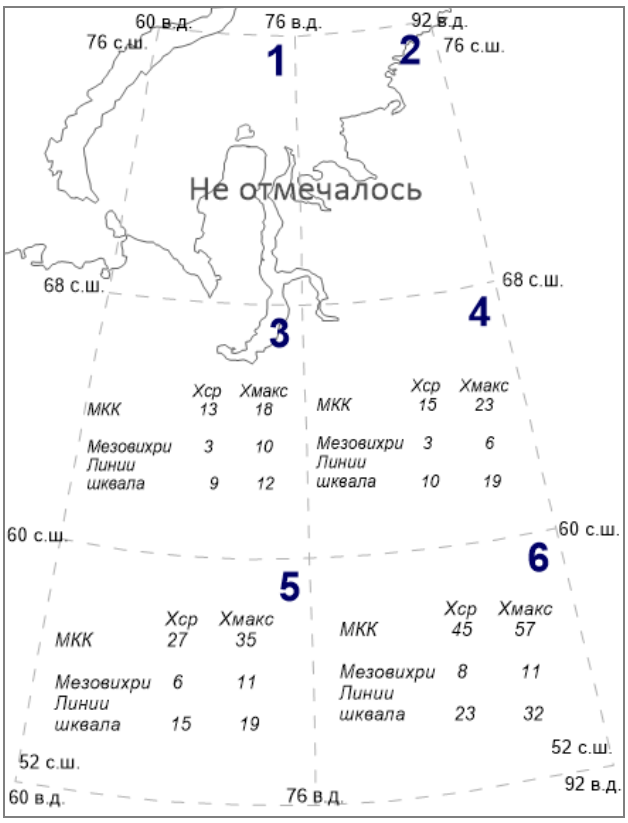


Рис.1. Число случаев мезомасштабной облачности за теплый период с 2008 по 2017 г. на территории Западной Сибири

Исходя из многолетних наблюдений по климатическим данным [2], в секторах 5 и 6, закономерно прослеживается больше мезомасштабных элементов. Для этой территории характерно размытое барическое поле в летние месяцы. Анализируя метеорологические характеристики можно отметить, что направление ветра по всей территории не одинаковое. Так, например, в секторах 1 и 2 преобладает северо-восточное направление, в секторах 3 и 4 – северо-западное, а в секторах 5 и 6 северное и южное соответственно. Наиболее существенное влияние на распределение осадков имеют горы, окаймляющие Западно-Сибирскую низменность с запада и востока. Влияние Уральского хребта сказывается в общем уменьшении количества осадков вследствие осаждения океанической влаги на его западных склонах, а горная система Алтая служит мощным конденсатором влаги, значительная доля которой выпадает на его западных склонах и в предгорьях, и, таким образом, способствует усиленному увлажнению юго-восточной части Западной Сибири [5]. На основе этого можно сказать, что наибольшее количество осадков наблюдается на юго-востоке, в секторе 6. В секторе 5 количество осадков небольшое, что еще связано и с переходом от степной зоны северного Казахстана к заболоченной территории большого Васюганского болота.

В секторе 6 исследования объекты мезомасштаба имеет большую частоту проявлений по сравнению с другими секторами. В связи с этим была проведена оценка повторяемости МКК, ЛШ и МВ за теплый период с 2008 по 2017 г.

На рис. 2 можно заметить, что своего пика активности все наблюдаемые элементы достигают в июле, за исключением мезовихрей. Их максимум приходится на август и сентябрь. Интервал изменения МВ от 5 до 20 дней. Максимум повторяемости среди исследуемых элементов приходится на МКК. Их изменения колеблются в диапазоне 20–145 дней. Линия шквалов повторяет временной ход МКК, увеличиваясь к июлю и уменьшаясь к апрелю и сентябрю. Интервал их изменения 15–60 дней.

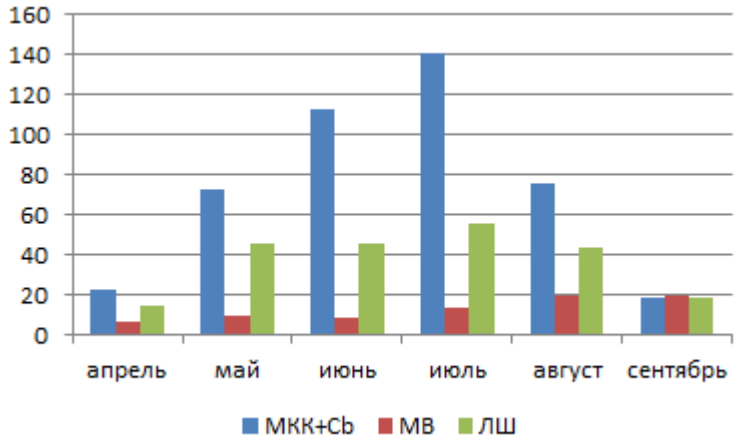


Рис. 2. Повторяемость мезомасштабной облачности в секторе 6 за теплый период с 2008 по 2017 г. на территории Западной Сибири

В качестве примера (рис. 3) был выбран день с наличием МКК, это 22 июня 2017 г. В этот день в Алтайском крае (села Налобиха и Полковниково Косихинского района) наблюдался град диаметром 30–50 мм [7]. На снимке отчетливо видна форма МКК, сопровождающих облака верхнего яруса.

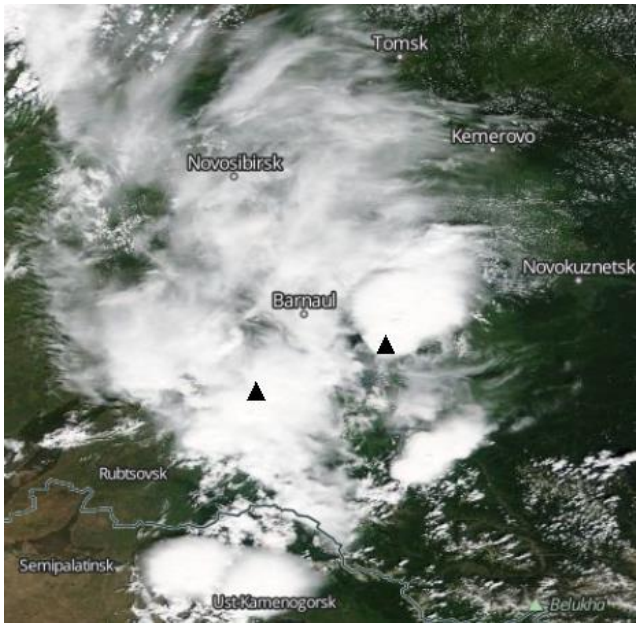


Рис. 3. Фрагмент спутникового изображения МКК с КА Terra спетрорадиометра MODIS за 22 июня 2017 г., время пролета 05:48 UTC

Заключение. Было выявлено, что максимальную повторяемость среди рассмотренных объектов имеют МКК и скопления кучево-дождевых облаков. При анализе был выделен 2015 г. как год с максимальной повторяемостью дней с МКК по всей территории за исключением юго-востока Западной Сибири. Вместе с тем был выделен и 2016 г., где отмечался максимум повторяемости дней с ЛШ по всей территории, кроме территории южнее 60° с. ш. и западнее 76° в. д. Все наблюдаемые элементы достигают своего пика активности в июле, кроме МВ, максимум повторяемости которых приходится на август и сентябрь.

Список литературы

1. EOSDIS Worldview. URL:https://worldview.earthdata.nasa.gov/.

2. Климат России / Н.В. Кобышева [и др.]. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 655 с.

3. Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. Сборник лекций: пособие для самостоятельной работы студентов. Л: Гидрометеоиздат, 1988. 136 с.

4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г.В. Алексеев, О.А. Анисимов [и др.]. М.: Изд-во «Росгидромет», 2014. 1008 с.

5. Орлова В.В. Климат СССР: Западная Сибирь. № 4. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 359 с.

6. Успенский А.Б., Кухарский А.В., Успенский С.А. Валидация результатов спутникового мониторинга температуры поверхности суши // Метеорология и гидрометеорология. 2015. С. 81–85.

7. Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации 2017 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 128–139.

УДК 631.5:528.88(571.151+571.513)

Е.Ю. Жукова

Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова, Абакан, Россия
e-mail: biosara@mail.ru

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЗАЛЕЖЕЙ НА ТЕСТОВЫХ УЧАСТКАХ В ХАКАСИИ ПО ДАННЫМ LANDSAT-8

Представлены данные общей продуктивности, скорости роста и сезонных изменениях NDVI растительности залежей Хакасии. Для отдельных сообществ установлена значимая корреляция между NDVI и суммой эффективных температур, наилучшие результаты дали применения полиномов. Для анализа состояния залежей эффективными в большинстве случаев оказались показатели интегрирования вегетационной кривой NDVI и скорость роста индекса. На основе этих показателей определены наиболее продуктивные сообщества.

Ключевые слова: *Ландсат 8, вегетационный индекс, Хакасия, залежи, сезонная динамика.*

Актуальная проблема в Хакасии – выявление современного состояния залежей, которые являются источником сорных растений и обладают определенным агропотенциалом. Изучение состояния, продуктивности и процессов восстановления растительности залежных земель имеет практическое значение для рационального использования сельскохозяйственных угодий. В связи с высокой динамичностью фитоценозов залежей под действием природных и антропогенных факторов, очевидной необходимостью является осуществление регулярного мониторинга данных объектов [1–3]. Рядом авторов подтверждены возможности спутникового мониторинга залежей, в частности по данным Landsat-8, для оценки площадей, состояния, динамики и продуктивности [4; 5]. Таким образом, представляется возможным осуществлять оперативный мониторинг состояния залежей в течение вегетационного сезона.

Цель работы: провести количественную оценку современного состояния растительных сообществ залежей на тестовых участках в Хакасии по данным Landsat-8.

Район исследования. Первый тестовый участок относился к Койбальскому предгорно-степному округу (с. Белый Яр), который располагается в пределах Южно-

© Жукова Е.Ю., 2018

Минусинской впадины, в северной части междуречья Абакана и Енисея. Ландшафт – равнинный, гидрографическая сеть в основном представлена реками Енисей и Абакан и их притоками с Западного Саяна. Почва на участке – чернозем обыкновенный, супесчаный, элювиальный, средняя степень эрозии. Зональную растительность составляют настоящие мелкодерновинные степи (*Festuca pseudovina, Koeleria gracilis, Poa botryoides, Stipa decipiens, Veronica incana, Lychnis sibirica, Potentilla acaulis, Aster alpinus, A. altaicus*, виды рода *Astragalus*) [6]. На этом участке возделываются овес, пшеница, кукуруза, рапс, гречиха, донник, костер. В этом районе произошло образование значительного количества залежей (демутаций), зарастание *Ulmus pumila.*

Второй тестовый участок принадлежит к Приабаканскому степному округу (Уйбатская степь). Ближе всего расположена река Енисей. Преобладают каштановые и южные черноземы. Типичны для округа мелкодерновинные настоящие степи (*Stipa decipiens*, *Festuca valesiaca, Koeleria gracilis* и *Cleistogenes squarrosa).* Менее распространены крупнодерновинные, настоящие, луговые и опустыненные степи. В луговой растительности отмечаются гликофитные пойменные и солончаковые луга [6].

Методика исследования. Для работы были использованы спутниковые изображения типа Landsat-8. Обработка данных включала следующие этапы: 1) радиометрическая коррекция данных в системе GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) ГИС (14.05.2015, 04.06.2017, 20.06.2017, 06.07.2017, 20.07.2013, 07.08.2017, 20.08.2016, 05.09.2016); 2) расчет спектрального индекса NDVI [7], построение вегетационных кривых объектов; 3) регрессионный анализ полученных данных в Microsoft Excel. Для работы использовались метеоданные с сайта https://rp5.ru/. Проводился подсчет среднесуточной температуры для получения данных о сумме положительных температур за период, предшествующий дате съемки.

На тестовых участках проводились многолетние описания растительности фитоценозов, их видовой состав, сезонная динамика, пространственная структура и продуктивность достаточно полно изучены [8; 9].

На первом тестовом участке обследованы 6 сообществ, их сезонная динамика по спектральным индексам имеет свои особенности (рис. 1).

Рис. 1. Вегетационная кривая NDVI растительности залежей, с. Белый Яр

Как видно из рис. 1, рост растений на многолетней кострецовой залежи, злаково-кострецовом и бурьянистом сообществах продолжается до начала августа и только затем

начинает снижаться, у остальных участков рост заканчивается в начале июля. Амплитуда максимальных значений – от 0,450 до 0,500. Следовательно, растительность на залежах устойчива к засухе, хоть и имеет невысокие относительно полей показатели продуктивности в начале сезона 0,300–0,350, это связано с тем, что на залежах формируется масса ветоши и растительного опада, которая задерживает рост растений и снижает показатель NDVI.

Также определили скорость роста (через прирост NDVI за сутки), этот показатель имел очень незначительные значения от 0,001 у полынно-злакового фитоценоза и был максимальным (0,003) для бурьянистой залежи.

Общая продуктивность сообществ определялась путем интегрирования вегетационной кривой NDVI. Самыми продуктивными оказались злаково-кострецовая донниково-кострецовая и бурьянистые залежи (42,6; 41,7 и 40,5), наименьшие показатели у полынно-злакового, кострецового и многолетнего кострецового сообществ (38,4; 38,5 и 39,1). Это согласуется с наземными данными, согласно которым наибольшую зеленую сырую фитомассу имели злаково-кострецовая и бурьянистая залежи.

Регрессионный анализ показал, что R-квадрат между NDVI и суммой положительных температур имел довольно высокие значения 0,779 (выборка 30, модель – полином) (рис. 2).

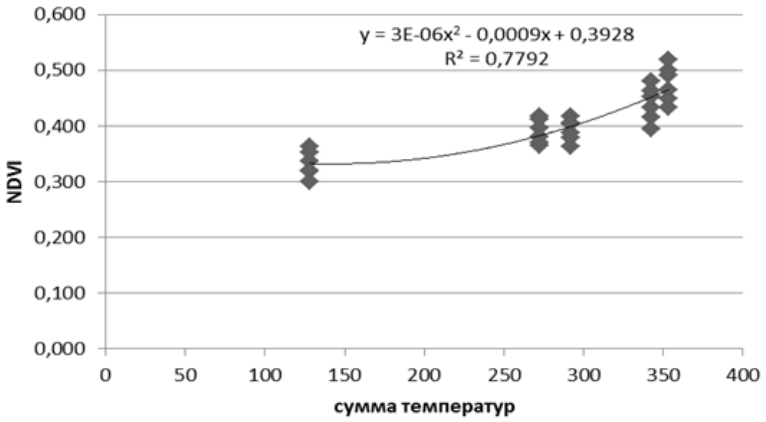


Рис. 2. Регрессия NDVI и суммы положительных температур залежей с. Белый яр

Второй тестовый участок (4 залежи) расположен в Сыдо-Ербинской котловине в окрестностях г. Черногорска. Вегетационная кривая представлена на рис. 3.

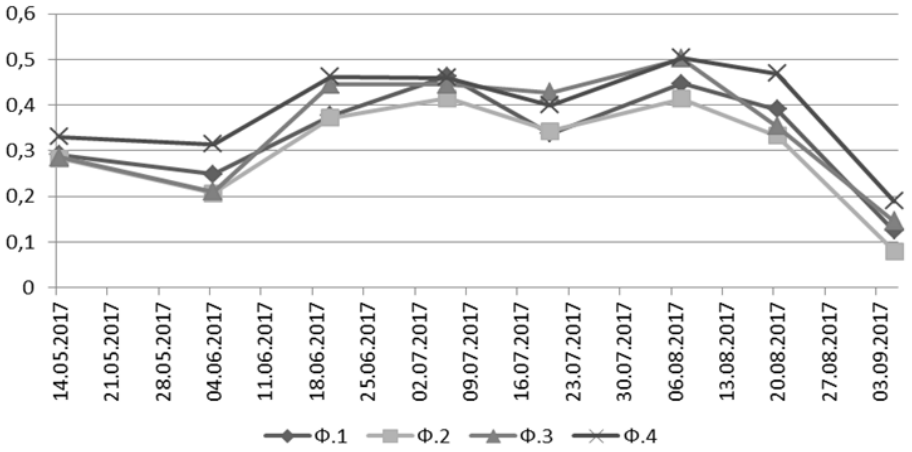


Рис. 3. Вегетационная кривая NDVI фитоценозов залежей в окрестностях г. Черногорска:
Ф.1 – разнотравно-лапчатко-вейниковый фитоценоз с примесью Ulmus pumila;
Ф.2 – разнотравно-полынно-вейниковый фитоценоз;
Ф.3 – разнотравно-полынно-мятликовый фитоценоз; Ф.4 – ползунково-ячменный фитоценоз

По данным Landsat-8 максимум фитомассы наблюдали в начале августа, в середине июля наблюдали падение показателя. В начале августа высокие значения вегетационного индексов (0,500) обнаружены у ползунково-ячменного и у разнотравно-полынно-мятликового фитоценоза. По наземным данным самой продуктивной является разнотравно-полынно-мятликовая залежь, но ее проективное покрытие меньше по сравнению с ползунково-ячменным сообществом, поэтому ее значение NDVI также меньше. Аналогичную ситуацию показывает интегралы NDVI: у четвертого и третьего сообщества наибольшие результаты – 47,3 и 42,3 соответственно, у первого и второго 40,2 и 36,5. Это подтверждает необходимость учета наземных данных для объяснения результатов сезонной динамики сообществ (в особенности проективного покрытия и количества зеленой и отмершей фитомассы).

Скорость развития фитоценозов залежей в окрестностях г. Черногорска значительная для всех рассмотренных сообщества и составляет 0,005 (у фитоценоза 4 – 0,03).

Корреляционно-регрессионный анализ NDVI и суммы положительных температур фитоценозов залежей в окрестностях г. Черногорска по линейному уравнению не выявил значимых закономерностей (R^2 менее 0,5).

Заключение. В результате проведенных исследований были получены количественные данные NDVI об общей продуктивности, скорости роста и сезонных изменениях растительности залежей. Для отдельных сообществ установлена значимая корреляция между NDVI и суммой эффективных температур, наилучшие результаты дали применение полиномов. Для анализа состояния залежей эффективными в большинстве случаев оказались показатели интегрирования вегетационной кривой NDVI и скорость роста индекса. На основе этих показателей определены наиболее продуктивные сообщества.

Список литературы

1. Кандалова Г.Т. Восстановление и использование растительности залежей Юга Средней Сибири в современных условиях // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 6. С. 51–53.

2. Кутькина Н.Ф., Еремина И.Г. Агропотенциал залежных земель в предгории Западного Саяна // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Современный взгляд на будущее науки». Пермь, 2016. С. 46–49.

3. Современное состояние освоения залежных земель в Республике Хакасия / Е.Я. Чебочаков, Н.А. Градобоева, В.Н. Муртаев, Н.Ф. Сиренева // Земледелие. 2016. № 6. С. 6–8.

4. Лежнин С.А. Мониторинг зарастающих сельскохозяйственных земель Республики Марий Эл по снимкам Landsat-8 // Сб. науч. ст. Поволж. гос. технологич. Ун-т; Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов. Йошкар-Ола, 2016. С. 192–199.

5. Терехин Э.А. Оценка спектрально-отражательных свойств залежных земель с использованием спутниковых данных // Научные ведомости Белгород. гос. ун-та. Серия «Естественные науки». 2017. Т. 38, № 4 (253). С. 161–168.

6. Растительный покров Хакасии / А.В. Куминова, Г.А. Зверева, Ю.М. Маскаев [и др.]. Новосибирск: Наука, 1976. 423 с.

7. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.

8. Жукова Е.Ю., Андрианова Е.А. Характеристика растительности залежных земель окрестностей г. Черногорска Республики Хакасия // Вестн. Хакас. гос. ун-та им. Н.Ф. Катанова. 2013. № 3. С. 9–13.

9. Жукова Е.Ю. Характеристика агроценозов Койбальской степи Республики Хакасия // Вестн. Хакас. гос. ун-та им. Н.Ф. Катанова. 2012. № 2. С. 9–10.

УДК 519.6

Н.Б. Захарова[1], А.Э. Зотов[2]

[1]Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия,
[2]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: zakharova_nb@mail.inm.ras.ru

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ О ТЕМПЕРАТУРЕ ПОВЕРХНОСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Работа посвящена обработке гидрофизических данных о состоянии морских акваторий. Обработаны данные дистанционного зондирования о температуре поверхности Балтийского моря за 1982–2017 гг. Проведен анализ полученной информации, показавший положительный тренд в температуре поверхности исследуемой акватории за последние десятилетия.

Ключевые слова: обработка данных, анализ данных, данные дистанционного зондирования, температура поверхности моря, Балтийское море.

Введение. В настоящее время активно идет развитие наблюдательных систем для мониторинга состояния окружающей среды, в связи с чем стремительно растет количество данных наблюдений. Океанология вступает в эпоху больших объемов данных с экспоненциальным ростом количества информации и развитием новых технологий ее получения, хранения и обработки. Большие объемы данных приносят в океанологию как новые возможности для получения ценной информации, так и трудности, связанные с ее обработкой, хранением и своевременным анализом. Наряду с увеличением количества данных, развиваются технологии для их обработки, позволяющие более эффективно обрабатывать информацию. В настоящей работе проводится обработка и анализ гидрофизических данных с применением современных технологий обработки информации.

Данные. В работе использовались данные европейского проекта «Коперникус» (http://www.copernicus.eu/), это международная программа по наблюдению за Землей, которая дает возможность для изучения, исследования, мониторинга окружающей среды. Программа включает как международные проекты и разработки ученых из разных стран по моделированию состояния окружающей среды, так и большой объем данных наблюдений за состоянием отдельных сред, полученный объединенными силами стран-участников. Проект обладает большим потенциалом и несет в себе много полезного знания и инструментария для исследователей в области моделирования и мониторинга, как земной поверхности, так и атмосферы и морской среды. Далее, при упоминании ресурса, будем говорить о Сервисе по мониторингу и моделированию состояния морских сред (http://marine.copernicus.eu/), поддерживаемом проектом «Коперникус», который использовался в настоящей работе. На портале проекта представлены как данные наблюдений (данные дистанционного зондирования, in-situ данные), так и поля параметров морских сред, посчитанные с помощью численных моделей участников проекта. В настоящей работе использовались данные наблюдений о температуре поверхности Балтийского моря (ТПМ), полученные в двоичном формате NetCDF (http://doi.org/10.5065/D6H70CW6), являющегося стандартом для обмена научными данными. Ниже в таблице представлены идентификаторы используемых в работе данных и их основных характеристики.

© Захарова Н.Б., Зотов А.Э., 2018

Таблица

Данные о ТПМ Балтийского моря проекта Коперникус, используемые в работе

Идентификатор данных	Спутники ДЗЗ	Пространственное разрешение, °	Даты регистрации данных
SST_Bal_sst_L4_rep_observations_010_016	NOAA AVHRRs 7, 9, 11, 14, 16, 17, 18, Envisat ATSR1, ATSR2 and AATSR	0,03	01.01.1982 – 31.12.2011
SST_ Bal_sst_L4_nrt_ observations_010_007_b	NOAA AVHRR, Metop AVHRR, Terra MODIS, Aqua MODIS, Aqua AMSR-E, Envisat AATSR, MSG Seviri	0,02	17.11.2011 – до н.вр.

Для обработки указанных выше данных использовалось два современных языка программирования – Python и R. Python [1] – высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности. Язык отличается удобностью синтаксиса и легкостью в освоении, позволяет быстро работать и осуществлять интеграцию разнородных программных компонентов в единую систему.

На языке программирования Python реализована программа, позволяющая получать с ресурса данные о ТПМ. Посредством реализованного набора скриптов обработаны среднесуточные данные о ТПМ Балтийского моря за 1982–2017 гг. Использование языка Python удобно в задачах получения и обработки данных дистанционного зондирования и других наборов информации.

Для анализа данных в работе использовался язык программирования R [2]. Язык разработан учеными преимущественно для статистической обработки данных и является свободно распространяемым. R поддерживает широкий спектр статистических и численных методов, удобен для визуализации данных. Использование языка R позволяет эффективно анализировать данные, выделять структуры и аномалии в наборах данных, выявлять и исследовать закономерности, характерные для больших научных данных, используя при этом статистические методы.

С помощью возможностей языка R был проведен анализ данных наблюдений о ТПМ Балтийского моря за 1982–2017 гг. Анализ показал наличие положительного тренда в температуре поверхности. График среднесуточной температуры поверхности Балтийского моря, усредненной по акватории моря, представлен на рис. 1.

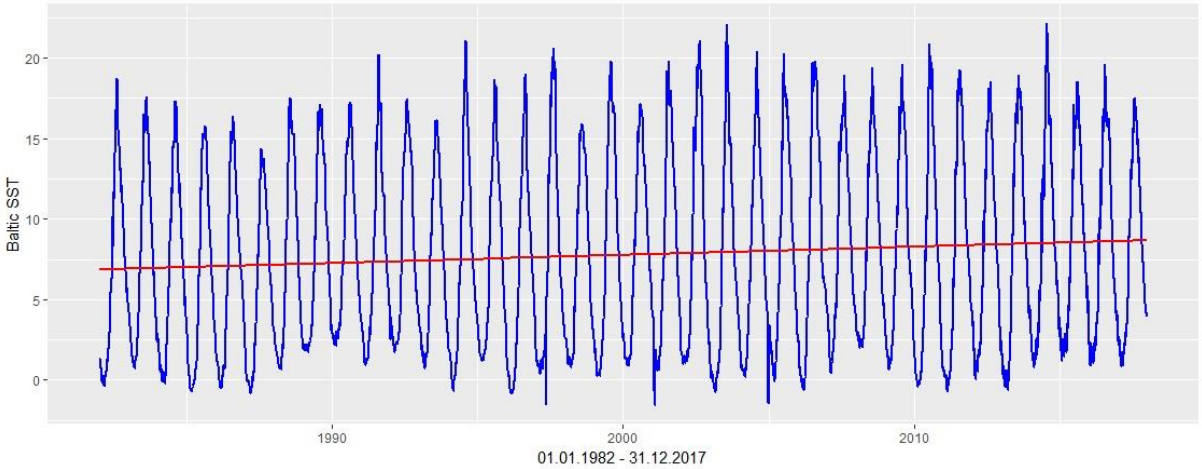


Рис. 1. ТПМ Балтийского моря за 1982–2017 гг. (синий) и линейный тренд (красный), °С

На рис. 2 представлена среднегодовая ТПМ за исследуемый период и линейный тренд, построенный по данным наблюдений.

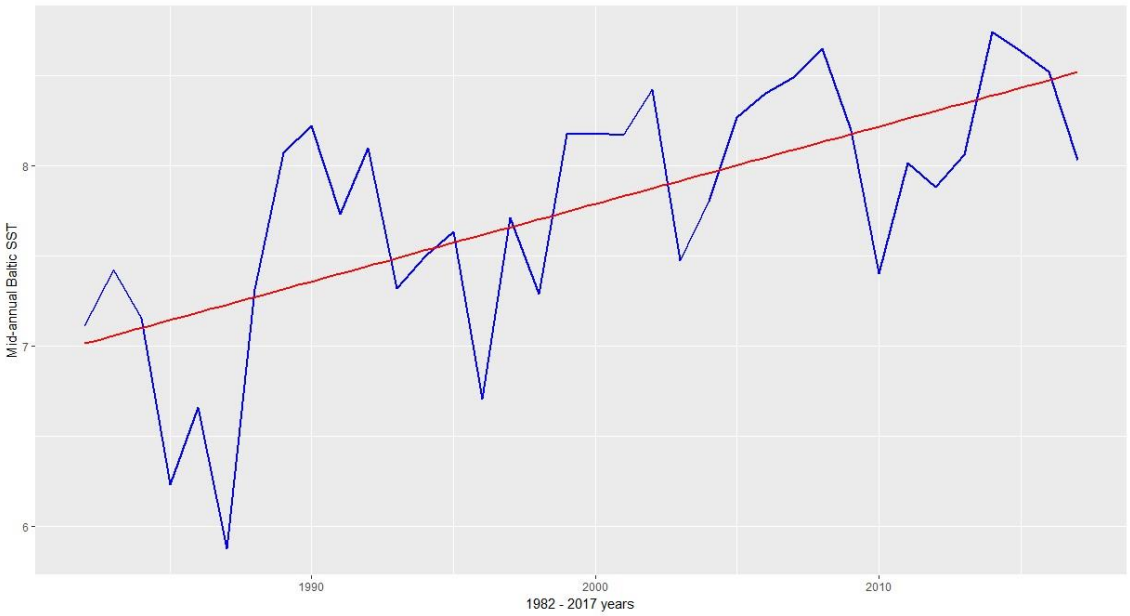


Рис. 2. Среднегодовая ТПМ Балтийского моря за 1982–2017 гг.:
синий – ТПМ, красный – линейный тренд, °С

Тренд в ТПМ Балтийского моря положительный, составляет 0, 043 °С/г. и подтверждает результаты аналогичного исследования, проведенного в 2014 г. [3]. Самая высокая средняя за год температура поверхности наблюдается в 2014 г., самая низкая среднегодовая температура – в 1987 г. Самый теплый день (самая высокая ТПМ) за весь исследуемый период наблюдался 28 июля 2014 г. со средней температурой по всей акватории 22,1 °С, самый холодный – 30 января 2001 г. с ТПМ – 1,5 °С. На рис. 3 представлена среднесуточная (осредненная по всей акватории) ТПМ Балтийского моря за самый теплый (2014) и самый холодный (1987) года исследуемого периода.

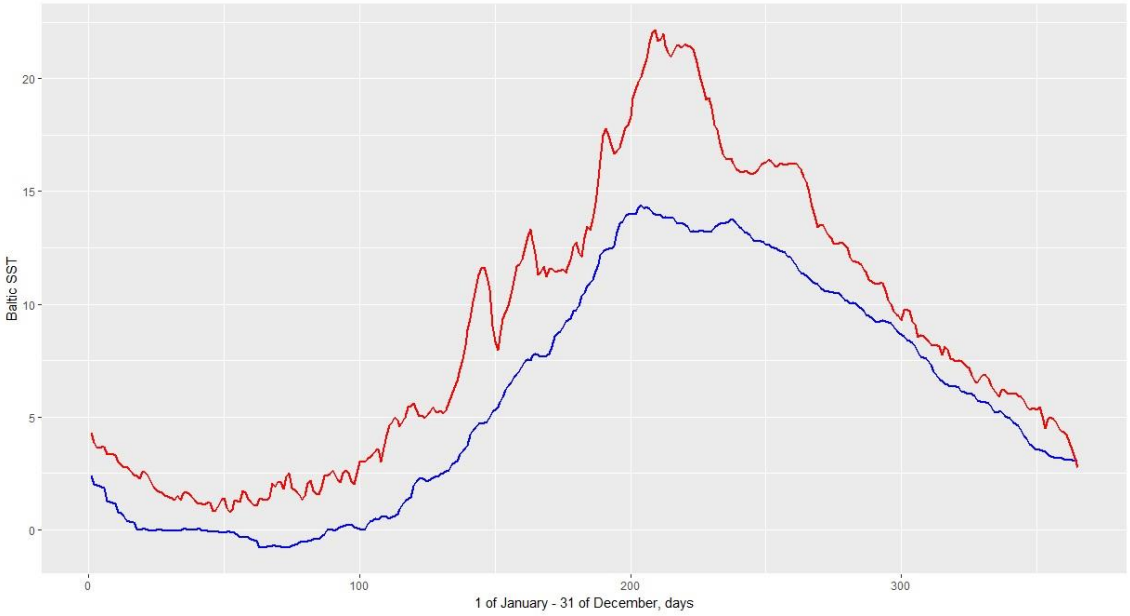


Рис. 3. Среднесуточная ТПМ Балтийского моря в течение года:
синий – 1987 г., красный – 2014 г., °С

Из рис. 3 видно, что температура поверхности Балтийского моря повышается на всем протяжении года, но наибольшая разница достигается в период май – сентябрь.

Заключение. Применение современных технологий позволяет эффективно обрабатывать и анализировать данные. Использование языка Python дает возможность эффективно обрабатывать большие объемы данных и интегрировать различные программы для конкретных задач в единую систему. Применение языка R, благодаря широкому спектру статистических методов и удобству визуализации и наглядности, позволяет проводить анализ полученных данных, в том числе гидрофизических.

В работе обработаны данные о температуре поверхности Балтийского моря за 1982–2017 гг. Данные наблюдений могут применяться как в задачах мониторинга изменчивости состояния исследуемой акватории, так и в процедурах ассимиляции [4], для проведения расчетов основных параметров моря в численной модели гидротермодинамики [5], в том числе в информационно-вычислительных системах [6].

В работе проведен анализ получаемых данных и выявлен положительный тренд, что говорит о потеплении Балтийского моря в последние десятилетия. Положительный тренд был отмечен в работах других ученых несколько лет назад, настоящее исследование подтверждает, что тренд в настоящее время сохраняется. В дальнейшем планируется провести более детальный мониторинг локальных и глобальных изменений исследуемой акватории.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-3228.2018.5.

Список литературы

1. Лутц М. Программирование на Python. Т. 1. М.: Символ, 2016. 992 с.

2. Core Team R. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2018. URL: https://www.R-project.org/.

3. Лебедев С.А. Климатические изменения температуры поверхности и уровня Балтийского моря по данным дистанционного зондирования // Янтарный мост. Журнал региональных исследований. 2014. № 1 (1). С.78–95.

4. Variational assimilation of observation data in the mathematical model of the Baltic Sea dynamics / V.I. Agoshkov, E.I. Parmuzin, N.B. Zakharova [et al.] // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2015. Vol. 30. Is. 4. P. 203–212.

5. The Baltic Sea circulation modelling and assessment of marine pollution / V.B. Zalesny, A.V. Gusev, S.Yu. Chernobay [et al.] // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2014. Vol. 29. Is. 2. P. 129–138.

6. Информационно-вычислительная система «ИВМ РАН – Балтийское море» / В.И. Агошков, Н.А. Асеев, Н.Б. Захарова [и др.]. М.: ИВМ РАН, 2016. 139 с.

УДК 551.435.5

А.А. Картозия

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А.Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: andrei.kartoziia@igm.nsc.ru

МОРФОСТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКАРСТОВОЙ КОТЛОВИНЫ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОСТРОВА КУРУНГНАХ (ДЕЛЬТА РЕКИ ЛЕНЫ) С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-АНАЛИЗА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ПОЛУЧЕННОГО С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Проведено высокоточное ручное геоморфологическое картографирование на основе ГИС-анализа дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Выявлены разновозрастные геоморфологические поверхности, отличающиеся друг от друга геологическим и геокриологическим строением слагающих их отложений и распространением в их пределах тех или иных термоденудационных процессов. Эти процессы в зависимости от интенсивности и площади распространения могут привести к различной реакции ландшафтов при их дальнейшей трансформации.

Ключевые слова: ГИС-анализ, БПЛА, морфостратиграфия, алас, термокарст, НИС «Остров Самойловский», дельта реки Лены.

Введение. Ввиду глобального тренда потепления климата особую актуальность приобретают исследования трансформации арктических ландшафтов под воздействием различных термоденудационных процессов. Целью проведенного исследования явилось описание морфометрических характеристик генетически однородных геоморфологических поверхностей (ГОГП) и реконструкция последовательности их формирования на основе ГИС-анализа данных дистанционного зондирования (ДДЗ) высокого пространственного разрешения полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В настоящий момент существует ряд работ, посвященных изучению проявления термоденудационных процессов на данной территории на протяжении голоцена, однако ДДЗ с БПЛА являются принципиально новым источником информации о рельефе земной поверхности, позволяющим производить исследования на качественно более высоком уровне детальности. Кроме того, описанная методика геоморфологического картографирования перигляциальных форм рельефа и морфостратиграфической реконструкции может применяться и в других районах при необходимости высокоточного геоморфологического, геокриологического и инженерно-геологического картографирования. Объект исследования – плоскодонное округлое термокарстовое понижение рельефа (алас) глубиной 25 м и диаметром около 250 м. Оно находится в юго-восточной части о-ва Курунгнах и располагается между двух изометричных термокарстовых котловин большего размера.

Методы исследования. Рельеф термокарстовой котловины детально анализировался в программном пакете ArcGIS 10.2.2. по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) высокого пространственного разрешения, полученным посредством аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Описание морфологии рельефа

© Картозия А.А., 2018

производилось по аэрофотоснимкам с горизонтальным разрешением 5 см (рисунок, *a*) и построенной методом фотограмметрии цифровой модели рельефа с горизонтальным разрешением 50 см и вертикальным 20 см (рисунок, *b*). Кроме того, анализировались производные схемы морфометрических показателей, такие как: схема угла наклонов поверхностей (рисунок, *c*), схема экспозиции склонов, теневая модель рельефа (рисунок, *d*), усредненная в скользящем окне размеров 5 м цифровая модель рельефа, а также схема водосборных бассейнов (*drainage basins*), полученная с использованием инструмента Basin Tool в Spatial analysis tools ArcGIS 10.2.2 (рисунок, *d*).

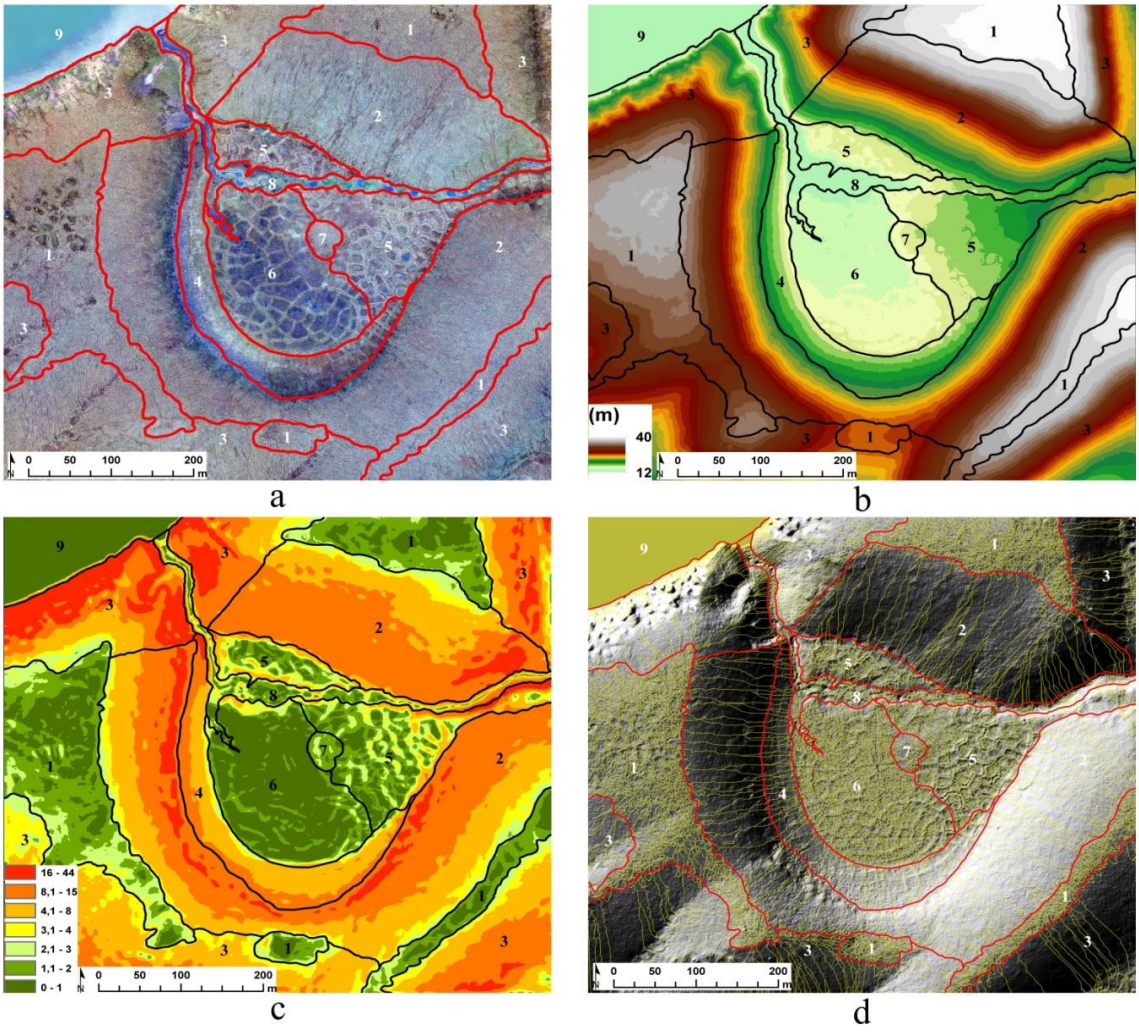


Рисунок. Формы рельефа, выделенные на основе ГИС-анализа ДДЗ с БПЛА: *1* – останцы ледового комплекса (едомы); *2* – склоны аласа; *3* – склоны; *4* – III уровень дна аласа; *5* – II уровень дна аласа; *6* – I уровень дна аласа; *7* – пинго; *8* – долина ручья; *9* – северо-западное озеро; *a* – аэрофотоснимок; *b* – схема углов наклона поверхностей; *c* – цифровая модель рельефа; *d* – теневая модель рельефа, желтыми линиями обозначены границы дренажных бассейнов

Геоморфологическое картографирование. Данные дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения и полевые наблюдения позволили выделить следующие формы рельефа.

1. Эрозионные останцы едомной толщи (рисунок, *1*). Эта поверхность залегает на высотных отметках от 35 до 40 м над уровнем реки. Для этой поверхности характерно полого-наклонное залегание (менее 3°) и наличие полигонального рельефа.

2. Склоны аласа (рисунок, *2*). Данные склоны наклонены непосредственно в сторону центра аласа под углами от 3 до 45°. Анализ ДДЗ показал, что при наклоне поверхности более 3° изменяется характер растительности и появляются склоновые эрозионные микроформы. Эта граница отчетливо наблюдается на схеме водосборных бассейнов (*drainage basins*) исследуемой территории. Для полого-наклонной поверхности останцов едомы характерно наличие многочисленных изометричных водосборных бассейнов малого размера. В свою очередь, для склонов характерны удлиненные вдоль линии падения водосборных бассейны большей площади. Для северного, западного и южного склонов характерны линейные эрозионные микроформы. Восточный склон осложняют многочисленные бугристо-ступенчатые микроформы рельефа. По всей видимости, это связано с высокой интенсивностью таяния снега на северном и западном склоне, в то время как бугристо-ступенчатый микрорельеф восточного склона образуется в результате солифлюкционного движения водонасыщенных отложений.

3. Склоны соседних аласов, которые аналогичны по своим характеристикам склонам исследуемого аласа.

Дно аласа можно подразделить на три уровня, отличающиеся друг от друга рисунком полигонально-валикового рельефа, высотными отметками и углом наклона поверхности.

4. III уровень дна аласа (рисунок, *4*) примыкает к южному и западному склону, залегает на высотных отметках от 15,5 до 22 м над уровнем реки и имеет угол наклона от 2 до 12°. Его характерной особенностью является наличие четырехугольных, выпуклых полигонов размером 10×15 м. Длинные стороны полигонов ориентированы к центру аласа.

5. II уровень дна аласа (рисунок, *5*) примыкает к его северному и восточному склонам (рисунок, *5*), залегает на высотных отметках от 15,5 до 25 м над уровнем реки и практически субгоризонтальна за исключением северо-восточной части, где она осложняется конусом выноса из северо-восточного озера. Полигональная сеть, развитая на данной поверхности, характеризуется наличием вогнутых, как правило, пятиугольных полигонов, с размерами сторон от 7 до 25 м. Полигоны ориентированы беспорядочно вокруг центральной части дна аласа.

6. I уровень дна аласа (рисунок, *6*) залегает на высотных отметках от 13,5 до 15,5. Ранее здесь располагалось остаточное редуцированное озеро. Полигоны, которые распространены на данной поверхности, вогнутые, четырехугольные, но не ортогональные. Размеры сторон полигонов варьируются от 10 до 25 м.

Кроме того, были выделены самые молодые формы рельефа.

7. В центре аласа наблюдается изометричный бугор высотой около метра (рисунок, *7*). Изометричная форма, местонахождение в центре котловины, а также наличие приповерхностного слоя торфа мощностью около 0,5 м позволяет проинтерпретировать данную форму рельефа как бугор пучения – пинго.

8. Эрозионная долина ручья (рисунок, *8*).

Морфостратиграфия. Исследуемая термокарстовая котловина развивалась в результате термокарстового проседания льдонасыщенных торфосодержащих песчаных алевритов ледового комплекса (едомы) (слои III – IV а по [1]). Суммарная видимая мощность этих слоев в береговом разрезе составляет 15 м. В скважине, пробуренной в центральной части аласа [2], отложения едомы каргинского возраста, имеющие мощность всего около 2,5 м, коррелируются со слоем III берегового разреза, который имеет мощность 12,5 м. Это позволяет сделать вывод, что в результате термоденудационных процессов от слоев III–IV осталось только около 2,5 м отложений в разрезе аласа. Согласно [3], фаза наиболее интенсивного проявления термокарстовых процессов для исследуемой территории начиналась непосредственно с голоцена и продолжалась вплоть до 5,7 тыс. л. н. Таким образом, можно заключить, что данный алас начал формиро-

ваться около 13 тыс. л. н. В результате термокарстовых процессов на протяжении от 13 до 5,7 тыс. л. н. мощность едомы уменьшилась до 2,5 м. Переработанный материал был вынесен в северо-западную термокарстовую котловину или остался на дне аласа в виде слоя суглинков мощностью около 9 м. Приповерхностный слой торфа мощностью в 0,6 м, очевидно, образовался в остаточном мелком озере в самой низкой части термокарстовой котловины.

Исходя из геологического строения и взаимоотношений описанных форм рельефа, можно предположить следующую последовательность формирования исследуемого аласа.

1. Во время самой активной фазы термокарста (от 13 до 5,7 тыс. л. н. по [3]) происходило таяние отложений ледового комплекса (едомы) и их переработка солифлюкционными и термоденудационными процессами. В результате сформировались нижнеголоценовые отложения, залегающие на глубине от 1,58 до 10,58 м [2]. В это время на дне аласа находился водоем, в который поступал материал со склонов. Поступающий материал из северо-западного озера сформировал конус выноса.

2. После иссушения водоема, поверхности № 4 и 5 перешли в субаэральные условия и покрылись системами морозобойных трещин. Полигональная сеть поверхности 4 приобрела ориентацию относительно береговой линии озера, поэтому длинные стороны полигонов ориентированы к центру аласа. Формирование полигональной сети поверхности № 5 также происходило относительно береговой линии озера в центре аласа, однако дополнительное воздействие, видимо, оказал поверхностный сток или тепловой поток из северо-восточного озера, что привело к формированию беспорядочных пятиугольных полигонов. На данном этапе также начал образовываться пинго (поверхность № 7) вследствие повторного образования мерзлоты и промерзания талика.

3. Во время последующих фаз термокарстовой активности на поверхности № 6 располагался водоем, в котором происходило накопление отложений, залегающих на глубине от 1,58 до 0,6 м. Во время деградации водоема сформировался слой торфа мощностью 0,6 м.

4. На последнем этапе формирования аласа образовалась долина ручья.

Заключение. ГИС-анализ ДДЗ с БПЛА позволяет с сантиметровой точностью выявлять участки земной поверхности, имеющие различную историю формирования и морфометрические характеристики рельефа в настоящий момент. Кроме того, выявление превалирующих термоденудационных процессов, распространенных в их пределах, позволяет прогнозировать будущую трансформацию этих ландшафтов. Данное исследование дополнило современные представление о процессах термокарста в районе дельты реки Лены и проиллюстрировало перспективы применения ДДЗ с БПЛА при высокоточном геоморфологическом и геокриологическом картографировании.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0330-2016-0018.

Список литературы

1. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia / S. Wetterich, S. Kuzmina, A.A. Andreev [et al.] // Quaternary Science Reviews. 2008. Vol. 27. P. 1523–1540.

2. Хазин Л.Б., Хазина И.В., Кузьмина О.Б. Микропалеонтологическая характеристика (остракоды, палиноморфы) многолетнемерзлых отложений, вскрытых скважиной, на о. Курунгнах (дельта Лены, северо-восток Сибири) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 17–21 апреля 2017): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов: в 4 т. 2017. Т. 1. С. 7–11.

3. Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study / A. Morgenstern, M. Ulrich, F. Günthera [et al.] // Geomorphology. 2013. Vol. 201. P. 363–379.

УДК 528.8.04, 528.88

А.В. Картушинский

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: kartalvas@rambler.ru

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Представлены результаты обработки спутниковых и контактных данных по поверхностной температуре воды и мутности озера Шира (Хакасия) за весеннее-летний период 2013–2015 гг. Показаны структурные особенности формирования поверхностных градиентов температуры воды и мутности и анализируются гидродинамические факторы. В работе сравниваются высокочастотные измерения температуры поверхности *in situ* и результаты спутниковых измерений мелкомасштабного водного объекта. Рассматриваются структурные особенности динамики горизонтальных градиентных полей в морских и океанских экосистем. Изучены возможности использования градиентных характеристик для реализации численных моделей функционирования водных систем по физическим и биологическим параметрам по данным дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: градиент температуры, концентрация хлорофилла, мутность воды, параметрические модели, поверхностные неоднородности.

Введение. Пространственно-временная изменчивость поверхностной температуры воды, клеток фитопланктона и мутности органического происхождения в водных системах характеризуется в основном ветровым воздействием (в особенности ветровыми нагонами), вихревыми турбулентными движениями, а также горизонтальными и вертикальными потоками, образованными течениями. Из-за того что в приводном слое атмосферы достаточно низкая механическая и термическая инерционность, а также благодаря сильному турбулентному перемешиванию вертикальная структура слоя быстро приспосабливается к меняющимся внешним условиям.

Спутниковый мониторинг дает возможность получать и анализировать информацию о динамических процессах по изменчивости полей радиационной температуры и изображений в видимом диапазоне для определения режима гидрологической структуры водоема. Однако методы атмосферной коррекции для фильтрации искажений космических снимков, связанных с влиянием облачности на спутниковые изображения, в настоящее время не позволяют в достаточной мере получать точные данные высокого разрешения, особенно для водных объектов малых размеров, каким является озеро Шира.

Возможности изучения динамики горизонтальных неоднородностей поверхностных полей водных систем целиком зависят от пространственного разрешения спутниковых снимков. Пространственно-временные масштабы неоднородностей в воде могут значительно варьировать [1; 2], но структурные изменения в поверхностном слое океанских масштабов, могут существовать достаточно длительное время [3]. Одними из важных показателей структурной организации водных экологических систем можно рассматривать градиентные характеристики, которые могут усредняться в зависимости от поставленных для изучения задач. Пространственное и временное усреднение градиентов предоставляет возможность связывать время жизни динамического процесса в водном слое и выявлять пространственный масштаб воздействия на структуру водно-

© Картушинский А.В., 2018

го объекта. Наиболее важными показателями динамики структурной организации экологических систем можно рассматривать пространственные и временные масштабы изменчивости градиентных зон. Такие зоны хорошо маркируются после расчетов градиентов основанных на спутниковой информации, в том числе в широтном, меридиональном направлениях и по модулю [3]. Устойчивость горизонтального распределения градиентных зон (для морей и океанов обозначаются как фронтальные зоны) и динамика границ таких зон может отражать факторы внешнего воздействия на структурную организацию водных систем. Однако успех применения технологии градиентного расчета во многом зависит от периодичности спутниковой съемки и количества качественных снимков с исходной информацией. Вдобавок современные возможности контактных измерений на гидрологических станциях значительно повышают совершенствование совмещения спутниковой и контактной информации для применения и математического моделирования.

Таким образом, основная цель работы заключается в изучении масштабов градиентных неоднородностей водных экосистем с использованием спутниковых и контактных данных.

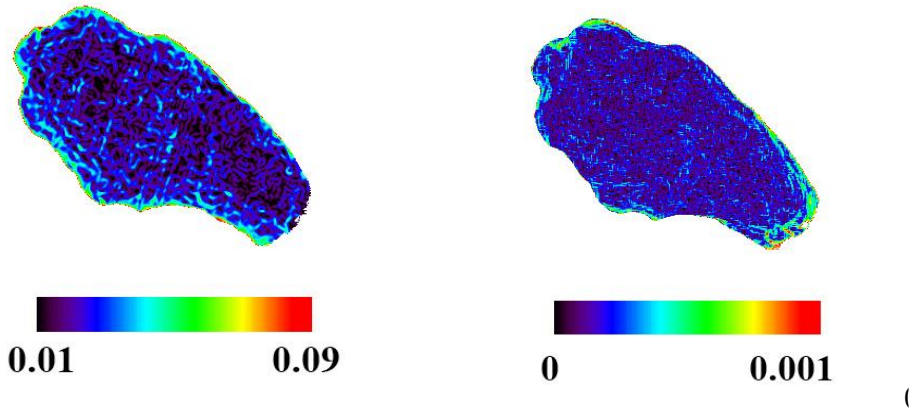
Материалы и методы. В работе используются спутниковые данные, полученные различными сканерами SeaWiFS, CZCS, AVHRR, MODIS, SPOT, LANDSAT, AQUARIUS, которые используются для расчетов градиентных характеристик в различных районах Мирового океана и озера Шира (Хакасия, Россия). Основное внимание уделяется выявлению закономерностей формирования и структуры горизонтальных высокоградиентных зон по физическим и биологическим компонентам поверхностного слоя водных систем. Для этого используется градиентный метод обработки спутниковых данных с использованием авторского программного обеспечения и программный пакет ENVI 4.7 с разработанными макросами в среде IDL [4].

Исходными данными для вычислений градиентных характеристик являются долговременные ряды средненедельных (а также композиты для других пространственно-временных интервалов) спутниковых данных по температуре поверхностного слоя озера Шира и индекса мутности воды (NDTI), а также значения температуры и концентрации хлорофилла для отдельных районов Мирового океана.

Результаты. Разработанная информационная технология обработки космических изображений (Landsat-7, -8; Spot-4, -6; MODIS) озера Шира с использованием программного пакета ENVI 7.0 и обработка спутниковых спектральных характеристик поверхности озера позволила получить представление об изменчивости поверхностных полей радиационной температуры и мутности, а также осуществить расчеты градиентных показателей (рис. 1, 2).

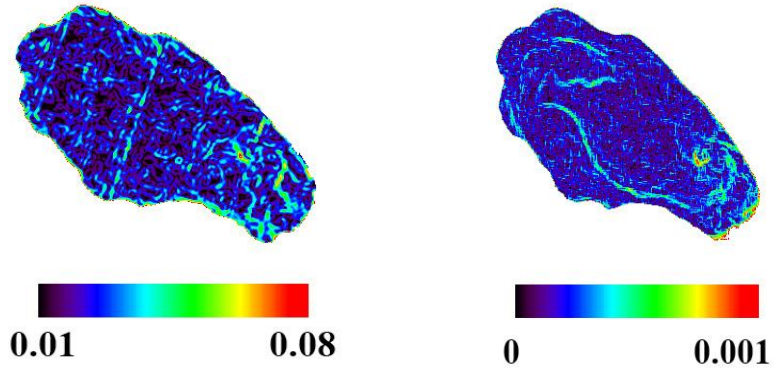
Результаты обработки спутниковых данных и расчет градиентных полей позволяют понять, какие пространственные и временные масштабы процессов в водных системах являются наиболее важными при изменении гидробиологической и гидрофизической структуры. Так, несколько факторов, действующих в один момент времени, могут усиливать или ослаблять циркуляцию в отдельных зонах, а также формировать локальные экосистемы. Причем структурные проявления динамики распределения пространственных неоднородностей могут иметь циклический характер, зависящий от периодичности совместного действия факторов окружающей природной среды. Такие факторы, как адвективный и конвективный перенос тепла и массы, интенсивность турбулентной диффузии в водных системах приводят к неоднородному распределению живых организмов, изменяя условия структурной организации системы в целом. В механизме эволюции водных систем специфика внешнего воздействия отражена в цикличности динамических процессов и факторов, которые часто выступают в качестве генератора, обеспечивающего оптимальную настройку трофических связей внутри экосистемы. Если примерно оценить временной масштаб реакции поверхностного слоя,

на ветровое напряжение, скорость в котором порядка 5 см/с, то временной масштаб составляет порядка 1,4 ч, а минимальный горизонтальный масштаб пространственных неоднородностей порядка 250 м. Предложенная аналитическая оценка подтверждается данными натурных и спутниковых измерений полей поверхностной температуры и распределения мутности для озера Шира.



а *б*

Рис. 1. Градиентное поле поверхности озера Шира по спутниковым данным для 27.07.2014:
а – градиенты индекса мутности NDTI; *б* – градиенты температуры воды



а *б*

Рис. 2. Градиентное поле поверхности озера Шира по спутниковым данным для 31.08.2014:
а – градиенты индекса мутности NDTI; *б* – градиенты температуры воды

Расчеты градиентных характеристик поверхности природных объектов на основе спутниковых данных позволяют выявлять зоны с различной динамической активностью; анализ распределения величины градиентных полей – гетерогенные и гомогенные зоны водных систем, а при соответствующем периоде усреднения получать степень динамичности таких зон. Это, в свою очередь, позволяет изучать процессы формирования структурной организации водных экосистем и оценивать масштабы ее изменчивости, что может применяться при разработке численных прогностических моделей.

Для более полного анализа взаимодействия биологических и физических полей водных объектов проведена оценка высокочастотных колебаний температуры воды на поверхности при помощи термистерных датчиков для различных станций и осуществлено сравнение со спутниковыми данными.

Пространственное распределение поля мутности поверхности озера Шира за разные периоды времени имеют определенные отличия, однако достаточно хорошо фиксируются масштабы неоднородностей и границы перепада количественных показателей характеристик (рис. 1, *б*, 2, *б*), что, в конечном счете, помогает изучать динамику поверхностного слоя водной системы в целом.

В работе обоснована методологическая концепция объединения подходов к расчету градиентных показателей для изучения динамики границ между экотопами и показателями функционирования водных экосистем и систем суши, а также динамических характеристик гидрологических образований при оценке пространственно-временных интервалов функционирования неоднородностей биологической и физической природы. В ряде случаев показана согласованность биологических и физических процессов в экосистемах в пределах пространственно-временных границ влияния отдельных процессов, выявляемых градиентным методом обработки спутниковых данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант проекта № 13-05-00853 а).

Список литературы

1. Картушинский А.В. Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7, № 1. С. 112–124.

2. Kartushinsky A.V., Time-space structure and variability of surface temperature frontal zones in the Ocean (Based on AVHRR satellite data) // Advances in Space Research. 2000. № 25 (5). P. 1107–1110.

3. Казьмин А.С. Изменчивость крупномасштабных океанических фронтальных зон: анализ глобальной спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 213–218.

4. Картушинский А.В., Кукоба Н.А. Градиентные поля поверхности Земли по спутниковым данным // Вестн. СибГАУ. 2015. № 3 (16). С. 587–596.

УДК 528.8

В.Б. Кашкин[1], К.В. Краснощеков[1], Т.В. Рублева[1], К.В. Симонов[2]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,
[2]Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: tvrubleva@mail.ru, simonovkv@icm.krasn.ru

АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ GRACE НАД СЕЙСМОАКТИВНЫМИ РАЙОНАМИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Исследование посвящено анализу особенностей изменения параметра EWH (Equivalent Water Height) над геоидом по спутниковым измерениям космической системы GRACE в сейсмоактивных районах сильнейших подводных землетрясений. Создан архив спутниковых данных GRACE. Выполнена интерпретация возмущенного состояния геосреды по цифровым картам пространственного распределения параметра EWH.

Ключевые слова: гравитационное поле, геоид, параметр EWH, подводные землетрясения; космическая система GRACE, обработка спутниковых данных.

Введение. Методы исследования гравитационного поля по спутниковым измерениям разработаны более 40 лет назад. Однако только в последние годы в современных космических гравиметрических миссиях: CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload, DLR, 2000–2010 гг.), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, NASA/DLR,

© Кашкин В.Б., Краснощеков К.В., Рублева Т.В., Симонов К.В., 2018

2002–2017 гг.) и GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explore, ESA, 2009–2013 гг.) реализовано непрерывное GPS-слежение за низкоорбитальными спутниками [1].

С помощью систем CHAMP, GRACE и GOCE были получены данные о гравитационном поле Земли с высокой точностью и высоким пространственным разрешением. Так, акселерометр спутника CHAMP имел точность $3 \cdot 10\text{-}9$ м/с^2, что на порядок меньше точности прибора GRACE равного $1 \cdot 10\text{-}10$ м/с^2 [2]. Архив данных, полученных с помощью аппаратуры спутника GOCE, содержит данные всего за 4 года, в то время как архив информации GRACE содержит спутниковые измерения за 15 лет, включая данные о пространственно-временных вариациях водных запасов.

Отметим, что в космическом проекте GRACE реализована технология «спутник-спутник» по схеме «низкий-низкий», суть которой состоит в измерении расстояний и скоростей изменения расстояния между ними. Два одинаковых спутника GRACE двигаются на расстоянии 170–240 км друг за другом по круговой приполярной орбите с наклонением 89о [1]. Высота данной орбиты составляет около 450 км. На орбитальную плоскость каждого спутника влияют возмущающие ускорения, которые соответствуют первым производным гравитационного потенциала. Аппаратура спутников GRACE состоит из: высокостабильного генератора частоты, микроволнового дальномера K-диапазона (K-Band Ranging system), GPS-приемника, астроблок, уголковые отражатели для лазерной локации, 2 акселерометра ACC и SuperSTAR. Точность измерения расстояния между спутниками GRACE определяется дальномерами до 10 мкм, что позволяет получать данные о вариациях силы тяготения на основе методов дифференциальных измерений в системах с изменяемой геометрией расположения элементов [3]. Спутники пролетают над определенным участком Земли 1 раз в 30 дней, обеспечивая полное картирование земной поверхности.

В данной работе изучались особенности вариаций параметра эквивалентного уровня воды EWH (Equivalent Water Height) над контуром геоида по спутниковым измерениям космической системы GRACE в сейсмоактивных районах сильнейших землетрясений для выявления связи напряженно-деформированного состояния геосреды и процессов подготовки ожидаемого основного сейсмического события.

В качестве объектов исследования были выбраны сильнейшие подводные землетрясения с магнитудами [4]: M = 9,1 (26 декабря 2004 г., около о. Суматра), M = 8,1-8,3 (15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г., в районе о. Симушир), M = 8,8 (27 января 2010 г., вблизи побережья Чили), M = 9,1 (11 марта 2011 г., около восточного побережья о. Хонсю) и M = 8,3 (24 мая 2013 г., недалеко от п-ов. Камчатка в Охотском море).

Гравитационное поле и параметр EWH. Спутниковые измерения КС GRACE высоты водной поверхности по отношению к контуру геоида позволяют определять отклонение свободной поверхности моря от его среднего уровня по спутниковой трассе. Под геоидом понимается эквипотенциальная поверхность поля силы тяжести, которая соответствует среднему уровню моря в состоянии покоя [5]. Ежемесячные данные, полученные с сайта [6], содержат информацию об отклонении поверхности Мирового океана от геоида в единицах измерения эквивалентного уровня воды EWH (в см).

В основном параметр EWH используется для анализа динамической топографии океанов и уточнения параметров внешнего гравитационного поля Земли [7]. Метод разложения гравитационного потенциала Земли по сферическим функциям описан в [5; 3]. Этот метод представления потенциала используется при изучении гравитационного поля по возмущенному движению спутников.

Перераспределение воды в гидросфере происходит в тонком слое около поверхности Земли шириной всего в несколько километров. Массы между геоидом и водной поверхностью имеют постоянную плотность ρ_w, равную 1 000 кг/м3 [8]. Рассчитывается EWH на основе гармонических коэффициентов моделей геопотенциала минус коэффи-

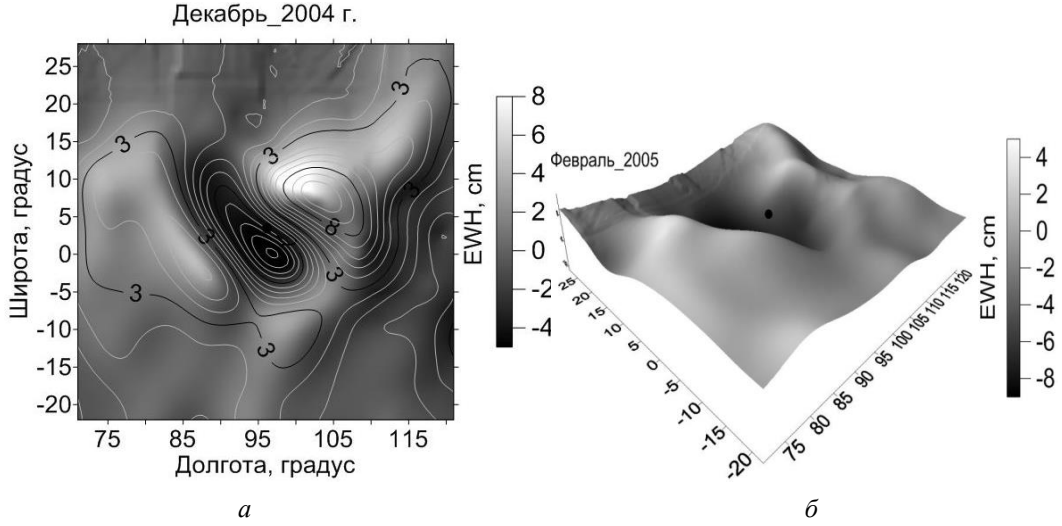
циенты средней модели (EIGEN-6C) [7]. Это глобальная модель, исходными данными которой являются наземные гравиметрические измерения, лазерные траекторные наблюдения спутников LAGEOS (1985–2010 гг.), а также спутниковая информация КС GOCE и GRACE. В высокостепенной модели EIGEN-6C разложение геопотенциала происходит до степени порядка 1 420, что соответствует 14-километровому пространственному разрешению [9].

Эквивалентный уровень воды (параметр EWH) находится из отношения поверхностной плотности $\Delta\sigma$ к плотности воды ρ_w:

$$EWH = \Delta\sigma / \rho_w.$$

Анализ результатов. На основе спутниковых данных GRACE [6] построены цифровые карты и трехмерные изображения пространственно-временного распределения параметра EWH с периодом в 30 суток. Пример полученной карты в изолиниях за декабрь 2004 г. для области Суматрского землетрясения представлен на рис. 1, *а*. На рис. 1, *б* показано изображение очаговой области этого землетрясения в виде 3D-модели за февраль 2005 г. На рис. 1, *а* и *б* приведена шкала параметра EWH (в см). Представленные изображения на рис. 1, полученные с помощью методов спутниковой альтиметрии, отображают особенности строения подстилающей геосреды в период катастрофического события.

В работе более детально рассмотрена очаговая область сильного землетрясения, произошедшего у побережья Чили 27 февраля 2010 г. По данным геологической службы США сейсмособытие имело магнитуду M_w = 8,8 с координатами гипоцентра 35,9°S, 72,73°W и глубиной 35 км [4]. Отметим, что район исследования характеризуется частыми подводными землетрясениями. Похожие катастрофические события произошли в 2014 и 2015 гг.



а *б*

Рис. 1. Цифровая карта в изолиниях за декабрь 2004 г.: *а* – и 3D-модели за февраль 2005 г.; *б* – распределения параметра EWH Суматрского землетрясения

На рис. 2 показана цифровая карта в изолиниях пространственного распределения EWH для сейсмоактивного района Чили за февраль 2010 г. в период подготовки и возникновения ожидаемого сильнейшего землетрясения по спутниковым данным GRACE. Точкой на рис. 2 обозначен гипоцентр землетрясения. Можно увидеть аномальную область с повышенными значениями параметра EWH. Выявлено, что гипоцентр землетрясения расположен вблизи оси аномалии, которая ориентирована субмеридионально, на максимальных градиентах параметра EWH. Интерпретация направленности выявленной аномалии связана с геометрией зоны субдукции литосферных плит.

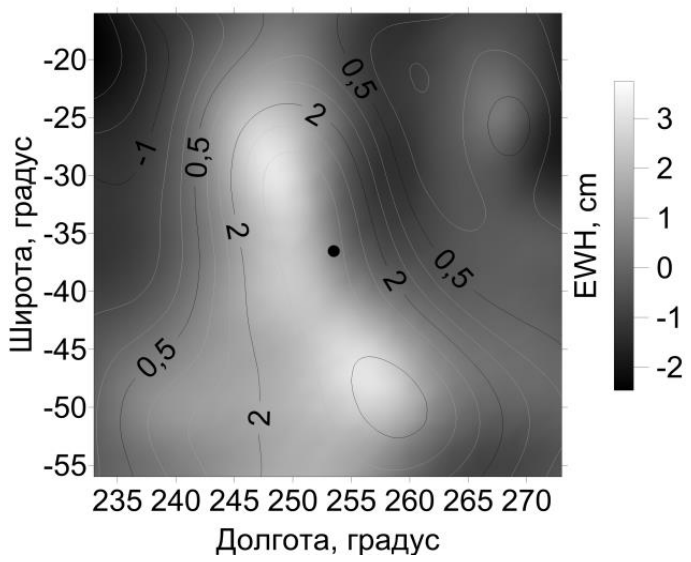


Рис. 2. Цифровая карта в изолиниях Чилийского землетрясения за февраль 2010 г.

Построен график изменения EWH в гипоцентральной точке за 5 месяцев до сейсмического события и 5 месяцев после землетрясения M_w = 8,8 (рис. 3). Характерное изменение параметра EWH, приведенное на рис. 3, показывает процесс подготовки сильнейшего землетрясения и его афтершоковую разрядку. За «0» на горизонтальной временной шкале на рис. 3 принята дата рассматриваемого сейсмособытия. «Отрицательная часть» этой шкалы характеризует процесс подготовки сильнейшего землетрясения, «положительная часть» – афтершоковую активность. Вертикальная шкала на рис. 3 отражает изменения параметра EWH, характеризуя резкое увеличение границы водной поверхности в процессе делатации. Под делатацией понимается разуплотнение верхних слоев геосреды и насыщения их водой.

Рис. 3. Динамика изменения параметра EWH с периодом
1 Т = 30 суток во время процесса подготовки сильнейшего землетрясения
и его афтершоковой разрядки

При глубинном землетрясении (Охотское море, май 2013 г.) в области подготовки наблюдалась зона повышенных значений EWH (рис. 4). Гипоцентр землетрясения располагался на глубине 602 км и на рис. 4 он обозначен точкой. На цифровой карте пока-

зано, что аномальная область с повышенными значениями параметра EWH ориентирована в направлении ЮЗ-СВ. Из рис. 4 видно, что гипоцентр землетрясения расположен вблизи оси аномалии на максимальных градиентах параметра EWH. Важно отметить, что в отличие от субдукционных землетрясений, которые имеют выраженную линейную геоструктуру, глубинное событие характеризуется локализованной очаговой областью.

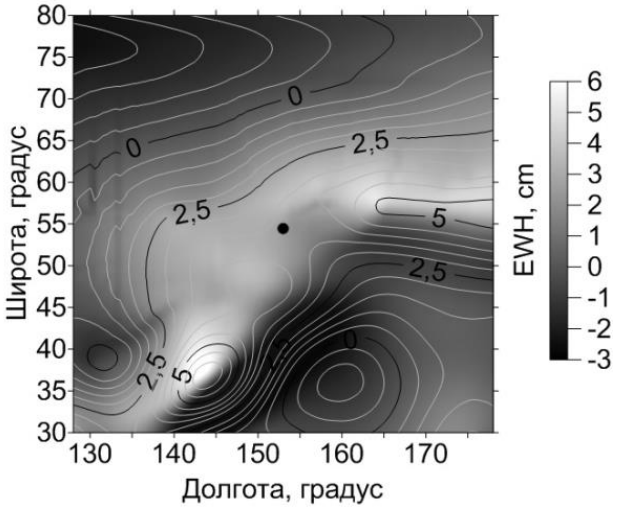


Рис. 4. Цифровая карта в изолиниях Охотского землетрясения за май 2013 г.

Заключение. Сформирован архив спутниковых измерений GRACE, содержащий информацию о данных параметра EWH (эквивалентного уровня воды). Параметр EWH в период подготовки и релаксации сильнейших землетрясений изменяется над контуром геоида. Выполнен анализ данных GRACE для ряда областей очаговых зон известных подводных землетрясений (2004–2013 гг.). Построены цифровые карты изменения EWH над геоидом в очаговых зонах изучаемых сильнейших землетрясений. Указанный параметр может служить основой для оценки геодинамических рисков возникновения разрушительных землетрясений для прибрежных сейсмоопасных территорий.

Список литературы

1. Frank Flechtner, Nico Sneeuw Wolf-Dieter Schuh (Eds.). Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and Future Missions. GEOTECHNOLOGIEN. Science Report. 2014. № 20. Advanced Technologies in Earth Sciences. Berlin: Springer.

2. Гансвинд И.Н. Современные космические технологии изучения Земли как системы // Электронные библиотеки. 2017. Т. 20, № 1. С. 39–49.

3. Кащеев Р.А. Современные методы спутниковой гравиметрии. Казань: Казан. ун-т, 2015. 45 с.

4. USGS. Latest Earthguakes: URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map.

5. Гофман-Велленгоф Б., Мориц Г. Физическая геодезия. М.: Изд-во МИИГАиК. 2007, 420 с.

6. NASA. ftp PO.DAACю URL: ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/ocean_mass/RL05/ascii/.

7. GRACE, time-varying gravity, Earth system dynamics and climate change / J.A. Wouters, D.P. Bonin, R.E.M. Chambers [et al.] // Review Article Rep. Prog. Phys. 2014. № 77. 41 p.

8. Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1998. 103. №. B 12. P. 30205–30229.

9. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли: монография / В.Ф. Канушин, А.П. Карпик, И.Г. Ганагина [и др.]. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. 270 с.

УДК 630.18:621.039.1:528.7 (470.21)

А.Н. Кизеев[1], К.Ю. Силкин[2]

[1]Полярно-альпийский ботанический сад-институт имени Н.А. Аврорина Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, e-mail: aleksei.kizeev@mail.ru
[2]Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, e-mail: const.silkin@yandex.ru

МОНИТОРИНГ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ПРИРОДНУЮ СРЕДУ (НА ПРИМЕРЕ КОЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Представлены результаты мониторинга воздействия одного из потенциально опасных объектов ядерной энергетики Мурманской области – Кольской атомной электростанции (АЭС) – на состояние лесных фитоценозов. Впервые методологически объединены подходы радиационной экологии и дистанционного зондирования Земли из космоса. Отмечена необходимость продолжения комплексных исследований лесов Евро-Арктического региона России с помощью методов радиоэкологии и многозонального космического зондирования.

Ключевые слова: Кольская АЭС, лесные фитоценозы, радиоэкологические исследования, дистанционное зондирование Земли из космоса.

Мурманская область – опорный узел Арктики, регион интенсивной производственной деятельности. Она уникальна по концентрации ядерных объектов и атомного флота. Здесь находятся Кольская атомная электростанция (КоАЭС), полигоны утилизации и хранения радиоактивных отходов, ледокольные суда, субмарины и др. потенциально опасные объекты [1].

КоАЭС – первая атомная станция в России, построенная за Полярным кругом в 1973–1984 гг. Она имеет в эксплуатации 4 энергоблока с реакторами ВВЭР-440, общей мощностью 1 760 МВт [2]. Атомная станция окружена лесами. Как известно, лесные фитоценозы способны аккумулировать радионуклиды в больших количествах, по-сравнению с другими экосистемами. Можно предположить, что в компонентах растительных сообществ в районе расположения атомной станции происходит интенсивное накопление техногенных радионуклидов.

В настоящее время во всем мире разворачиваются масштабные программы глобального мониторинга растительных ресурсов на основе принципиально новых технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Можно констатировать, что появился новый общедоступный измерительный инструмент, который отвечает требованиям исследователей, изучающих различные земные объекты и процессы, и обладает в совокупности такими уникальными свойствами, как глобальность зоны наблюдения, объективность получаемой информации, высокая повторяемость, воспроизводимость, наличие архивов долговременных непрерывных наблюдений [3]. Комплексных исследований состояния растительного покрова в районах расположения объектов ядерной энергетики на Кольском Севере с использованием методов радиационной экологии и многозонального космического зондирования до сих пор не проводилось. Поэтому особую актуальность приобретает мониторинг лесных фитоценозов в зоне непосредственного влияния КоАЭС – одного из крупнейших ядерных объектов Евро-Арктического региона России – по данным наземных радиоэкологических исследований и материалам ДЗЗ из космоса.

© Кизеев А.Н., Силкин К.Ю., 2018

Вокруг атомной станции была развернута сеть мониторинга в виде радиально-концентрической системы, состоящей из 12 площадок 4 типов: 2 станционные площадки находились в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) атомной станции – С-1 (координаты 67°27'59,821" с. ш. и 32°26'42,299" в. д.) и СЗЗ хранилища сухих слабоактивных отходов – ХССО – С-2 (67°28'56,701"; 32°24'50,400"); 5 пробных площадок расположены в зоне наблюдений (ЗН) КоАЭС на расстоянии 10 км от станции: П-1 (67°32'27,780"; 32°19'13,260"), П-2 (67°33'32,461"; 32°29'16,321"), П-3 (67°27'7,081"; 32°40'24,539"), П-4 (67°22'50,941"; 32°26'0,060") и П-5 (67°24'13,561"; 32°20'15,900"); 4 контрольных площадки – на границе ЗН на расстоянии 15 км: К-I (67°34'6,060"; 32°14'18,780"), К-II (67°35'25,200"; 32°35'48,120"), К-III (67°26'2,940"; 32°53'30,840") и К-IV (67°20'8,700"; 32°23'0,600"); а также 1 фоновая площадка – на расстоянии 30 км от станции – Ф (67°34'38,820"; 31°49'47,219"). Картографическое представление системы площадок (мониторинговых точек) показано на рисунке.

Рисунок. Схема расположения стационарных мониторинговых площадок вокруг КоАЭС

Исследуемые площадки расположены в районе озер Имандра и Верхняя Пиренга. По типу леса большинство мониторинговых точек относятся к соснякам чернично-лишайниковым и соснякам зеленомошно-лишайниковым черничным.

В качестве объектов изучения были выбраны компоненты доминирующей растительности – хвоя сосны обыкновенной и листья черники миртолистной, которые очень чувствительны к содержанию химических элементов в окружающей среде. Отбор проб проводили в течение вегетационного периода (июнь – сентябрь) 2014 г. согласно общепринятым методикам [4]

Архив материалов космических аппаратов Landsat содержал множество многозональных сцен по изучаемому району. Из них были выбраны те, которые характеризовались низким процентом облачного покрытия территории. Сезонный охват соответствовал пери-

оду май – сентябрь. Анализ благополучия фитоценозов на мониторинговых точках производили по данным ДЗЗ из космоса. В работе были использованы материалы космических аппаратов: Landsat-7 и Landsat-8. Летние сезоны 2015 – 2016 гг. отличались аномальной погодой (более облачной прохладной, влажной). Поэтому для подробного анализа был выбран 2014 г. Так как предполагается, что антропогенные факторы, участвующие в формировании искомых аномалий благополучия фитоценозов, действуют в течение многих лет, то данный подход не должен повлиять на достоверность исследований. Каждая площадка наблюдалась в среднем на шести отдельных сценах [5].

Радиоэкологические исследования включали в себя радиометрическую съемку местности (мкЗв/ч) и измерения удельных активностей техногенного радионуклида ^{137}Cs – одного из основных компонентов радиоактивного загрязнения биосферы (период полураспада 30,17 лет [4], с помощью сертифицированного в Госстандарте РФ сцинтилляционного спектрометрического комплекса «Мультирад» с гамма-детектором NaI(Tl) 63×63 и программным обеспечением «Прогресс», Бк/кг).

Для получения возможности объективно сравнивать результаты наземных радиоэкологических исследований и материалов ДЗЗ из космоса был построен обобщенный эмпирический индикатор удельной активности фитомассы (α), учитывающий площадь покрытия сосны и черники на мониторинговых площадках в совокупности со значениями удельной активности их хвои и листьев.

Обработка собранных материалов ДЗЗ производилась с целью обеспечения одинакового радиометрического масштаба при любых условиях съемки и характеристиках сенсоров космических аппаратов в соответствии с официальным руководством миссии [6; 7].

Значения вегетационного индекса *NDVI* [8] рассчитывались для всех доступных наблюдений мониторинговых площадок. С помощью анализа сезонных тенденций была проведена оценка величины *NDVI* в пике вегетационного периода. Поскольку индекс *NDVI* прямо пропорционален накопленной за определенный период биомассе [9], т.е. возможность провести сопоставление этого параметра с физиологическим состоянием растений, чьи листья/хвоя подвергались радиационному воздействию.

Естественный радиационный фон в районе исследований составлял 0,09 мкЗв/ч. Данный показатель находится в пределах мощности дозы для населения на открытой местности (0,2 мкЗв/ч) и соответствует малым уровням ионизирующего излучения (область малых доз для живых объектов – до 0,2–0,5 Зв согласно [10].

Удельная активность ^{137}Cs в хвое сосны обыкновенной в среднем находилась в пределах от 7 до 34, а в листьях черники миртолистной – от 13 до 165 Бк/кг. Накопление ^{137}Cs в ассимиляционных органах растений могло обуславливаться естественным круговоротом продуктов деления, поступивших в атмосферу и почву от испытаний ядерного оружия, проводившихся ранее на полигонах планеты, а также вследствие глобального загрязнения атмосферы выбросами Чернобыльской АЭС [2,5]. Согласно результатам сравнительного анализа удельных активностей ^{137}Cs на мониторинговых точках по *t*-критерию, вклад КоАЭС был незначительным. Максимальные величины удельных активностей данного радионуклида не превышали установленного допустимого уровня для лекарственных растений – 400 Бк/кг [11].

Построенная схема распределения значений вегетационного индекса демонстрирует разнородную картину, среди которых выделяются следующие варианты значений: минимум (площадка П-1); нижний квартиль (площадки С-1, П-3, К-I, Ф); медиана (площадки П-2, К-IV); верхний квартиль (площадки С-2, П-5, К-II, К-III); максимум (площадка П-4). Прослеживается определенная азимутальная анизотропия. Аномалии пониженных значений *NDVI* (т.е. менее благополучных фитоценозов) вытянулись преимущественно по направлению СЗ-ЮВ, а положительных – вкрест им. Хотя ситуация не совсем однозначна и получить свое объяснение только влиянием розы ветров может лишь отчасти.

Был проведен корреляционный анализ полученных пространственных распределений индикатора α с одной стороны, и значений индекса *NDVI* – с другой. Корреляция Пирсона [12] выполнялась в скользящем окне между рядами значений, упорядоченных по удаленности от АЭС. Показано, что абсолютно все мониторинговые площадки характеризуются отрицательной корреляцией сопоставляемых параметров. При этом выделяется отчетливый тренд усиления отрицательной связи по мере удаления точки от атомной станции. Иными словами по мере удаления от КоАЭС увеличивается степень влияния ^{137}Cs на состояние растений [5].

Заключение. Благодаря комплексным исследованиям состояния растительного покрова в районе расположения КоАЭС с помощью методов радиационной экологии и многозонального космического зондирования, была выявлена устойчивая связь между удельной активностью ^{137}Cs и благополучием фитоценозов. Показано, что вблизи атомной станции отрицательный эффект у растительных сообществ проявляется менее интенсивно, чем на большем удалении от нее (в пределах изучаемой территории). Установлено наличие градиента, характеризующего состояние лесных фитоценозов. В то же время необходимо продолжение радиоэкологических исследований лесов Евро-Арктического региона страны. При этом оценка бореальных фитоценозов, подверженных влиянию малых доз/концентраций техногенных поллютантов (радионуклиды, тяжелые металлы и др.) должна стать обязательным элементом комплексного экологического мониторинга природных (лесных) сообществ.

Список литературы

1. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2016 году. Мурманск, 2017. 180 с.
2. Кизеев А.Н. Содержание ^{137}Cs и ^{40}K в почвенно-растительном покрове в районе расположения Кольской атомной электростанции // Глобальный научный потенциал. 2016. № 5. С. 56–59.
3. Исаев А.С., Барталев С.А., Лупян Е.А. Спутниковое зондирование Земли – уникальный инструмент мониторинга лесов России // Вестн. РАН. 2014. Т. 84, № 12. С. 1073–1079.
4. Черных Н.А., Сидоренко С.Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере. М.: Изд-во РУДН, 2003. 430 с.
5. Кизеев А.Н., Силкин К.Ю. Оценка состояния лесных фитоценозов в 30-км зоне Кольской АЭС по наземным и спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 1. С. 125–135.
6. Landsat-7 Science Data Users Handbook // Goddard Space Flight Center, NASA. URL: https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-7-science-data-users-handbook/.
7. Using the USGS Landsat-8 Product // U.S. Geological Survey. URL: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php.
8. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
9. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
10. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. 116 с.
11. СанПин 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов, 2011 (в ред. от 06.07.11). 56 с.
12. Харченко М.А. Корреляционный анализ: учебное пособие для вузов. Воронеж гос. ун-т. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2008. 30 с.

УДК 556.131.11

В.Г. Коновалов, В.А. Рудаков

Институт географии РАН, Москва, Россия
e-mail: vladgeo@gmail.com

ВОПРОСЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ РОССИИ

По данным гляциологических каталогов [1–5] определено изменение за 1946–2005 гг. основных статистических параметров для совокупностей ледников на Северном Кавказе и в бассейне реки Катунь (Алтай). Установлены возможность и обоснованность использования локальных измерений абляции/летнего баланса массы на ледниках Джанкуат и Малый Актру в качестве дополнительного источника информации при моделировании и расчете сезонного стока рек снегово-ледникового типа питания.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, оледенение, бассейны рек, Северный Кавказ, река Катунь (Алтай), сезонный сток, моделирование, абляция, летний баланс.

Исходные данные, постановка задачи, методы решения. Необходимым и очевидным условием разработки и совершенствования методов моделирования, расчета и прогноза объема стока с площади оледенения в бассейнах рек снегово-ледникового типа питания служит использование морфометрических параметров всех ледников, расположенных выше замыкающего гидрологического створа. Этому условию для континентального оледенения России соответствует информация в гляциологических каталогах [1–5]. При подготовке этих справочников были использованы различные исходные данные и методы их обработки. Так, в Каталоге ледников СССР [1–2] контуры ледников, характеризующие состояние оледенения 60–70 лет тому назад, были визуализированы вручную по материалам аэрофотосъемки 1 : 20 000 / 1 : 25 000 и перенесены затем на топографические карты 1 : 100 000 для определения: числа ледников и их географических координат (долготы – Long, широты – Lat), площадей ледников Fgl и моренного покрова на них Fmor, высот начала Zmax и конца ледника Zmin, средней высоты ледника Zmean, равной (Zmax + Zmin) × × 0,5, ориентации Asp, максимальной Lmax и минимальной длины Lmin ледников. В Каталогах [3–4] основой для полуавтоматического определения площади, высотных и других параметров ледников служили изображения со спутника TERRA (сканер ASTER) цифровые модели рельефа (ЦМР) SRTM 3 и ASTER GDEM 2. При подготовке гляциологического каталога GAMDAM в большинстве регионов оледенения Азии была использована ЦМР SRTM 3, кроме Гималаев, Каракорума и Центрального Тянь-Шаня, где более приемлемой оказалась ЦМР ASTER GDEM 2 [5]. Контура ледников были оцифрованы вручную на 356 изображениях со спутника LANDSAT ETM+. В Каталогах [3–5] вместо параметра Zmean приведен другой – Zmed, соответствующий медиане распределения высоты в пределах контура ледника на ЦМР.

Диапазон однократных определений морфометрических параметров ледников охватывает: в Каталоге ледников СССР [1–2] 1943–1968 гг., в Каталоге RGI v.5 [3] 1965–2004 гг. на Северном Кавказе и 2006–2013 гг. в бассейне Катуни (Алтай), а информация в Каталоге GAMDAM [5] для ледников Катунь относится к 2000–2002 гг. Параметры Long, Lat, Fgl, Zmax, Zmin, Zmed в справочниках [3–5] получены с помощью стандартных программных модулей в ArcGIS.

В работе [6] обосновано использование высотно площадных параметров ледников за 1946–1975 гг. (данные [1–2]) и 1976–2005 гг. (данные [3]) для расчета стока с площа-

© Коновалов В.Г., Рудаков В.А., 2018

ди оледенения на Северном Кавказе и Алтае в течение 1946–2005 гг. Поскольку внутри каждого из этих интервалов обобщенные сведения о морфометрии ледников приняты устойчивыми, первая задача исследования заключается в оценке изменения площади, числа и параметров распределения гипсометрических характеристик ледников (асимметрия, эксцесс, среднее, среднеквадратичное отклонение, минимум, максимум, медиана) между их совокупностями в 1946–1975 и 1976–2005 гг. Распределение площади ледников Fgl в бассейнах рек Северного Кавказа и реки Катунь по данным [3] использовано также для оценки пространственной репрезентативности Fgl ледников Джанкуат и Малый Актру. Результаты представлены на рис. 1, 2.

В базе данных [7] Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS) содержатся ряды наблюдений за годовыми величинами абляции Ab и летнего баланса массы Bs на ограниченном числе «репрезентативных» ледников. Вторая практически важная задача нашей работы направлена на выявление возможностей использования локальных значений Ab/Bs как дополнительного аргумента при моделировании и расчетах речного стока за июнь-сентябрь (Qvi-ix) в масштабе речных бассейнов. Сведения по стоку получены из гидрологических справочников и ежегодников. Данные по температуре воздуха и осадкам извлечены из [8]. Метод решения этой задачи – регрессионный анализ и определение детерминированных вкладов независимых переменных в описание дисперсии функции. Результаты приведены в табл. 3.

Анализ. Значительное сокращение площади оледенения в 1946–2005 гг. (табл. 1, 2), выявленное по данным [1–2] и результатам дистанционного мониторинга [3–5], вполне согласуется с однообразной тенденцией роста средних взвешенных высот Zmax, Zmin, Zmean ледников в бассейнах рек Северного Кавказа и Катуни за исключение уменьшения Zmax на Алтае в Каталоге [5].

Таблица 1

Результаты мониторинга ледников в бассейнах рек Северного Кавказа

Index	Каталоги ледников		Zmax	Zmean	Zmin	Zmax	Zmean	Zmin	
	[1]	[3]	Z взвешенные по площади [2]			Z взвешенные по площади [3]			
			4382	3572	2814	4396	3630	2864	
Fgl	593,2	488,4	Индексы высоты и параметры Z [2]			Индексы высоты и параметры распределения Z [3]			
Ngl	457	371							
Param	Fgl [2]	Fgl [3]	Zmax	Zmean	Zmin	Zmax	Zmean	Zmin	Zmed
Asym	6,33	5,46	1,05	0,73	0,35	0,94	0,17	–0,12	0,05
Ex	53,25	39,02	1,57	1,06	1,12	2,21	0,42	0,28	0,25
RMSD	3,04	2,85	495	398	458	460	345	399	349
Mean	1,30	1,32	3 882	3 547	3 213	3 855	3 507	3 159	3 496
Min	0,10	0,03	2 760	2 660	2 000	2 674	2 554	1 983	2 477
Max	36,20	29,96	5 660	4 990	4 800	5 614	4 568	4 413	4 555
Med	0,40	0,40	3 800	3 525	3 210	3 813	3 517	3 205	3 507

Обозначения: Param – параметры распределений. Расшифровка характеристик Zmax, Zmean, Zmin, Zmed дана в тексте; Fgl – площадь ледников, км^2; Ngl – число ледников; Asym – асимметрия распределения; Ex – эксцесс распределения; RMSD – среднеквадратичное отклонение. Параметры распределений: Mean – среднее; Min – минимум; Max – максимум; Med – медиана. Все высоты Z – в м над уровнем моря. В квадратных скобках даны ссылки на источники исходных данных.

Количественные значения и изменение среднего, минимума, максимума и медианы в распределениях гипсометрических индексов Zmax, Zmin, Zmean ледников на Алтае и Северном Кавказе оказались достаточно разнообразными, что связано с минимумом площади Fgl в [3–5], по сравнению с [1–2], и соответственным влиянием на параметры распределений. В большинстве случаев эксцесс распределений Zmax, Zmin, Zmean близок к нулю, что более или менее согласуется с нормальной кривой

распределения. Эксцесс, среднее и медиана распределений Fgl в [1–2], и [3–5] указывают на подавляющее преобладание числа ледников с площадью <0,5 км^2 (см. также рисунок). Этот результат не подтверждает заданную априорно репрезентативность ледников Джанкуат (Fgl = 2,5 км^2) и Малого Актру (Fgl = 2,9 км^2) относительно рассмотренных совокупностей ледников на Северном Кавказе и Алтае. Добавление локальных величин Ab/Bs в качестве дополнительного аргумента в уравнения регрессии для региональных расчетов стока рек снегово-ледникового типа питания дало эффект в ограниченных случаях (выделены полужирным в табл. 3).

Таблица 2

Результаты мониторинга ледников в бассейне реки Катунь (Алтай)

Index	Каталоги ледников		Zmax	Zmean	Zmin	Zmax	Zmean	Zmin	
	[2]	[3/5]	Z взвешенные по площади [2]			Z взвешенные по площади [3/5]			
			3599	3103	2608	3625/3538	3159/3102	2694/2665	
Fgl	780	525/505	Индексы высоты и параметры Z [2]			Индексы высоты и параметры распределения Z [3/5]			
Ngl	808-815	965/605							
Param	Fgl [2]	Fgl [3/5]	Zmax	Zmean	Zmin	Zmax	Zmean	Zmin	Zmed
Asym	7,1	6,6/5,8	0,26	–0,41	–0,22	0,00/-0,07	-0,46/-0,19	0,19/0,05	0,27/–0,05
Ex	67,2	54,3/43,3	0,91	0	–0,01	0,80/0,04	1,14/0,10	0,64/-0,21	0,93/–0,05
RMSD	2,09	1,43/1,74	317	228	243	329/349	253/287	253/302	265/300
Mean	0,96	0,54/0,84	3320	3039	2760	3253/3282	3062/3065	2872/2849	3052/3056
Min	0,10	0,02/0,05	2350	2235	1920	1573/2170	1571/2156	1569/1945	1571/2128
Max	28,2	16,7/18,1	4510	3740	3480	4403/4470	3854/4152	3792/3824	3890/4113
Med	0,40	0,13/0,34	3320	3070	2760	3251/3299	3081/3085	2880/2841	3067/3056

Примечание. Расшифровку обозначений см. в табл. 1.

Таблица 3

Вклады аргументов P, T (данные [8]) и Ab/Bs (данные [7] на ледниках Актру и Джанкуат) в уравнения регрессии для расчета стока за июнь – сентябрь

Река	Гидропост	Fbas	Fgl [1-2]	Fgl [3-4]	$R(Qvi\text{-}ix)_3$	ηP	ηT	$R(Qvi\text{-}ixi)_4$	ηAb/Bs
Бассейн реки Катунь (Алтай)									
Катунь	Сростки	58400	738,9	524,7	0,82	1,00	0,00	0,82	**0,18**
Катунь	АКТ	14199	170,2	118,6	0,75	1,00	0,00	0,76	**0,25**
Чуя	Белый Бом	10900	232,2	170,1	0,65	1,00	0,00	0,67	0,04
Актру	Актру	36,0	31,0	28,9	0,58	0,02	0,98	0,74	**0,57**
Бассейны рек на Северном Кавказе									
Терек	Владикавказ	1 490	66,6	46,0	0,72	1,00	0,00	0,72	**0,27**
Терек	Котляревская	8 920	685,6*	637,6	0,72	1,00	0,00	0,72	**0,15**
Малка	Прохладная	2 860	189,5*	174,3	0,68	1,00	0,00	0,69	0,03
Баксан	Заюково	2 100	154,2	140,2	0,71	0,85	0,15	0,73	0,00
Чегем	Нижний Чегем	739	59,3	49,5	0,84	0,51	0,49	0,87	**0,21**
Черек	Советский	1 350	198,1	152,2	0,72	0,15	0,85	0,74	**0,31**
Теберда	Теберда	504	57,6	48,2	0,70	0,27	0,73	0,70	0,00
Малка	Каменно. мост.	1 540	57,3	52,3	0,73	1,00	0,00	0,74	0,05

Обозначения: Fbas – площадь бассейна до гидропоста, Fgl [1–2] – площадь ледников в Каталоге ледников СССР, Fgl [3–4] – площадь ледников в каталогах [3–4] все площади в км^2 до замыкающего гидропоста, кроме общей площади оледенения в бассейне (отмечено символом*), $R(Qvi\text{-}ix)_3$ – сводный коэффициент корреляции уравнения регрессии Qvi-ix=f(P,T) для трех либо четырех $R(Qvi\text{-}ixi)_4$ аргументов, P, T – сезонные суммы и средние значения осадков P и температуры воздуха T за характерные периоды; ηP – детерминированный вклад P в описание дисперсии стока за июнь-сентябрь Qvi-ix, ηT – то же для T; При использовании четырех аргументов к P и T добавлена сезонная абляция Ab либо летний баланс массы Bs на ледниках Малый Актру (бассейн реки Катунь) или Джанкуат (бассейн реки Терек); ηAb/Bs – детерминированный вклад добавленного аргумента в описание дисперсии стока Qvi-ix, АКТ – сумма стока рек Аккем, Кучерла и Катунь (гидропост Тюнгур).

Рис. 1. Бассейн реки Катунь

Рис. 2. Бассейны рек на Северном Каказе

Заключение. Надежными, отвечающими тенденции сокращения площади оледенения на Алтае и Северном Кавказе и пригодными для гидрологических расчетов служат средние взвешенные высоты Zmax, Zmin, Zmean совокупностей ледников. Для интервала времени 1946–1975 гг. они были получены из [1–2], а для 1976–2005 гг. – в результате мониторинга колебаний размеров ледников со спутников TERRA и LANDSAT+. Измерения годовой абляции/летнего баланса массы на ледниках Малый Актру и Джанкуат можно считать регионально репрезентативными только для части водосборов (табл. 3) в бассейнах рек Северного Кавказа и реки Катунь (Алтай).

Список литературы

1. Каталог ледников СССР: Т. 8. Ч. 3, 5–7, 11. Л: Гидрометеоиздат, 1967–1977.

2. Каталог ледников СССР: Т. 15. Вып. 1. Ч. 4–7. Л: Гидрометеоиздат, 1978.

3. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 5.0. July 2015. http://glims.org/RGI/index.html

4. RGI Consortium. 2017. A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. DOI: https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60.

5. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers / T. Nuimura, A. Sakai, K. Taniguchi [et al.] // The Cryosphere. 2015. № 9. P. 849–864. DOI: 10.5194/tc-9-849-2015.

6. Коновалов В.Г., Рудаков В.А. Гидрологический режим ледников в бассейнах рек Северного Кавказа и Алтая // Лед и Снег. 2018. № 1. P. 21–40. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-1-21-40.

7. Global Glacier Change Bulletin. № 1 / Eds.: Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hüsler F., Machguth H., Mölg N., Paul F., and Hoelzle. World Glacier Monitoring Service. Zürich, Switzerland, 2015. 230 p. DOI: 10.5904/wgmsfog-2015-11.

8. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков, температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе на метеостанциях России. URL: http://meteo.ru/data.

УДК 551.515.4; 551.515.6

Т.С. Кошикова

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия, e-mail: takosh_10@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ АТМОСФЕРЫ

Произведена оценка значений индекса неустойчивости на основе данных наличия грозы за теплый период 2016–2015 гг. на территории Западной Сибири. Получено, что в случаях с внутримассовой конвекцией значения индекса неустойчивости KI достигают больших значений, чем при фронтальной. В 2016 г. отмечается преобладание внутримассовых гроз, которое говорит об изменении климата над территорией Западной Сибири.

Ключевые слова: Западная Сибирь, грозовая деятельность, индекс неустойчивости.

Введение. В настоящее время отмечается увеличение частоты появления конвективной облачности и суммы осадков за теплый период на территории Западной Сибири [1]. В свою очередь, большую частоту проявления имеет мезомасштабная облачность, которая не свойственна рассматриваемой территории. Объекты мезомаштаба, такие как мезомаштабный конвективный комплекс, мезовихри и линии шквала, имеющие жизненный цикл около 16 ч, тяжело проследить по данным наземных станций, в связи с этим для исследования используют спутниковые снимки. Спутниковые данные являются основными, а в ряде случаев единственными данными, используемыми для изучения процессов мезомасштабной конвекции.

Целью настоящего исследования является оценка и определение пороговых значений индекса неустойчивости при внутримассовой и фронтальной конвекции в случаях наблюдения грозовой деятельности.

Мезомасштабная облачность возникает при внутримассовом образовании и, имея небольшую продолжительность жизни, является труднопрогнозируемым объектом. Обнаруживается такая облачность обычно только с помощью радиолокационных наблюдений или изображений, получаемых с метеорологических спутников Земли.

По мнению Н.Ф. Вельтищева [2], наилучшее представление об эволюции конвективных систем дают снимки с геостационарных спутников. Данные обычных наблюдений в свободной атмосфере (радиозондирования) не обеспечивают необходимого пространственно-временного разрешения для составления прогноза развития конвекции. В свою очередь, по территории Западной Сибири наиболее доступными являются данные наблюдений с полярно-орбитальных спутников, например, с космических аппаратов Terra, Aqua и NOAA. С их помощью можно проводить мониторинг и своевременно оповещать о зарождении и приближении коротко живущих опасных циклонов макро- и мезомасштаба, создающих штормовые условия, получать информацию о температуре атмосферы, концентрации водяных паров. На спутниках Terra и Aqua одним из ключевых приборов является спектрорадиометр MODIS, который имеет 36 каналов и позволяет производить регулярную съемку территории с пространственным разрешением от 250 до 1 000 м [3].

В начале своего развития спутниковая информация носила скорее качественный характер, по мере изучения атмосферы Земли обнаружили, что встречаются системы

© Кошикова Т.С., 2018

движений с горизонтальными масштабами мезо-β (20–200 км) и мезо-α (>200 км), прогноз которых может способствовать повышению качества краткосрочного прогноза погоды, поскольку эти мезомасштабные структуры, в отличие от движений синоптического масштаба, не разрешались существующей сетью измерений и ускользали ранее из поля зрения метеорологов в связи с характерным временем жизни.

Линия шквалов представляет с собой зону из скопления кучево-дождевых облаков протяженностью тысячи километров, шириной – 50–100 км. Время жизни линии шквалов – более суток, а время жизни отдельных мезомасштабных скоплений, из которых она состоит, не превышает обычно 5–6 ч. Мезомасштабными вихрями называют циклонические циркуляции в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами, не превышающими 1 000 км, которые зарождаются и продолжают существовать вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба. МКК – скопление кучево-дождевых облаков овальной формы, инфракрасные изображения которых имеют: площадь непрерывного облачного покрова с температурой верхней границы ниже –32 ºС составляет не менее 105 км^2; и с жизненным циклом около 16 ч, хотя его влияние может ощущаться до 36 ч [2].

Материалы и методы исследования. В качестве материалов для исследования были использованы данные из [4] наличия гроз по территории Западной Сибири на основе 9 станций: Томск, Бакчар, Болотное, Кемерово, Колпашево, Огурцово, Первомайское, Тайга, Тисуль – за 2015–2016 гг. с апреля по октябрь. По данным этих метеорологических станций за исследуемый период было выявлено 132 дня с грозой.

Представление об устойчивости атмосферы можно получить, как исходя из формы облачности, так и рассчитав индексы неустойчивости. Расчет KI основан на вертикальном градиенте температуры, влажности воздуха в нижней тропосфере, а также учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха. Он характеризует степень конвективной неустойчивости воздушной массы, которая необходима для возникновения и развития гроз. Чтобы оценить индекс неустойчивости KI, отдельно для внутримассовой и фронтальной конвекции, все случаи были дифференцированы с помощью спутниковых снимков полученных с космических аппаратов Terra и Aqua, методом визуального дешифрирования. В результате было выделено 59 дней с грозой при внутримассовой конвекции, 73 – фронтальной. На спутниках Terra и Aqua одним из ключевых приборов является спектрорадиометр MODIS, который имеет 36 каналов и позволяет производить регулярную съемку территории с пространственным разрешением от 250 до 1000 м. С помощью программы Panoply были извлечены из *.nc – файлов содержащих данные измерений радиометра ATOVS необходимые слои с температурой воздуха и температурой точкой росы [5]. Далее в программе MatLab рассчитан KI и созданы графики для проведения шкалирования индекса при внутримассовых и фронтальных грозах. В источнике [6] приводится таблица оценки KI с точки зрения площади покрытия грозой, и с точки зрения вероятности возникновения грозы.

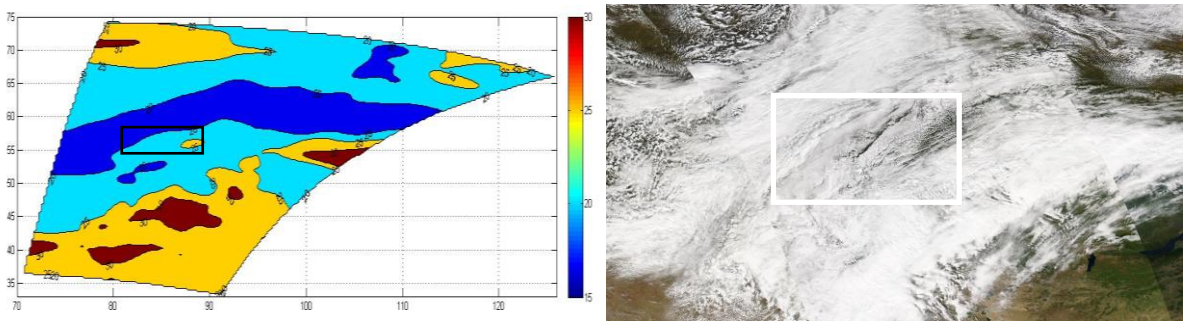
Весна и лето 2016 г. стали на Северном полушарии Земли самыми теплыми за всю историю метеорологических наблюдений. Аномальное тепло также было отмечено на территории Западной Сибири, эту аномалию можно проследить по результатам отношения количества внутримассовых к количеству фронтальных гроз за 2015–2016 гг. Здесь в 2015 г. было отмечено 47 фронтальных и 15 внутримассовых гроз, а в 2016 г. 26 и 44 соответственно. Исходя из этих показателей видно, что в 2016 г. отмечается преобладание внутримассовых гроз над фронтальными, которое не свойственно исследуемой территории и говорит об изменении климата над территорией Западной Сибири.

Наиболее часто встречающееся значение индекса неустойчивости KI – 25–30 ºС. При фронтальной грозе на это значение приходится 61% случаев, а при внутримассовой грозе 77 %. Значений KI 30–35 ºС при фронтальных грозах не встретилось, можно сделать вывод, что такие величины возникают только при внутримассовой конвекции.

Значения KI 20–25 ºС хватает для возникновения как внутримассовых гроз, на них приходится 9 % случаев, так и фронтальных, 39 % случаев. Но чаще величина KI 20–25 ºС наблюдается при фронтальных грозах.

В качестве примера были выбраны 5 случаев, из которых: 4 июля, 7 августа – дни с внутримассовой конвекцией, 26 мая, 13 сентября – дни с фронтальной конвекцией.

Сначала опишем случаи фронтальной конвекции. В мае 2016 г. на территории исследования уже преобладали «летние» явления, хотя отмечались и заморозки. Развитие процесса началось 26 мая, гроза сформировалась на холодном фронте. Затем развитие этой же фронтальной системы привело к тому, что 29 мая и ночью 30 мая в Новосибирской, Томской областях прошли сильные дожди (15–25 мм), отмечались грозы, град диаметром до 4 мм, и днем 28 мая произошло усиление ветра до 15–18 м/с [1]. При анализе KI от 26 мая можно отметить, что в основном наблюдались значения 25–30 °С, что согласно процентному соотношению распределения грозы по территории говорит о том, что не более 10–20 % территории занято грозовыми очагами в соответствии с [6]. При этом отмечались значения KI 20–25 °С, что соответствует формированию отдельных изолированных гроз, и 30–35 °С – 20–50 % территории занимают грозовые очаги.



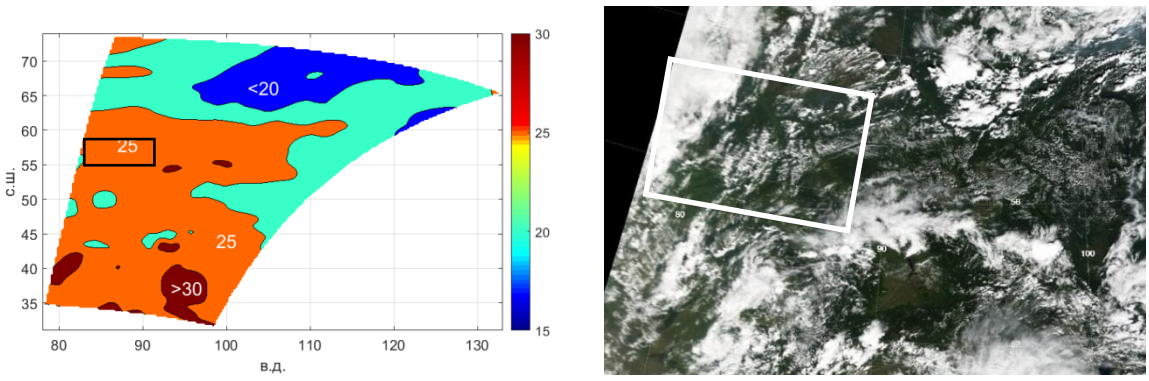
а *б*

Рис. 1. Распределение индекса неустойчивости KI по исследуемой территории от 13 сентября 2015 г. (*а*); космическое изображение спетрорадиометр MODIS KA Aqua за 13 сентября 2015 г. (*б*), время пролета 06:47 UTC [7] (выделенная область указывает на территорию исследования)

В сентябре 2015 г. преобладала прохладная погода, средняя месячная температура была ниже климатической нормы на 1 °С. В Новосибирской области 12–14 сентября отмечались сильный дождь (18–25 мм осадков), гроза, порывы ветра 19–24 м/с [1]. Произошло резкое понижение температуры воздуха на 8–14 °С. Гроза наблюдалась на фронте только 13 сентября, в этот день по территории преобладало значение KI 20–25 °С (рис. 1), что говорит о формировании отдельных изолированных гроз. Но, местами отмечались значения 15–20 и 25–30 °С, следовательно, местами не более 10 % территории было покрыто грозовыми очагами, а местами площадь покрытия территории достигала 20%. Вероятность возникновения гроз колеблется в диапазоне 50–75 %.

Далее опишем случаи с внутримассовой конвекцией. В июле в южных районах азиатского региона на пути циклонов: осадков выпало 130–150 % месячной нормы [1]. Также отмечено, что эти циклоны приносили обильные осадки и на юг Западной Сибири. В результате заполнения ложбины 1 июля 2016 г. мы дешифрировали стадию облачного вихря «след циклона», на месте которого 4 июля образуются МКК. Значения KI наблюдается в диапазоне 25–30 °С, следовательно, грозовые очаги занимают 10–20 % территории.

В августе сильные дожди привели к избытку осадков в Западной Сибири. Днем 7 августа и в течение всех суток 8 августа в Новосибирской области, наблюдался комплекс неблагоприятных явлений погоды: дожди, местами сильные (29–30 мм за 12 ч), грозы, усиление ветра до 18 м/с [1]. Значения KI 7 августа (рис. 2) наблюдается в диапазоне 25–30 °С, грозовые очаги занимают 10–20 % территории.



а *б*

Рис. 2. Распределение индекса неустойчивости KI по исследуемой территории от 7 августа 2016 г. (*а*), космическое изображение спетрорадиометр MODIS КА Terra за 7 августа 2016 г., время пролета 04:50 UTC (*б*) [7] (выделенная область указывает на территорию исследования)

Заключение. За теплый период 2015–2016 гг. на территории Западной Сибири было отмечено 55 % гроз на фронтальной системе и 45 % при внутримассовой конвекции. При внутримассовой конвекции значения индекса неустойчивости KI характеризовались значениями на 5 °С больше, чем при наличии грозовой деятельности в случаях развития фронтальной конвекции. Преобладание внутримассовых гроз, которое отмечается в 2016 г., говорит об изменении климата над территорией Западной Сибири. Значений индекса неустойчивости 30–35 ºС возникает только при внутримассовой конвекции. Особенностью внутримассовой конвекции является очаговая локализация вероятности возникновения гроз более 80 %. При фронтальной конвекции вероятность возникновения гроз не превышает 75 %, и при этом имеет большие площади распределения неустойчивости атмосферы.

Список литературы

1. Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в мае 2016 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 8–12; 2015. № 8–12. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=26527022.

2. Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование: сб. лекций. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 136 с.

3. Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектрорадиометра MODIS/Terra данными аэрологического зондирования / В.П. Горбатенко, О.Е. Нечепуренко, С.Ю. Кречетова, М.Ю. Беликова // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 7. С. 603–607.

4. Российский гидрометеорологический портал ВНИИГМИ-МЦД. URL: http://www.meteo.ru.

5. ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"». URL: http://www.rcpod.ru/.

6. Индекс неустойчивости. URL: http://flymeteo.org/stat/indexneust.php.

7. MODIS Atmosphere. URL: https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/.

УДК 556.38

В.Г. Маргарян

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения
e-mail: vmargaryan@ysu.am

СОВРЕМЕННОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ АРАРАТСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА И ЗАДАЧИ ЕГО ОХРАНЫ

Представлены особенности формирования подземных вод, обсуждено современное состояние использования и охраны водных ресурсов изучаемой территории, выяснены и проанализированы закономерности их пространственного распределения, выявлена динамика изменения их запасов, а также представлена уязвимость водных ресурсов в рамках воздействия природных и антропогенных факторов. Кроме того, предложены пути эффективного использования и охраны водных ресурсов.

Ключевые слова: водные ресурсы, использование и охрана, современное экологическое состояние, проблемы, Араратский артезианский бассейн.

Введение. Вследствие постройки рыбоводческих прудов массовым и хаотичным образом, без соответствующих гидрогеологических расчетов и проектов, Араратский артезианский бассейн в настоящее время находится в экологически бедственном состоянии. Водные ресурсы изучаемой территории находятся под угрозой воздействия также других факторов (глобальное изменение климата, постройка новых водохранилищ в верхних течениях реки Аракс и ее притоков), часть которых вне непосредственного контроля правительства Армении. В результате, как из-за изменения климата, так и по причине антропогенных факторов на изучаемой территории наблюдалось и наблюдается значительное изменение количества имеющихся водных ресурсов. Таким образом, вопрос эффективного управления водными ресурсами приобретает большую важность и требует скорейшего решения.

Учитывая выше сказанное, целью работы явилось выявить и оценить современное состояние и задачи эффективного использования и охраны водных ресурсов изучаемой территории, выяснить и проанализировать закономерности пространственно-временного распределения водных ресурсов, их уязвимость в рамках воздействия изменения климата, разработать пути эффективного их использования и охраны.

Материалы и методы исследования. Для решения поставленных задач теоретической и информационной основой послужили соответствующие исследования [1; 3–7; 9], социально-экономические программы и программы перспективного развития, проекты, отчеты, решения правительства Армении, доклады [2; 8]. В качестве исходного материала использованы данные фактических гидрологических наблюдений МЧС Республики Армения Службы по гидрометеорологии и активному воздействию на атмосферные явления, Министерства охраны окружающей среды Армении и Национальной статистической службы Республики Армении.

Араратский артезианский бассейн расположен в пределах Араратской равнины (рис. 1), в долине среднего течения реки Аракс, на высоте 800–1 000 м над уровнем моря и в пределах республики занимает площадь около 1 300 км^2. Араратская равнина вытянута с северо-запада на юго-восток на 120 км, имеет ширину 10–30 км и служит основным естественным резервуаром для подземных вод. Равнина имеет огромную площадь питания, охватывающую юго-западные склоны Гегамского нагорья и хребта Ай-

© Маргарян В.Г., 2018

какан пар с вершинами Большой и Малый Арарат, массив г. Арагац, Карсское плато и бассейн среднего течения реки Аракс. Араратская равнина издревле считалась житницей Армении, и в настоящее время это важнейший сельскохозяйственный регион республики.

Рис. 1. Космическое изображение Араратской долины (Google Earth, 1970)

Араратская равнина – один из наиболее засушливых районов Закавказья, особенно ее низменная часть, где годовая сумма осадков достигает 200–300 мм. Климатические условия этой территории благоприятны для выращивания различных культур, начиная с садовых и заканчивая злаками и корнеплодами [1]. Сельское хозяйство в низинной и предгорной частях района развивается на орошаемых землях.

В морфоструктурном отношении бассейн представляет собой крупную межгорную депрессию овального очертания с андезито-базальтовыми лавами и их пирокластическими разностями. В предгорной зоне юго-восточной части обнажаются доверхнетретичные туфогенные, песчано-глинистые и известково-мергельные породы, которые, погружаясь под комплекс озерно-речных отложений, слагают региональное водоупорное ложе артезианского бассейна [1].

Основная роль в аккумуляции и транспортировке подземных вод принадлежит андезито-базальтовым лавам и четвертичным подрусловым отложениям, представленным рыхлообломочными разностями пород. Региональным водоупором равнины являются палеоген-неогеновые и более древние осадочные (глинисто-песчанистые) образования. В настоящее время на основании данных большого числа скважин, вскрывших кровлю третичных водоупорных отложений, получено достоверное представление о погребенном рельефе равнинной части этой котловины [5].

Артезианские воды залегают на больших глубинах – около 100 и более метров. Как правило, это целые водные бассейны, питание которых происходит из подземных источников. Обычно артезианская вода находится под давлением, в неоторых местах выходит самотеком, а из пробуренной скважины – фонтанирует. Прекращение самотека говорит о том, что давление в бассейне упало, т.е. уровень воды резко снизился.

Централизованные грунтовые водотоки, поступающие с территории Армении в Араратский артезианский бассейн, составляют 20,29 или 639,9 млн м3/г. Средняя арифметическая величина глубинного стока восстанавливающихся (динамических) природных ресурсов грунтовых вод 57,8 или 1 822,8 млн м3/г. [2].

В 1984 г. Государственным комитетом запасов утвержден объем годового максимального водозабора из грунтовых водных ресурсов Араратской долины (1,09 млрд $м^3$/г.), что в 2015 г. установлено законом Армении о национальной программе воды.

В работе применены методы: характеристики, ситуационный, системный, математико-статистического анализа, математический, сопоставления и сравнения, анализа.

Результаты и обсуждения. Воды Араратского артезианского бассейна используются в целях орошения, гидроэнергетики, рыборазведения, питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения и технологического обеспечения водой объектов промышленности (в особенности, пищевой и легкой). Араратский артезианский бассейн (с территорией около 9 000 км^2 и находящийся на глубине 80–180 м) состоит из трех подземных слоев. На самом верху – грунтовые воды, а второй и третий слои – пресная питьевая вода (также высококачестенные воды для рыбоводства), защищенная водонепроницаемыми глиняными слоями. Из скважин, сделанных в двух глубоких слоях, в питьевых, оросительных и технических целях снабжаются водой города Ереван, Арташат, Армавир, Эчмиадзин и соседние общины.

На изучаемой территории есть стратегические запасы высококачественных ресурсов подземных вод, которые без дополнительного очищения пригодны для питья. Свыше 50 % эксплуатационных запасов пресных подземных вод республики сосредоточены именно в Араратском артезианском бассейне. Отметим, что Араратский артезианский бассейн является основным источником питьевой воды для почти половины населения Армении, включая город Ереван. В пределах Араратской межгорной впадины с горизонтом грунтовых вод связаны выходы нескольких групп источников, запасы которых по оценке 1984 г. составили 21,9 или 690,6 млн м^3/год.

Воды Араратских артезианских горизонтов слабо минерализованы (обычно до 0,6 г/л), мягкие, температура 8,0–16,0 °С, относятся к гидрокарбонатному кальциевому типу. Напорные горизонты питаются подземными водами окружающих котловину горных хребтов, а также подрусловыми водами левых притоков реки Аракс. Поверхностный сток и выпадающие на площади равнины атмосферные осадки в основном питают лишь горизонт грунтовых вод. Лавовые воды обладают высокими питьевыми качествами. Приуроченные к ним родники имеют благоприятные условия для их каптажа. Около 80 % ресурсов подземных вод, приуроченных к лавам, в настоящее время используются для водоснабжения Ереванского экономического района [1].

На изучаемой территории значительная часть водопотребления расходуется в сельскохозяйственных целях (включая орошение и использование в других сельскохозяйственных потребностях). Так, в 2016 г. 97 % общего водопотребления (1 289,1 млн м^3) выпало на долю потребления в сельскохозяйственных целях (табл. 1). С другой стороны, согласно базе статистических данных Национальной статистической службы Армении большая часть водозабора Араратского марза (65 %) Араратского артезианского бассейна производится из грунтовых источников (табл. 2). В Араратском артезианском бассейне в 2016 г. общий водозабор составил 1 489,3 млн м^3, 44 % которого – из грунтовых источников.

Таблица 1

Объем водопотребления по назначению и потери при транзитной перевозке, млн м^3, 2016 г.

Общее водопотребление	Водопотребление по назначанию			Потери при транзитной перевозке
	Питьевое, бытовое	Промышленное, коммунальное и строительство	Сельское хозяйство, рыболовство, лесное хозяйство	
Араратский марз				
638,8	5,8	4,5	628,5	117,4
Армавирский марз				
650,3	5,5	21,9	622,9	82,8

На изучаемой территории значительная часть водопотребления расходуется в сельскохозяйственных целях (включая орошение и использование в других сельскохозяйственных целях). Так, в 2016 г. 97 % общего водопотребления (1 289,1 млн м^3)

выпало на долю сельского хозяйства (табл. 1). С другой стороны, согласно базе статистических данных Национальной статистической службы Армении большая часть водозабора Араратского марза (65 %) Араратского артезианского бассейна производится из грунтовых источников (табл. 2). В Араратском артезианском бассейне в 2016 г. общий водозабор составил 1 489,3 млн м^3 (рис. 2.), 44 % которого – из грунтовых источников.

Рис. 2 Водозабор и водопотребление, млн м^3,
в Араратском артезивнсвком бассейне за 2011–215 гг.

Таблица 2

Объемы водозабора из грунтовых источников в 2016 г.

Общий водозабор	Из грунтовых водных источников	Общий водозабор	Из грунтовых водных источников	Общий водозабор	Из грунтовых водных источников
Араратский марз		Армавирский марз		Всего	
756,2	491,2	733,1	167,9	1489,3	659,1

Согласно данному министерством охраны окружающей среды разрешению на водопользование в Араратской долине большая часть грунтовых водных ресурсов (90 %) используется в целях рыбоводства (табл. 3). В отличие от грунтовых вод, использование поверхностных вод по сферам проводится сравнительно более равномерно.

Таблица 3

Водопотребление на Араратской равнине по разрешению
на водопользование (2015 г.)

Цель водопотребления	Грунтовые воды		Поверхностные воды	
	млн м^3/г.	%	млн м^3/г.	%
Орошение	57	6	48	26
Промышленная	1	0	32	18
Гидроэнергетика	–	0	45	24
Рыборазведение	906	90	43	24
Питьевая и в иных целях	22	2	–-	0
Бутилирование	0,1	0	–	0
В иных целях	17	2	14	8
Всего	1,004	100	182	100

За последние годы рыбоводство в Араратской долине стало одной из самых быстро развивающихся отраслей. Если в 1990-е гг. на изучаемой территории было всего 10 рыбных ферм, то в 2000-е их число резко возросло и уже в 2013 г. составило 190. В 2015 г. было зарегистрировано 182 рыбные фермы, из которых 28 не эксплуатируемые. Основным водным источником рыбных ферм являются артезианские грунтовые воды, исходя из их высокого качества.

Математическим моделированием оценено воздействие централизованного водозабора грунтовых вод на режим вод равнинной территории котловины. Выяснилось, что суммарный водозабор с расходом 20 м^3/с снижает напоры подземных вод центральной части Армавирской впадины до 4 м, и это уменьшение практически не влияет на дебит существующих здесь крупных родников; б) водозабор подземных вод в количестве 6,5 м^3/с приводит к снижению напора артезианских вод центральной части Арташатской и Араксаванской впадин соответственно на 3–5 и 5–7 м, при этом наблюдается понижение уровня грунтовых вод примерно на 1 м [10].

Развитие рыбного хозяйства помимо положительного эффекта породило и ряд весьма негативных экологических последствий. Так, в сфере быстро развивающегося рыбоводства потребление грунтовых вод под давлением за период с 1983–2013 гг. привело к снижению пьезометрических уровней скважин с 6,0–9,0 до 15 м, сокращению расходов скважин, сокращению артезианской зоны Араратской равнины на 67 %, к уменьшению выходов природных источников, прекратились выходы воды нескольких групп природных источников. Более того, из-за падения давления грунтовых вод более 200 скважин больше не фонтанируют. В результате создалась серьезная проблема недостатка воды для водоснабжения почти 30 общин Араратской равнины и Армянской атомной электростанции [8].

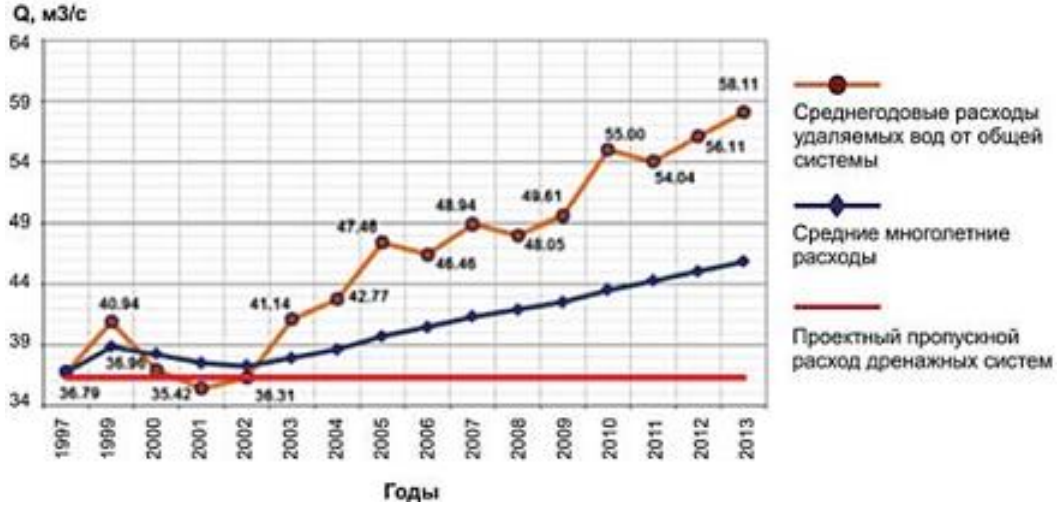


Рис. 3. Динамика изменения расходов сбрасываемых вод из коллекторно-дренажных систем Араратской равнины в период 1997–2013 гг. [7]

С другой стороны, коллекторно-дренажная сеть Араратской долины сверхперегружена обратными сбросами рыбных ферм. Начиная с 2003г., объем воды, сбрасываемый в дренажную сеть, увеличивался сначала постепенно, затем – резко (рис. 3), достигнув в 2013 г. 1 832,6 млн м^3 (в том числе 877 млн м^3 от рыбных ферм), и на 60 % превысил проектную мощность сети. Это привело к повышению уровня воды в сети и уровня грунтовых вод соседних территорий, переувлажнению почв, обводнению населенных пунктов (рис. 4), засолению и ощелачиванию почв, сокращению пропускной способности дренажной сети и, в конечном счете, снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Увеличились также расходы на эксплуатацию и охрану дренажной сети [8].

Отметим также, что согласно Национальным сообщениям об изменении климата, Араратский артезианский бассейн считается одной из самых уязвимых территорий Армении по отношению к изменению климата. По прогнозам, до 2030 г. почти на 11 % уменьшатся осадки, в результате чего существенно изменится речной поверхностный сток (на 25 %). В результате также будет наблюдаться уменьшение запасов грунтовых водных ресурсов. Предусмотрено также создание водохранилищ в верхнем течении реки Аракс, проектный объем которых составляет около 1,5 млрд $м^3$/г.

Рис. 4. Космический снимок рыбных хозяйств в Араратской равнине [7]. Темные бурые пятна показывают процессы обводнения близлежащих территорий сбрасываемой водой

С целью сокращения объемов водозабора из грунтовых водных ресурсов в 2013 г. принята новая политика в области водопотребления и строгие правовые акты (пересмотр размера оплаты пошлины за пользование грунтовой водой с целью рыбоводства, изменение условий на разрешение водопотребления и режимов использования грунтовой воды, закрытие заброшенных скважин, консервирование или приведение к режиму блокировки, расширение сети мониторинга грунтовых водных ресурсов Араратского артезианского бассейна). Начато также применение новых технологий, включая внедрение полузакрытых систем вторичного использования воды, технологий эффективного использования воды и энергии, улучшение гидрогеологической сети и сети мониторинга грунтового водозабора и управление данными с применением современных инструментов, способствующих принятию решений.

Несмотря на подзаконодательные акты, принятые правительством Армении в 2013–2015 гг., и новую политику, направленную на решение проблем, связанных с грунтовыми водными ресурсами Араратской равнины, тем не менее еще в 2016 г. объем фактического водозабора из грунтовых водных ресурсов Араратской равнины пока что на 45 % превышает установленный годовой максимальный объем водозабора. В 2013 г. грунтовый водозабор только для рыбоводства превысил установленный Комитетом объем.

Заключения и предложения. Таким образом, в Араратском артезианском бассейне за последние годы из-за нерационального использования и эксплуатации артезианской воды в рыбной промышленности (превышен допустимый предел потребления водных ресурсов), стало под угрозой естественное состояние грунтовых вод, возникли серьезные социально-экономические проблемы, т.е. возник целый комплекс экологических проблем.

Самотечные водоемы артезианского бассейна, которые являются единственным источником воды для множества сел, во многих местах уменьшились и высохли, поскольку вырытые ямы для рыбоводства в низменной части забирают давление водоемов-фонтанов верхней части. Часть самотечных скважин в аварийном состоянии и не имеют клапанов, вода оттуда течет беспрерывно. Многие из сельчан лишены возмож-

ности орошать свои поля. Часть земель осталась неорошаемой. Из-за снижения уровня воды уменьшилась естественная влажность почвы (что приводит к росту потребления воды для орошения), сократились выходы источников (Севджур-Акналич). В результате, с целью удовлетворения потребности в воде возникает проблема забора дополнительной воды из озера Севан, что может стать опасностью для экосистемы озера. Также из-за образовавшихся пустот верхний слой почвы оседает, создавая угрозу для безопасности построек.

С другой стороны, для рыбной промышленности вода используется один раз, которая сбрасывается в Аракс или дренажные каналы и создает новые экологические проблемы, в то время, как эту воду можно использовать также с целью орошения. Эта вода, попадая в дренажную систему (искусственный канал для сброса лишних вод), мешает дренажным работам, при этом поднимается уровень грунтовых вод, часть пахотных земель становится болотистой и соленой, создается опасность малярии.

Поэтому необходимо:

- создать систему сбора и управления комплексных, надежных данных об использовании грунтовых вод;
- создать центральную систему единого управления и охраны водных ресурсов армении, в том числе грунтовых вод;
- осуществить соответствующие законодательные изменения;
- провести гидрогеологические исследования для корректировки запасов воды в бассейне и связанных с ними территорий;
- запретить предоставление новых разрешений на забор воды из араратского артезианского бассейна для целей рыбного хозяйства;
- ограничить общий водозабор из грунтовых вод в араратском артезианском бассейне;
- внедрить в рыбоводческие хозяйства современные технологии экономного водопользования;
- осуществить мониторинг, внедрение закрытой и полузакрытой систем экономии воды во всех действующих рыбных хозяйствах;
- запретить в пределах самотечной зоны бурение новых скважин;
- ликвидировать скважины, находящиеся в антисанитарном состоянии, а также существующие аварийные и бесхозные скважины;
- установить и усилить контроль за потреблением грунтовых вод.

Список литературы

1. Амбарцумян П.В., Меликян Р.А., Меликян Ш.Р. О закономерности пространственного распространения подземных вод на территории Республики Армения // Вестн. ГИУА. Серия «Гидрология и гидротехника». 2014. Вып. 17, № 1. 27–37 с.

2. Изучение оценки подземных водных ресурсов Араратской равнины. Окончательный отчет. Программа «Чистая энергия и вода». HAYJRNAKHAGITS-23/01/13-1: данный документ подготовлен Агенстством международного развития США при пддержке народа Америки. Март, 2014. 77 с. (На армянском языке)

3. Меликян Н.Л. Эффективное использование эксплуатационных ресурсов вод артезианского бассейна и методы управления: дис. … д-ра наук. Ереван, 2006. (На армянском языке)

4. Минасян С.Р. Изменения геоэкологических условий в результате крупных водозаборов подземных вод // Ученые записки ЕГУ. Серия «Геология и география». 2012. № 2. С. 24–29. (На армянском языке)

5. Минасян Р.С., Варданян В.П. Эффективность комплексных исследований для освоения подземных вод межгорных котловин (на примере Араратской межгорной котловины) // Ученые записки ЕГУ. Серия «Геология и география». 2010. № 2. С. 19–22.

6. Минасян С.Р., Мхитарян Г.М., Гаспарян А.А. Задачи освоения и эффективного использования подземных водных ресурсов Араратской котливины // Современные задачи геологии

и географии: сб. науч. тр. конф., посвященной 90-летию со дня рождения профессора Вардгеса Абгаровича Аветисяна. 2008, 27–29 октября. Ереван: Изд-во ЕГУ, 2008. С. 59–62. (на армянском языке)

7. Трифонова Т. Интенсивное рыбоводство, способствующее истощению подземных и поверхностных вод в Араратской долине. Евразийский центр по продовольственной безопасности. М., 2016, 17 с. URL: http://ecfs.msu.ru/sites/default/files/node/publication/17/03 /trifonova_rus.pdf.

8. Эффективное использование подземных водных ресурсов в Арартской равнине: роль сферы рыбоводства // Программа «Использование научных передовых технологий и сотрудничество во имя комплексной охраны ресурсов». Окончательный проект. Ноябрь, 2016. 106 с. (на армянском языке)

9. Varduhi Margaryan. The challenges of rational use and protection of groundwater resources the arid region of Ararat valley in the context of climate change // Abstract book Zaragoza 5th Open Science Meeting. Global challenges for our Common Future a paleoscience perspective. Spain, 9–13 May 2017. PAGES–OSM. Zaragoza 2017. P. 310–311. URL: http://www.pages-osm.org/osm/program-osm;osm-abstract-book-zaragoza-2017.pdf.

УДК 004.4, 912.4

А.К. Матузко

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ АНОМАЛИЙ

Проблема тепловых аномалий характерна для всех крупных городов мира. Космические тепловые снимки являются весомым источником информации для анализа и формирования границ тепловых аномалий в пределах одной территории. Комплексное рассмотрение данных дистанционного зондирования Земли позволяет повышать точность пространственного разрешения температурных карт. Определение природы и границ тепловых аномалий поможет понять причины неблагоприятной экологической ситуации в Красноярске.

Ключевые слова: городской остров тепла; тепловые космические снимки, Landsat, тепловые аномалии, температура поверхности земли.

Введение. Температура поверхности может быть измерена наземными методами или на основе данных дистанционного зондирования. Спутниковое дистанционное зондирование – единственное средство получения долговременных однородных рядов данных о температуре поверхности. Сеть наземных наблюдений достаточно редкая, поэтому так важно получение информации дистанционными методами. По значениям тепловых каналов можно определить радиояркостную температуру подстилающей поверхности. Тепловые космические снимки до сих пор отстают по количеству методов обработки и возможностей применения. Составление временных температурных рядов поверхности земли полезно для решения большого ряда научных задач. Информация, полученная при съемке Земли в тепловом диапазоне, может быть использована в географической науке по двум основным направлениям. В первом случае тепловое излучение является индикатором объектов, явлений и процессов, скрытых от непосредственного наблюдения, а во втором случае представляет интерес само тепловое излуче-

© Матузко А.К., 2018

ние, значение которого имеет важное значение в вопросах изменения климата. В работе представлены результаты определения температуры поверхности в окрестностях города Красноярска (Россия), используя дистанционные методы.

Проблема тепловых аномалий характерна для всех крупных городов мира. Космические тепловые снимки являются весомым источником информации для анализа и формирования тепловых аномалий в пределах одной территории. Определение природы и границ тепловых аномалий поможет понять причины неблагоприятной экологической ситуации в Красноярске: где, помимо высоких промышленных выбросов, оказывают влияние атмосферные процессы, которые приводят к тому, что примеси задерживаются и концентрируются над городом.

Методы и материалы. Фонд материалов космической съемки в тепловом инфракрасном диапазоне накапливается с 1960-х гг. Американская программа Landsat (проект Landsat Data Continuity Mission) начала свое существование в 1972 г., с этого времени было запущено семь спутников [1].

Спутник Landsat-7 находится на орбите с 15 апреля 1999 г. Установленный на спутнике радиометр ETM+ является усовершенствованным вариантом сканеров TM. Основным отличием этого прибора является наличие панхроматического канала высокого разрешения (15 м) и увеличение пространственного разрешения в тепловом канале до 60 м. С конца мая 2003 г, в связи с выходом из строя одного из элементов съемочной системы, радиометр ETM+ работает некорректно, сбои в работе аппаратуры привели к снижению качества данных [2].

Запуск спутника Landsat-8 состоялся в феврале 2013 г., сканер Thermal InfraRed Sensor (TIRS) предназначен для получения изображений в дальнем ИК, в его фокальной плоскости установлены фотодатчики Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) на базе GaAs. Инструмент TIRS имеет полосу обзора в 185 км, разрешение канала 100 м, временное разрешение 16 суток. Эти параметры позволяют изучать геосистемы регионального уровня [3].

Наиболее распространенным применением тепловых космических снимков в науке являются исследования геосистем глобального уровня и заключается в извлечении из тепловых космических снимков температур земной и водной поверхности и анализ их распределения на Земле. Поэтому решение таких задач на региональном уровне заслуживает отдельного внимания со стороны исследователя.

Тепловые каналы спутников Landsat по современным меркам имеют достаточно низкое пространственное разрешение 60–100 м. Термальный инфракрасный диапазон особенно полезен для определения разности температур между городом и прилегающими к нему сельскими районами [4]. При рассмотрении городов с плотной застройкой возникает необходимость более детального изучения городских территорий с хорошим пространственным разрешением.

На основе значений тепловых каналов вычисляем значение температуры поверхности Земли, используя формулу

$$T = \frac{T_B}{1 + (\lambda \frac{T_B}{c_2}) \ln(e)},$$

где T_B – температура спектральной яркости излучения (K); λ –длина волны света, λ =10,8 μm для 10-го канала Landsat-8; λ = 11,45 μm для 6-го канала Landsat-7; $c_2 = h \times \times c / s = 1{,}4388 \cdot 10^{-2}$ m K; $c_2 = 14\,388$μm K; e – коэффициент эмиссии.

В настоящее время есть два основных метода для определения коэффициента эмиссии по спутниковым данным. В первом методе пользователь применяет классификацию объектов на изображении, где каждому классу присваивается конкретное значение коэффициента излучения. Во втором методе коэффициент эмиссии определяется на основе индекса NDVI. Первый метод более простой в использовании, но его точность

ограничена и находится в прямой зависимости от эффективности результатов классификации снимка [5].

В работе рассматривается метод определения коэффициента эмиссии, используя классификацию изображения с обучением. На спутниковом снимке выделяют четыре класса поверхности земли: вода, строение, почва, растительность. Каждому классу присваивается значение коэффициента эмиссии [6].

Исходными данными для определения температуры земной поверхности является архив спутниковых снимков Landsat-8. Отобрано 15 безоблачных сцен в бесснежный период с 2013 по 2017 г.: 07.07.2017, 07.08.2017, 22.07.2017, 29.06.2017, 20.06.2017, 28.05.2017, 07.10.2016, 05.09.2016, 10.06.2016, 23.04.2016, 17.07.2015, 01.07.2015, 08.06.2015, 14.05.2015, 07.07.2014, 18.06.2013. Программное обеспечение: QGIS 2.18.1 с плагином Semi-Automatic Classification Plugin (SACP) [6].

Пространственное разрешение температурной карты, полученной по данным мультиспектральных каналов Landsat-8 составляет 30 м. Для изучения тепловых аномалий существует необходимость повышения пространственного разрешения. Поэтому было принято решение использовать для создания классификации изображения снимки высокого разрешения PlanetScope (www.planet.com). За счет использования снимка высокого разрешения, новая классификация характеризуется пространственным разрешением 3 м.

Результаты. В результате комплексного применения спутниковых данных PlanetScope и Landsat-8, получены температурные карты города Красноярска и его окрестностей (рисунок) с пространственным разрешением 3 м.

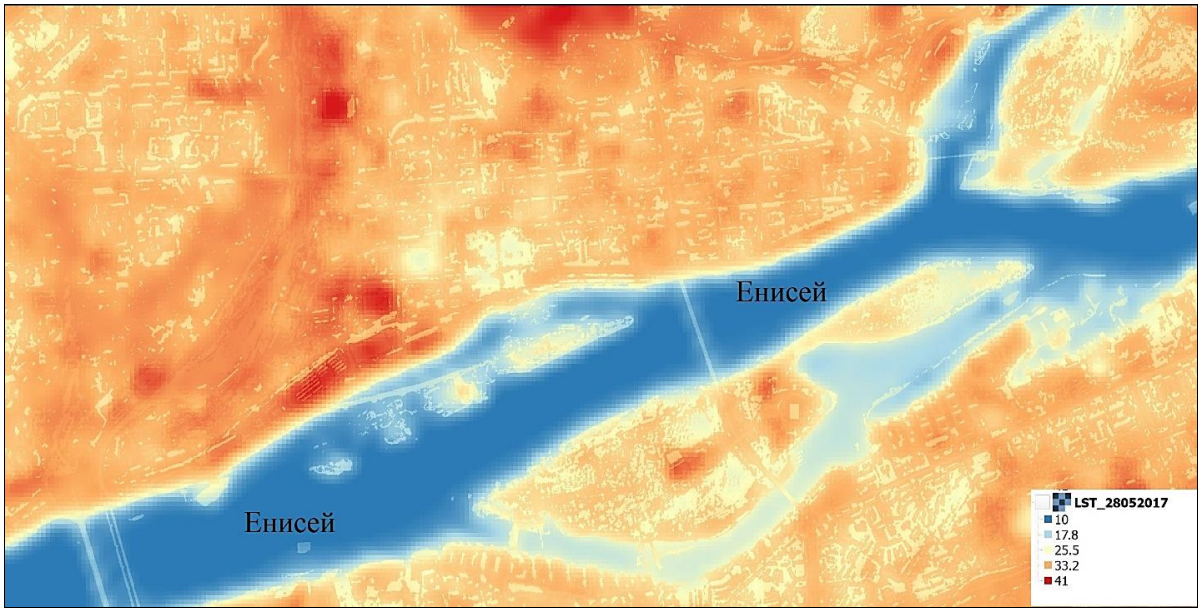


Рисунок. Температурная карта г. Красноярска

Рассмотрев полученные температурные карты, для каждой карты был сформирован слой полигональных аномалий, где температура поверхности выше на 5–8 °С градусов, чем средняя температура поверхности. Полученные аномалии были разделены по сезонам для дальнейшего анализа. Наложив границы тепловых аномалий по температурным картам за один сезон, были сформированы контуры аномалий по трем сезонам: весна, лето и осень.

В карте летних тепловых аномалий [7] на территории города Красноярска можно выделить два типа тепловых аномалий: природные и антропогенные. Хорошо различимы аномалии на природных возвышенностях с южной и юго-западной экспозицией

склона, например, так в Железнодорожном районе города Красноярска наибольшую температуру поверхности имеет Караульная гора с негустым покрытием склона растительностью.

Тепловые аномалии, сформированные в результате антропогенного преобразования окружающей среды, формируются возле торгово-развлекательных центров и в промышленных кварталах города. Температурные аномалии повторяют форму торговых центров: ТРЦ «Планета», гипермаркет «Лента», ТРЦ «Июнь», автосалоны, ТЦ «Авиатор», ТЦ «Командор». Обширные тепловые аномалии находятся в промышленных кварталах Советского и Ленинского районов.

Заключение. В ходе работы был произведен расчет температур поверхности Земли для 15 сцен Landsat-8 с 2013 по 2017 г. Анализ полученных значений температуры поверхности Земли позволил сформировать тепловые аномалии на территории города для трех сезонов: весна, лето и осень.

При анализе снимков были найдены тепловые аномалии на территории промышленных зон, ландшафтных возвышенностей и аномалии, соответствующие расположению и форме торгово-развлекательных центров. Особый интерес на левом и правом берегу города Красноярска занимают промышленные зоны за счет своей обширной площади. В дальнейшем сформированные тепловые аномалии являются ценным материалом для эколого-географических исследований территории.

Список литературы

1. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съѐмка. М.: Недра, 1993. 128 с.

2. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Inc., Box 882 New York NY 10159 USA. 2004. № 89. P. 467–483.

3. Frey C.M. Parlow E. Flux measurements in Cairo. P. 2: On the determination of the spatial radiation and energy balance using aster satellite data. Remote Sens. 2012. № 4. P. 2635–2660.

4. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Методика дешифрирования разновременных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне // Вестн. Моск. ун-та. Серия «География». 2014. № 3. С. 35–41.

5. Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Study of the urban heat island over Krasnoyarsk using Landsat-8 remote sensing data // International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2018. Томск, 2018. P. 41–45.

6. Luca Congedo Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. 2017. 278 с.

7. Матузко А.К. Картографирование тепловых аномалий города Красноярска по спутниковым снимкам // Открытая конференция молодых ученых ИВМ СО РАН по математическому моделированию и информационным технологиям Красноярск, 2018. С. 25–26.

УДК 551.501.8, 551.578

О.Е. Нечепуренко, М.А. Волкова, И.В. Кужевская

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия, e-mail: o.e.nechepurenko@gmail.com

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЗОН ОБЛЕДЕНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрена повторяемость случаев обледенения по данным бортовой погоды, метеорологические и синоптические условия их формирования. Показано, что использование данных спутникового зондирования позволяет получить пространственно-временное распределение зон обледенения высокого разрешения.

Ключевые слова: обледенение, наукастинг, радиометр ATOVS.

В соответствии со стратегией [8] Международной организацией гражданской авиации (ICAO), одним из основных направлений развития метеорологического обеспечения авиации является совершенствование сверхкраткосрочного прогнозирования и наукастинга. Особое внимание уделяется, с одной стороны, численному прогнозу, с другой – дистанционным измерениям (радарной и спутниковой информации) [5]. Сверхкраткосрочный прогноз и наукастинг в рамках метеорологического обслуживания авиации включают информацию о комплексе метеорологических характеристик и атмосферных явлений, таких как высота нижней границы облачности, турбулентность атмосферы, обледенение воздушных судов и т.д.

Обледенение самолетов представляет собой опасное явление, которое приводит к потере подъемной силы, вплоть до полной потери контроля над воздушным судном (ВС). Все это может привести к авиационным происшествиям [1; 3], в том числе с человеческими жертвами. Ухудшение летных качеств воздушных судов при полете в зоне обледенения зависит от интенсивности обледенения, количества отложившегося на поверхности самолета льда, формы ледяных отложений и структуры льда. Перечисленные причины, в свою очередь, зависят от водности облака, фазового состояния и размера облачных частиц, температуры воздуха и поверхности самолета, а также – скорости полета ВС [5].

Климатические и погодные условия юга Западной Сибири, а именно сочетания температуры и влажности воздуха, облачности и переохлажденных осадков, способствуют высокой вероятности возникновения обледенения в пограничном слое атмосферы. Поэтому исследование вопросов диагноза и прогноза обледенения необходимо для обеспечения безопасности полетов над этой территорией.

Материалом для исследования послужили данные бортовой погоды о случаях обледенения воздушных судов в районе аэродрома Томск (в радиусе 200-250 км) за период с 2011 по 2017 гг., показания спектрорадиометров MODIS, установленных на космических аппаратах (КА) Terra и Aqua [10], радиометра ATOVS (NOAA18, NOAA19), обработанные для отдельно выбранных случаев с обледенением.

Всего за этот период был зафиксирован 361 день с обледенением. Наибольшее число дней наблюдалось с октября по декабрь – в среднем по 9 дней в месяц, с максимальным количеством в декабре 2015 г. (14 дней). Чаще всего по данным бортовой погоды отмечалось обледенение умеренной (52 %) и слабой (42 %) интенсивности. Дни с сильным обледенением (22 дня) регистрировались с октября по май с максимумом

© Нечепуренко О.Е., Волкова М.А., Кужевская И.В., 2018

в декабре (7 дней). Более трети случаев (35 %) отмечались на высотах до 1 000 м, около 32 % – в слое от 1 000 до 2 000 м, 20 % – приходится на слой 2 000–3 000 м, и на высоте 3 000 и более – около 13 %. Максимальная высота, на которой было зафиксировано обледенение, составила 8 000 м.

Обзор синоптических процессов, способствующих формированию зон с обледенением, показал, что около 85 % случаев наблюдались при пониженном атмосферном давлении. Так, на фронты окклюзии пришлось около 13 % всех случаев, на ситуации прохождения холодных фронтов, барической ложбины, центров и тыловой части циклона – 30 % случаев, более 30 % обледенения отмечалось на теплых фронтах и в теплых секторах циклонов. Обледенение в большинстве случаев сопровождалось различными видами атмосферных явлений, преимущественно осадков (снег, ливневый снег, дождь, ливневый дождь, морось, переохлажденная морось, снежные зерна), а также переохлажденного тумана и дымки. В большинстве случаев обледенение различной интенсивности наблюдалось при ливневом снеге (~40 %).

В качестве примера использования данных спутникового мониторинга рассмотрим случай сильного обледенения в районе аэродрома Томск 5–6 января 2017 г., который продолжался более суток. По данным бортовой погоды за 4 января с 23:54 UTC было зафиксировано умеренное обледенение в слое 3 700–1 000 м, которое перешло сильное 5 января с 00:00 UTC и продолжалось до 6 января 00:52 UTC.

Метеорологические и синоптические условия образования рассматриваемой зоны обледенения сложились в результате активизации циклонической деятельности и выхода южных циклонов, ослабления Сибирского антициклона в первой декаде января 2017 г. [2]. Температура воздуха у поверхности земли в первой декаде превышала норму на 2–5 ºС. В первой пятидневке температура воздуха в районе города Томска и аэродрома наблюдалась в пределах от –1 до –7 ºС. Погодные условия сопровождались ливневым снегом различной интенсивности, поземкой и метелями с порывами до 15–17 м/с с направлением ветра 180–270º, наблюдалось ухудшение видимости до 400 м при сильном ливневом снеге. Синоптические условия 5 января определялись прохождением фронта окклюзии, при наличии следующих форм облачности: *Cb, Sc, Frnb* и *Ac*.

На изображении канала 1,375 мкм (содержание воды любого фазового состояния) за время пролета КА Terra 06:35 UTC 5 января 2017 г. облачность имеет четко выраженную валовую (грядовую) структуру в районе аэродрома, преимущественно кучево-дождевых и слоисто-кучевых форм с высокой водностью. На рисунке 1 представлен результат визуализации продукта MODATML2 спектрорадиометра MODIS/Terra [9] по интегральному содержанию облачной влаги (в г/м^2).

Изображение демонстрирует высокую очаговость, характерную для слоисто-кучевой облачности с вкраплениями кучево-дождевой, которая обнаруживается при значениях свыше 1500 г/м^2. Важно заметить, что при использовании данных спектрорадиометра MODIS следует учитывать ряд допущений: наиболее точными являются измерения, полученные при отсутствии облачности [11] или при наличии разрывов в плотном слое облаков.

Ранее в [6; 7] показаны возможности применения радиометров для проведения непрерывных измерений при различных метеоусловиях, поэтому корректно использование данных радиометра ATOVS для расчета параметров обледенения. Система зондирования ATOVS позволяет восстанавливать температурные профили во всей толще тропосферы, которые могут быть использованы я для сверхкраткосрочного прогноза зон обледенения, например, по алгоритму К. Годске [5] (рис. 2). Показано, что зона обледенения занимает всю расчетную область вдоль 86º в. д., распространяясь по вертикали до поверхности 750 гПа (2,5 км). У поверхности земли эта зона занимает около 70 % площади расчетной области, покрывая азимут любого курса полета взлета-посадки ВС.

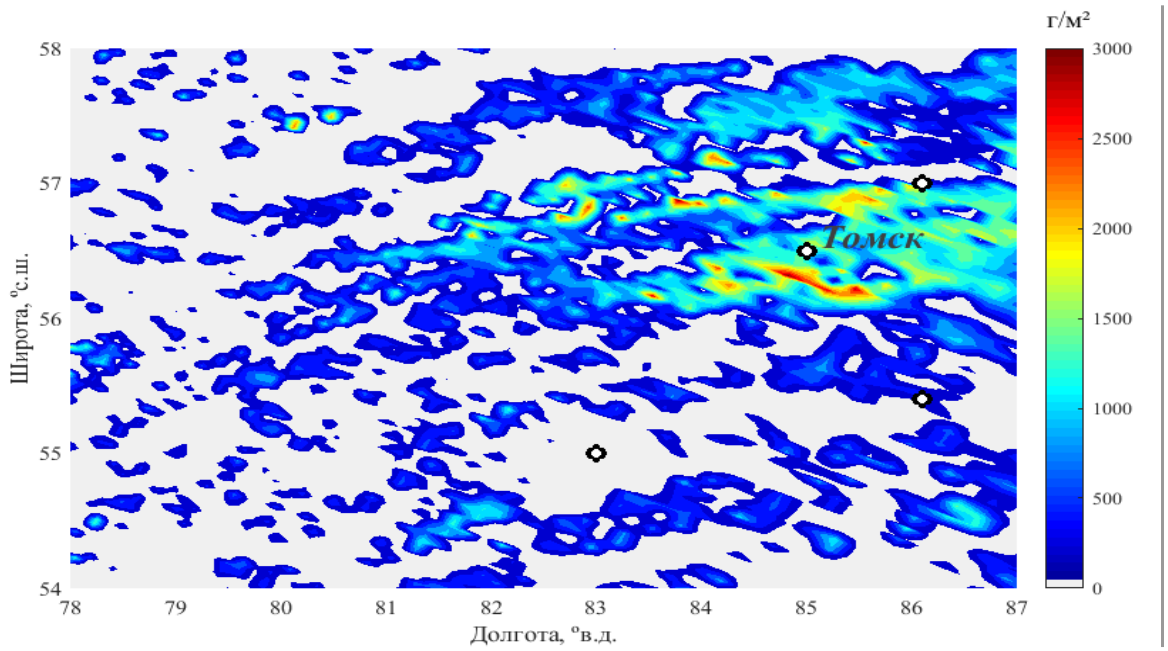
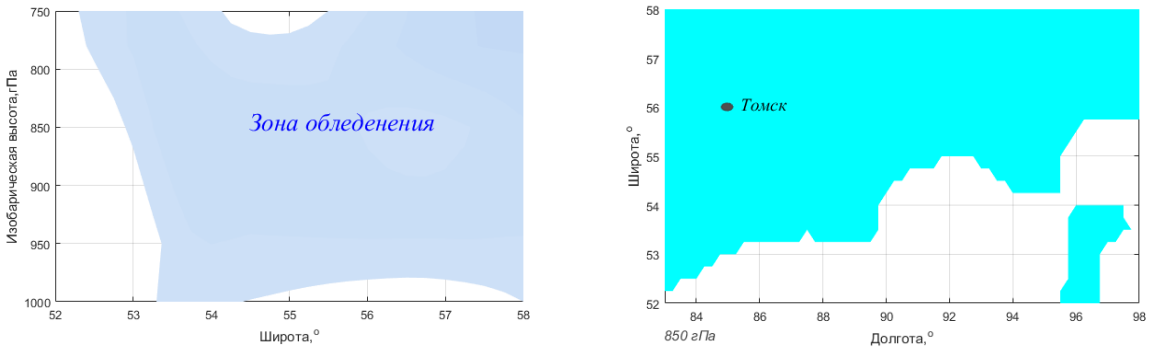


Рис. 1. Интегральное содержание воды в облаке
(КА Terra, время пролета – 06:35 UTC 5 января 2017 г.)



а *б*

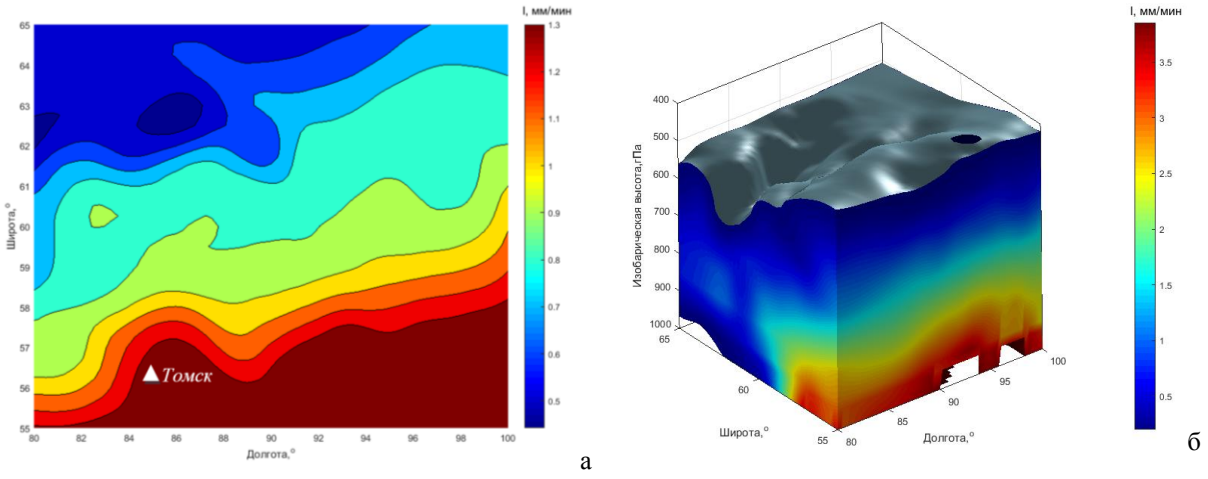
Рис. 2. Пространственная зона обледенения по данным ATOVS на основе алгоритма К. Годске. Время пролета 07:34 UTC 05.01.2017 г.: *а* – вертикальный разрез зоны обледенения вдоль 86º в. д.; *б* – границы зоны обледенения на изобарической поверхности 1 000 гПа

Градации обледенения (слабое, умеренное или сильное) определяются интенсивностью (J, мм/мин), которая была рассчитана по данным вертикальных профилей водности и построена карта-схема распределения J на изобарической поверхности 1 000 гПа (рис. 3), а также для толщи нижнего слоя тропосферы до 5 км. Согласно градациям степени обледенения из [4], для расчетного случая интенсивность изменялась от умеренной до сильной, что отражается на режиме полета в появлении вибраций от небольших до сильных и падением скорости полета от 20–30 до 60–70 км/ч.

Рассмотренный пример формирования зоны обледенения относится к условиям фронтального обледенения в слоисто-кучевой и кучево-дождевой облачности, обладающей высокой водностью. Воздушное судно при взлете или посадке на аэродром Томск попадает в зону обледенения, что и подтвердилось бортовой погодой.

Заключение. Важно отметить, что повторяемость случаев обледенения в районе аэродрома Томск по данным бортовой погоды достаточно высокая (14 % дней в году). Наиболее благоприятные синоптические условия формирования потенциальных зон

обледенения наблюдаются при прохождении фронтальных разделов при наличии *Cb* облаков и осадков ливневого характера. Полученные результаты с использованием данных ATOVS позволяют получить пространственно–временное распределение зон обледенения высокого разрешения. При отсутствии данных аэрологического зондирования применение спутниковой информации является перспективным методом для обнаружения фактических и потенциальных зон обледенения.



а б

Рис. 3. Карта-схема распределения интенсивности обледенения при заданных параметрах: суммарный (интегральный) коэффициент захвата 0,25; плотность льда 0,9 г/см^3; скорость полета 250 км/ч. Время пролета 07:34 UTC 05.01.2017 г.: *а* – изолинии *J* на изобарической поверхности 1000 гПа; *б* – трехмерное распределение *J*

Список литературы

1. Авиационные происшествия и инциденты в 2012–2017 гг. URL: http://www.aviametelecom.ru/?id_top=34.
2. Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в январе 2017 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 135–144.
3. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2005. Вып. 560. С. 143–167.
4. Степаненко В.Д. Вероятность и интенсивность обледенения самолетов. СПб.: Изд-во ГГО, 1994. 99 с.
5. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада, 2016. 312 с.
6. Состояние и перспективы радиофизических исследований атмосферы и подстилающей поверхности / Г.Г. Щукин, В.Д. Степаненко, С.П. Образцов [и др.] // Тр. ГГО. 2009.
7. Щукин Г.Г., Чичкова Е.Ф., Караваев Д.М. Микроволновый радиометр для валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 1. С. 28–31.
8. Global Air Navigation Plan 2013–2028. URL: https://www.icao.int/WACAF/Documents/edocs/9750_cons_en.pdf.
9. Joint Atm. (ATML2). URL: https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/products/joint-atm.
10. LAADS. URL: Archive https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/?process=ftpAsHttp&path=allData%2f61.
11. MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis. URL: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD07_L2/atbd.html.

УДК 528.88; 550.34; 551.510.412

**Р.В. Одинцов, В.Б. Кашкин, Т.В. Рублева,
А.А. Романов, И.В. Алексеенко**

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: rtcvbk@rambler.ru, odintzov.rom@yandex.ru,
tvrubleva@mail.ru, AARomanov@sfu-kras.ru

ВОЗМУЩЕНИЯ В ТРОПОСФЕРЕ НАД СКОПЛЕНИЯМИ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

По спутниковым данным ATOVS/POES и OMI/AURA изучены вариации температуры и общего содержания озона с ноября 2017 по февраль 2018 г., наблюдаемые в атмосфере над скоплениями коровых землетрясений Ирака и Ирана. Обнаружено, что при подготовке землетрясений возникает понижение температуры на изобарическом уровне 300 гПа ниже тропопаузы и ее увеличение на уровне 100 гПа выше тропопаузы. Потепление тропосферы над пиковой областью Ирака сопровождается уменьшением общего содержания озона.

Ключевые слова: сейсмичность, коровые землетрясения, очаг, эпицентр, аномальные области, тропосфера, нижняя стратосфера, атмосферные возмущения, озон, температура.

Введение. Во время землетрясений над сейсмически активными районами возникают явления различной геофизической природы в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли [1]. Изучение атмосферных возмущений в тропосфере и нижней стратосфере, предшествующих или сопутствующих землетрясениям являются актуальными. Наблюдаемые аномальные явления в атмосфере над сейсмоактивными районами могут быть использованы как признаки готовящегося землетрясения. Аномалии регистрируются, в частности, с помощью космических средств.

В работе изучались возмущения вариации температуры и озона во время сейсмособытий в атмосфере над сейсмически опасными территориями Ирака и Ирана с ноября 2017 г. по февраль 2018 г. по спутниковым данным. Исходная информация была получена с помощью аппаратуры ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder, КА NOAA/POES, USA) и OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument, КА AURA, USA) и представлена в [2; 3]. Методика анализа температурных профилей и вариаций озона на основе спутниковой информации подробна описана в [4].

Геофизические объекты в Центральной Азии. Сильнейшие землетрясения в сейсмоопасных районах Ближнего Востока произошли 12 ноября 2017 г. в 18:18:17 UTC (Ирак, магнитуда M = 7,3) и 1 декабря 2017 г. в 02:32:46 UTC (Иран, M = 6,1). Координаты эпицентра Иракского сейсмособытия – 34,911° с. ш. и 45.959° в. д., очаг землетрясения располагался на глубине 19 км в зоне взаимодействия Аравийской и Евроазиатской тектонических плит на границе между Ираном и Ираком. Эпицентр Иранского сейсмособытия имел координаты 30,746° с. ш. и 57.307° в. д. Очаг этого землетрясения находился в районе Иранского нагорья, являющегося частью Евразийской плиты и расположенного между Аравийской платформой и Индостанской плитой, его глубина составила 9 км [5].

Для упомянутых землетрясений нами были определены пиковые области, где произошли сейсмособытия. Размеры этих областей составили 2°×2°. В Ираке пиковая область имела координаты 34,5–36,5° с. ш. и 44,5–46,5° в. д., а в Иране – 29,5–31,5° с. ш. и

© Одинцов Р.В., Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Романов А.А., Алексеенко И.В., 2018

56,5–58,5° в. д. С ноября 2017 по февраль 2018 г., по данным USGS [5], в этих пиковых областях зарегистрировано наибольшее сгущение очагов коровых землетрясений. В частности, с 12 по 28 ноября 2017 г. в Иракской пиковой области было зафиксировано скопление гипоцентров 44 коровых землетрясений с M = 4,0–7,3 и с чагами, расположенными на глубинах от 7,6 до 19 км. В период 1.12.2017–9.02.2018 в Иранской пиковой зоне было зарегистрировано 35 коровых землетрясений с магнитудами M = 4,1–6,1 и глубинами 8,4–12 км.

Анализ температурных профилей над пиковыми областями Ирана и Ирака. На основе данных ATOVS/POES были построены вертикальные профили температуры T для 13-ти изобарических уровней от 100 до 700 гПа для времени измерения 0^h, 3^h, 6^h, 9^h, 12^h, 15^h, 18^h и 21^h за исследуемый период. Выполнен корреляционный анализ температурных рядов, отвечающих различным уровням.

В исследуемый период над пиковой зоной Ирака уровень 300 гПа находился ниже тропопаузы, а 150 гПа – выше тропопаузы. Сравнивались различные пары изобарических уровней. Температурные ряды для уровней 300 и 150 гПа имели наибольший по модулю отрицательный коэффициент корреляции R = –0.66. Графики изменения температурных рядов T_{150} и T_{300} с 1 по 28 ноября 2017 г., включающие 225 измерений, приведены на рис. 1. Черными стрелками обозначены даты отдельных состоявшихся землетрясений, серыми – даты их предполагаемой подготовки.

Рис. 1. Изменение температурных профилей на изобарических уровнях 150 и 300 гПа

Из рис. 1 видно, что 5 ноября, за 7 дней до сильнейшего землетрясения M = 7,3, в верхней тропосфере произошло понижение температуры T_{300} до 210 К, а в нижней стратосфере – повышение T_{150} до 232,3 К. Такой же атмосферный эффект зарегистрирован и 12 ноября: T_{300} уменьшается до 210 К, а T_{150} увеличилась до 232,5 К. За 2 дня до сейсмособытия с M = 7,3 от 26 ноября, аналогичный эффект наблюдается вновь. 24 ноября T_{300} понизилась до 210,8 К, а температура T_{150} увеличилась до 227,3 К.

На рис. 1 обращает на себя внимание временной иртервал с 12 по 22 ноября. За эти 10 дней в Иракской пиковой области произошло 32 коровых землетрясения

с M = 4,0–4,9 на глубине 10 км. Несомненно, что сейсмичность повлияла на состояние тропосферы и стратосферы. Температура на изобарическом уровне 300 гПа повысилась, а синхронно с этим на уровне 150 гПа понизилась.

Для пиковой области Ирана по коэффициенту корреляции равному R = –0,8 были выбраны температурные ряды на изобарических уровнях 100 и 300 гПа. Графики температурных профилей T_{100} и T_{300} с 22 ноября 2017 г. по 14 февраля 2018 г. (671 измерение) приведены на рис. 2. Здесь же указаны даты отдельных землетрясений, произошедших в исследуемый период в пиковой зоне.

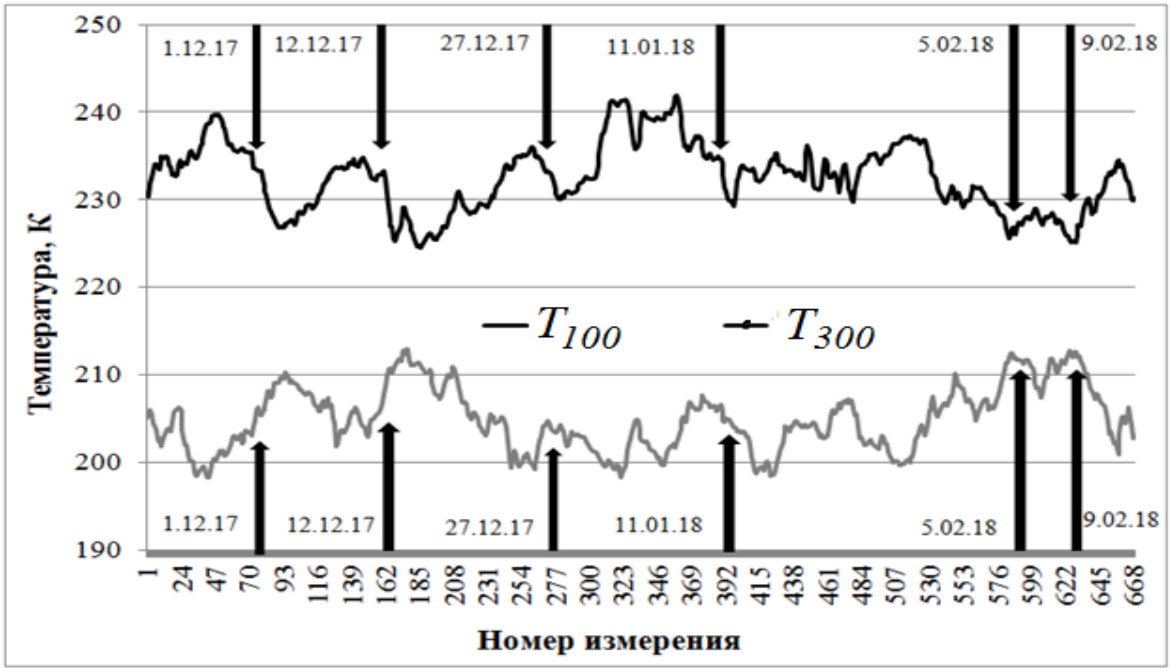


Рис. 2. Изменение температурных профилей на изобарических уровнях 100 и 300 гПа, «черными» стрелками обозначены даты отдельных землетрясений

Атмосферный эффект понижения температуры в верхней тропосфере (изобарический уровень 300 гПа) и ее повышение в нижней стратосфере (уровень 100 гПа) при подготовке коровых землетрясений наблюдался и над сейсмоактивной пиковой областью Ирана. Анализ температурных рядов T_{100} и T_{300} (рис. 2) показал, что за 9 дней до сильнейшего землетрясения M = 6,0, а именно 3 декабря, T_{300} понижается до 227 К, а T_{100} повышается до 210 К. Аналогичные атмосферные эффекты похолодания в верхней тропосфере и потепления в нижней стратосфере были обнаружены и во время подготовки землетрясений 27 декабря M = 5,0 (за 11 дней, 16 декабря) и 3 января 2018 г. (за 6 дней, 28 декабря 2017 г.).

Вариации озона и температуры на уровне 300 гПа в пиковых областях. Известно, что при сейсмических событиях в атмосферных слоях происходит изменение метеорологических характеристик и резкое увеличение содержания газов, например, приземного озона [4]. В данной работе проанализированы вариации общего содержания озона (ОСО) по спутниковым данным OMI/AURA над рассматриваемыми пиковыми областями, где зарегистрированы скопления коровых землетрясений. Графики ежедневных вариаций ОСО показаны на рис. 3 и 4. Обнаружено, что в исследуемый период над сейсмоактивными областями Ирака и Ирана при подготовке землетрясений и в основной сейсмический момент происходит изменение ОСО.

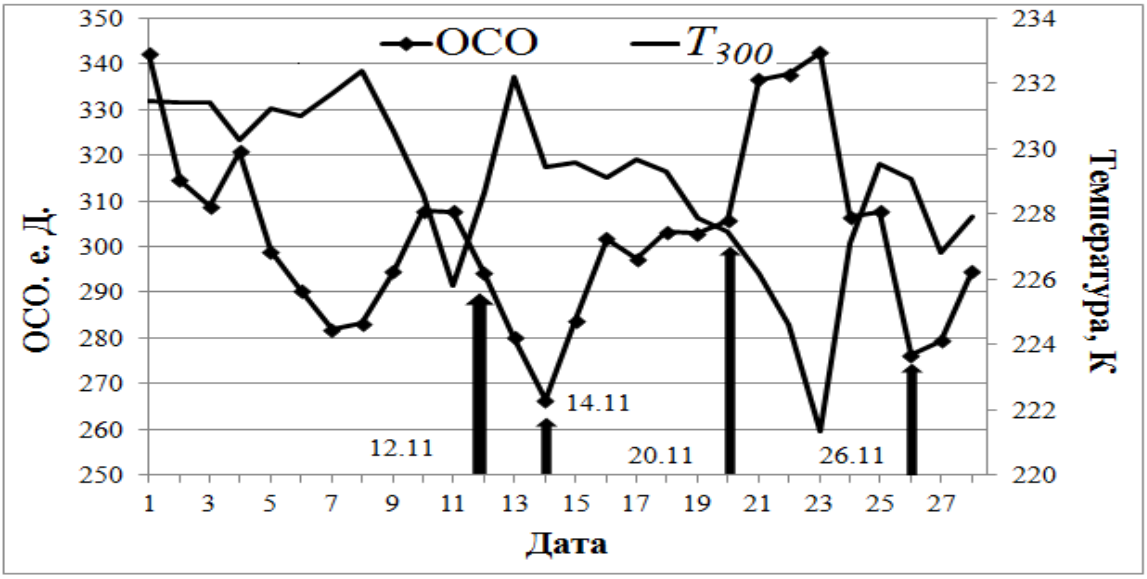


Рис. 3. Вариации ОСО и температуры на уровне 300 гПа над пиковой областью Ирака с 1 по 28 ноября 2017 г.

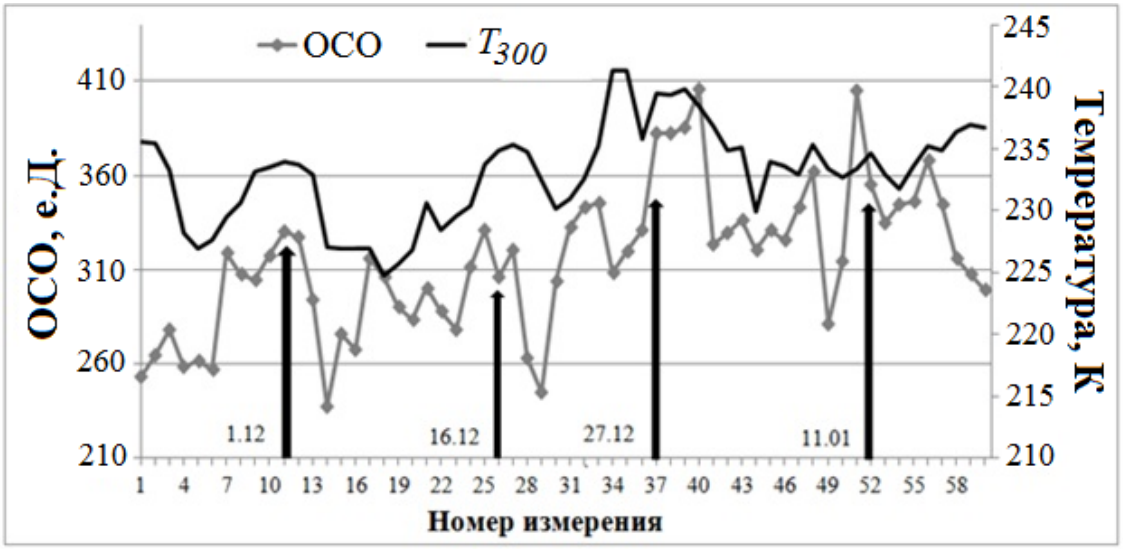


Рис. 4. Вариации ОСО и температуры на уровне 300 гПа над пиковой областью Ирака с 1 по 28 ноября 2017 г.

На рис. 3 показаны ежедневные вариации ОСО и температуры T_{300} с 1 по 28 ноября 2017 г. над пиковой областью Ирака. Содержание озона измеряется 1 раз в сутки вблизи местного полдня. Значения температуры на уровне 300 гПа выбраны для этого же времени. Корреляционный анализ рядов T_{300} и ОСО показал, что коэффициент корреляции между ними равен $R = –0{,}46$. Обнаружено, что во время сейсмических процессов изменения температуры и общего содержания озона в тропосфере происходят в противофазе. Выявлено, что выявлено, что при подготовке землетрясения 12 ноября ОСО понизилась, а температура T_{300} – увеличилась. Аналогичные противофазные вариации температуры и общего содержания озона наблюдались незадолго до сейсмособытий 12, 14 и 26 ноября.

Были проанализированы также температурные ряды T_{300} и значения ОСО для пиковой области Ирана (рис. 4). Коэффициент корреляции между этими рядами составил

R = 0,52. Обнаружено, что потепление тропосферы над пиковой областью Ирана сопровождается увеличением общего содержания озона.

Заключение. Изучены возмущения температурных профилей тропосферы и вариаций озонового слоя по спутниковым данным ATOVS/POES и OMI/AURA над сейсмоактивными областями Ирана и Ирака с ноября 2017 г. по февраль 2018 г. Сформирован архив спутниковой информации, содержащий значения температур для 13 изобарических уровней от 100 до 700 hPa и данные ОСО. Исследованы возмущения температурных профилей в тропосфере и вариации ОСО над пиковыми областями Ирана и Ирака, где зарегистрированы скопления коровых землетрясений. Во время подготовки данных землетрясений обнаружено понижение температуры на изобарическом уровне 300 гПа и ее повышение на 100 hPa. Выявлено, что Потепление тропосферы над пиковой областью Ирака сопровождается уменьшением общего содержания озона.

Список литературы

1. Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Н. Почему мы не можем прогнозировать сильные коровые землетрясения? // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2, № 4. С. 378–415. URL: https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-4-0051.

2. NOAA. URL: http://www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html.

3. NASA. URL: ftp://toms.gsfc.nasa.gov.

4. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 184 с.

5. United States Geological Survey (USGS). URL: http://www.usgs.gov.

УДК 528.88; 551.34; 631.4

Е.И. Пономарев[1, 2], Т.В. Пономарева[1]

[1]Институт леса имени В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: evg@ksc.krasn.ru

МОНИТОРИНГ ЭФФЕКТОВ ПОСЛЕПОЖАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ АНОМАЛИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

В работе обсуждается динамика тепловых аномалий на постпирогенных участках в условиях криолитозоны, исследованная по материалам дистанционных спутниковых съемок. Рассмотрены долговременные последствия «фона» в тепловом диапазоне (10,780–11,280 мкм), влияющие на температурный и водный режимы почв. Численными методами показано, что аномалии температуры поверхности могут приводить к увеличению глубины протаивания почвенного слоя на 20 % больше среднестатистической нормы. Показана связь с режимом питания рек.

Ключевые слова: дистанционные данные, температура, послепожарные участки, криолитозона, сезонноталый слой, сток рек.

Пожары растительности – наиболее значимый фактор нарушенности лесов криолитозоны. Спутниковые методы позволяют не только констатировать масштабы по-

© Пономарев Е.И., Пономарева Т.В., 2018

жарного воздействия в мерзлотной зоне Сибири, но и выявить возможные последствия воздействия на растительность и, опосредованно, на функционирование экосистем криолитозоны в целом. В частности, актуальны такие вопросы как: изменения в распределении и деградация приповерхностных слоев мерзлоты, вариации температурного, водного балансов, изменение режимов стока малых и средних рек и т.д., вызванные нарушениями растительных покровов, послепожарные изменения теплового баланса, способные провоцировать нарушение «переходного слоя», выполняющего функцию защиты от нагрева верхней части многолетнемерзлых пород ледового комплекса [1].

Цели данной работы – анализ послепожарных изменений температурных режимов в мерзлотной зоне Сибири, оценка влияния на тепловой режим пограничного слоя «напочвенный покров – почва – сезонно-талый слой», а также на динамику стока рек.

В работе использованы данные спутникового мониторинга за период 1996–2017 гг., представленные в формате геоинформационного банка данных полигонов пожаров [2]. Исходными материалами служили спутниковые съемки NOAA/AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), TERRA и AQUA/Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с пространственным разрешением 1000 м. Съемки среднего разрешения (Landsat/ETM/OLI, 15–30 м) использовались для валидации участков, пройденных огнем.

Характеристики послепожарных участков были получены на основе анализа спектральных признаков с использованием ретроспективных материалов съемки TERRA и AQUA в диапазонах длин волн λ_1 = 0,620 – 0,670 мкм, λ_2 = 0,841 – 0,876 мкм и λ_3 = 10,780 – 11,280 мкм. Наряду с изменениями спектров растительности после пожаров, гари имеют характерный «фон» также и в тепловом диапазоне (10,780–11,280 мкм). Послепожарные аномалии NDVI и температуры определяли и в абсолютных значениях, и как относительную величину отличий послепожарных участков ($T_{тест}$, $NDVI_{тест}$) от значений на фоновых полигонах ($T_{фон}$, $NDVI_{фон}$).

Численными методами выполняли оценки относительного изменения глубины протаивания мерзлотного слоя в зависимости от аномалии теплового поля поверхности. Расчеты динамики тепловой энергии в почве основаны на использовании решения уравнения теплопроводности в частных производных [3, 4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

с граничными условиями Стефана фазовых переходов на границе слоев:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}\bigg|_{x=x_{12}} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}\bigg|_{x=x_{12}} = lu\rho \frac{\partial x_{12}}{\partial t}$$

где ρ – плотность породы, кг/м^3; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); T – температура для талого, T_1, и мерзлого слоя, T_2; x – глубина слоя (м); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), для талого (λ_1) и мерзлого слоя (λ_2); l – удельная теплота плавления, Дж/кг; u – объемная влажность почвы, %; x_{12} – глубина залегания пограничного слоя мерзлотных и талых горизонтов, м.

Решение Стефана для глубины слоя Z сезонного протаивания пород имеет вид [3]:

$$Z = \sqrt{\frac{2\lambda_f (T_s - T_f)\tau}{l \cdot u \cdot \rho}}, \quad (1)$$

где T_s – температура поверхности; T_f – начальная температура в точке промерзания"; λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлой почвы, Вт/(м·°С); τ – продолжительность периода прогрева.

На основе предложенного подхода проведены расчеты вариаций глубины протаивания мерзлотного слоя в летний период времени в условиях аномального прогрева поверхности. Далее оценивали связь постпирогенных нарушений с аномалиями объема

стока рек за первую половину вегетационного периода (март–июль) за 2002–2015 гг. Многолетние данные о величине расхода воды ($м^3/с$) и объемах стока ($км^3$) рек Сибири были обобщены из открытых баз данных [5; 6].

Основные результаты. Для послепожарных участков получены количественные оценки аномалии вегетационного индекса NDVI (снижение на 61 %) и температуры поверхности (повышение на 47 %) в сравнении с фоновыми значениями. Через 1 год после пирогенного нарушения значения показателя NDVI составили 53 ± 8 % от уровня фоновых участков ($NDVI_{фон}$ = 0,65 ± 0,06). При этом максимум температурной аномалии, зафиксированный в 1 декаде июля, составлял 7,2 ± 1,3 °С. В среднем, в летний период (июль – начало августа) аномалия температурного поля варьировала на уровне 6,0 ± 0,9 °С.

За пятилетний срок отклонения значений NDVI на послепожарных участках снизились вдвое и составляли не более 21±7% от уровня фоновых значений. Аномалии температуры поверхности проявлялись так же в течение всего теплого периода, варьируя от 1,9 °С в начале и в конце вегетационного сезона до 4,9 °С во второй декаде июля (среднее 2,8 °С, σ = 1,1 °С).

Через десять лет послепожарные участки фактически не отличаются от фоновых по индексу NDVI, что определяется динамикой восстановления растительного покрова (см. рисунок, *а*). Зафиксированное отклонение от фоновых значений в среднем не превышало 9 % при существенной дисперсии σ = 5 %. При этом аномалии теплового фона оставались значимыми, достигая максимума 3,6 °С в первой декаде июля, при среднем за вегетационный период ~1,8 ± 0,9 °С.

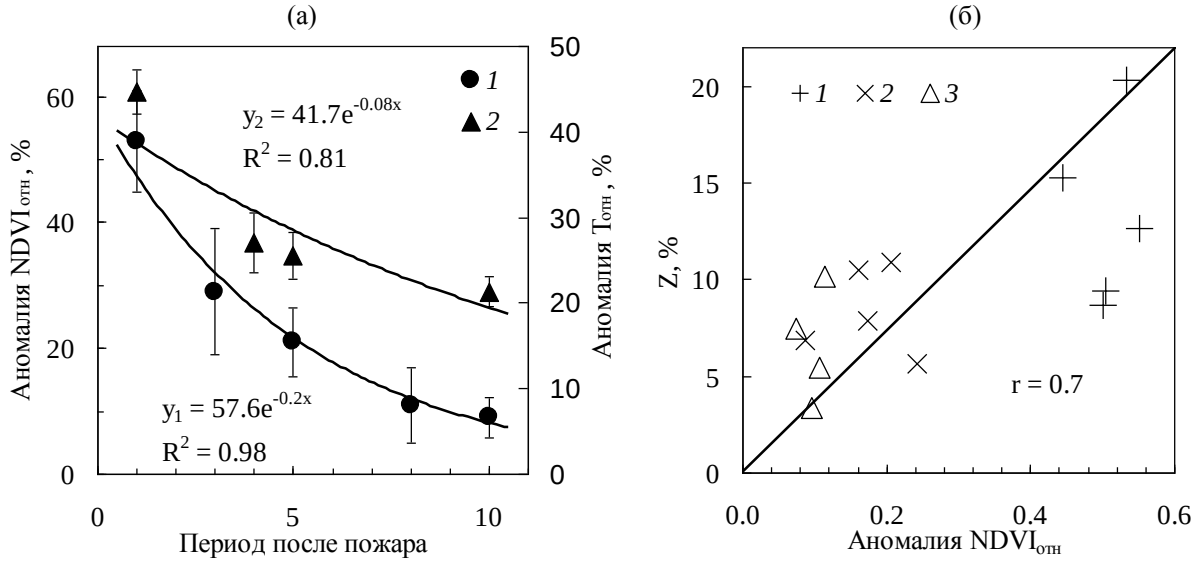


Рисунок. Динамика относительной аномалии индекса NDVI (*1*) и температуры (*2*) на послепожарных участках в течение 10-летнего срока восстановления растительного покрова (*а*); оценки численными методами приращения относительной глубины протаивания (*Z*) в течение теплого периода в зависимости от динамики послепожарного состояния растительности и напочвенного покрова по индексу NDVI (*б*): Через один год после пожара (*1*), 5 лет после пожара (*2*), 10 лет после пожара (*3*)

Расчеты и натурные измерения [7; 8] фиксируют среднестатистическую норму сезонного протаивания мерзлотных почв в условиях схожих с районом исследований на уровне 0,6–2,0 м. Аномальный прогрев значительных участков является причиной увеличения глубина протаивания (*Z*) в среднем на 10–20 % (рисунок, *б*) относительно среднестатистической нормы, что следует из проведенного численного моделирования на основе (*1*). Решение Стефана для глубины слоя сезонного протаивания пород в качестве параметра содержит τ – длительность периода нагрева. В условиях устойчивого

антициклона, как правило, действующего в районе исследований в летний период до 20 и более дней [9], и избыточного количества теплового излучения на поверхность протаивание почвенного профиля возможно на дополнительные 0,5 м. С учетом запаздывания температурной динамики с глубиной профиля до 10–20 дней [7], и времени фиксируемых максимумов температуры на поверхности периодом максимального протаивания в криолитозоне является третья декада июля – начало августа.

Низкая скорость выравнивания тепловой аномалии, по крайней мере, в первые 10 лет после пожара, позволяет рассматривать этот фактор долговременного влияния на состояние почвы и мерзлотного слоя, как один из значимых для стабильного функционирования экосистем. Отклик на масштабные пирогенные изменения в температурном и водном режимах почвенных слоев опосредованно оказывает влияние и на объемы стока рек Средней Сибири в послепожарный летне-осенний период, так как до 10–25 % их питания определяет грунтовый сток. Нами зафиксирована корреляционная связь на уровне $r \sim -0{,}52\ldots-0{,}68$ ($p < 0{,}05$). Уровень значимости этой связи, по всей вероятности, определяется состоянием и послепожарными изменениями почвенно-грунтовых условий в бассейнах рек криолитозоны, в том числе протаиванием мезлотных слоев.

При анализе доступных хронологий экстремальных пожарных событий в Средней и Восточной Сибири [10–12], удалось сопоставить минимумы стока с экстремальными значениями показателя горимости лесов в границах бассейнов рек. Период повторения экстремально низких стоков, составляющий от 18 до 25 лет, согласуется с приводимыми данными об изменчивости ширины годичных колец в лиственничных лесах [13], что, в свою очередь, определяется режимом увлажнения и температурным режимом. Таким образом, подтвердилось ожидаемое фазовое совпадение аномалий стока и экстремальных пожарных событий в регионе.

На фоне прогнозируемых изменений климата, ужесточения пожарных режимов и повышения горимости лесов криолитозоны [11; 14] интегральный эффект постпирогенных тепловых аномалий будет увеличиваться и, вероятно, приобретать все большие масштабы. С учетом уровня пирогенного воздействия в современных условиях это может определять долговременную динамику сезонно-талых слоев всей криолитозоны Сибири, что требует дальнейшего изучения и мониторинга.

Работа выполнена по теме базового проекта № 0356–2016–0707 и при поддержке РФФИ (грант № 17-04-00589, № 18-05-00432), а также Правительства Красноярского края (№ 17-41-240475). Техническое обеспечение: Центр коллективного пользования и Единый региональный центра ДЗ ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск.

Список литературы

1. Анисимова О.А., Шерстюков А.Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. XX, № 2. С. 90–99.

2. Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. DOI: 10.7868/S0205961415010054.

3. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) / М.М. Аржанов, А.В. Елисеев, П.Ф. Демченко, И.И. Мохов // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 4. С. 65–69.

4. Виноградов Ю.Б., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Гидрологическое моделирование: методы расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 1. С. 11–21.

5. Bring A., Shiklomanov A., Lammers R.B. Pan-Arctic river discharge: Prioritizing monitoring of future climate change hot spots // Earth's Future. 2017. Vol. 5, № 1. P. 72–92. DOI: 10.1002/2016EF000434.

6. River Discharge / R.M. Holmes, A.I. Shiklomanov, S.E. Tank [et al.] // Arctic Report Card: Update for 2015. URL: /https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2015/ArtMID/5037/ArticleID/227/River-Discharge.

7. Десяткин Р.В., Десяткин А.Р., Федоров П.П. Температурный режим мерзлотно-таежных почв Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI, № 2. С. 70–78.

8. Лебедева Л.С., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Расчет глубины сезонноталого слоя в условиях различных ландшафтов колымской водно-балансовой станции на основе гидрологической модели «Гидрограф» // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 2. С. 35–44.

9. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири / Э.Н. Валендик, Е.К. Кисиляхов, В.А. Рыжкова [и др.] // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 52–59. DOI: 10.1134/S1875372814010065.

10. Ivanova G.A. The history of forest fire in Russia // Dendrochronologia. 1999. Vol. 16–17. P. 147–161.

11. Харук В.И., Двинская М.Л., Рэнсон К.Дж. Пространственно-временная динамика пожаров в лиственничных лесах северной тайги Средней Сибири // Экология. 2005. № 5. С. 1–10.

12. Валендик Э.Н., Иванова Г.А. Экстремальные пожароопасные сезоны в бореальных лесах Средней Сибири // Лесоведение. 1996. № 4. С. 12–19.

13. Панюшкина И.П., Арбатская М.К. Дендрохронологический подход в исследовании горимости лесов Эвенкии // Сибирский экологический журнал. 1999. № 2. С. 167–173.

14. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Renson J. K. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // Forests. 2016. Vol. 7, № 125. P. 1–9. DOI: 10.3390/f7060125.

УДК 522

К.В. Раевич[1], И.В. Зеньков[2]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
e-mail: raevich.ap@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРКА ГОРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

Представлена консолидированная информация о парке горнотранспортного оборудования, задействованного на угольных разрезах России. Информация, полученная по результатам анализа снимков из космоса, обладает высокой достоверностью и должна быть использована при разработке стратегий развития отечественного горного машиностроения.

Ключевые слова: российская экономика, угольные разрезы, горное машиностроение, стратегия развития, буровые станки, карьерные экскаваторы, карьерный транспорт.

Развитие собственной машиностроительной базы для стран, обладающих значительными запасами твердых полезных ископаемых, таких как Россия, в бывшем СССР исторически всегда находилось в центре внимания, о чем свидетельствуют материалы, изложенные в [6]. Принимая во внимание достигнутые производственные показатели угольной отрасли в целом [7], а также перспективы ее развития [8], можно сделать вывод о том, что необходимо проведение работ по исследованию парка горнотранспорт-

© Раевич К.В., Зеньков И.В., 2018

ного оборудования, задействованного на угольных разрезах. В условиях российского недропользования, когда угольные месторождения разрабатываются десятками собственников информацию о горных машинах собрать в масштабах России не представляется возможным. Такого рода задачи российского формата можно с достаточной степенью точности решать с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли, что и было показано в работах [1–5].

Решение проблемы. В ходе наших исследований, проведенных с использованием космоснимков высокого разрешения и находящихся в свободном доступе, получена картина современного состояния открытых горных работ на всех угольных разрезах и во всех угледобывающих регионах Российской Федерации. Всего в разработке открытым способом на территории России находится не менее 150 месторождений бурых и каменных углей. Можно отметить преобладание объема добычи каменных углей над объемами добычи бурого угля. Разработка месторождений производится в довольно широкой географической полосе более 2000 км между широтами 43° с. ш. в южных районах Приморского края до 63° с. ш. на севере Магаданской области. Эта полоса имеет протяженность 4 600 км с запада (Урал, 60° в. д.) на восток (Магаданская обл., 156° в. д.). Климат на этой территории кардинально меняется – от близкого к субтропическому на юге Приморского края до резко континентального, практически схожего с субполярным – на севере Магаданской области.

В настоящее время на горных работах в угледобывающем секторе экономики России задействован парк горнотранспортного оборудования, представленный в таблице.

Таблица

Состав горнотранспортного оборудования на угольных разрезах России

Наименование горнотранспортного оборудования	Кол-во, ед.
1. Буровой станок СБШ-250(200)	135
2. Буровой станок БТС-150	8
3. Буровой станок СБР-160	2
3. Экскаватор роторный SRs(K)-4000	1
4. Отвалообразователь ОШР-4000-5250/190	3
5. Драглайны ЭШ-10/70 – ЭШ -65/100	262
6. Экскаватор карьерный гусеничный ЭКГ-5 – ЭКГ-40	385
7. Экскаватор роторный ЭР-1250, ЭРГ-1600	25
8. Экскаватор роторный ЭРП-2500	2
9. Экскаватор роторный ЭРШРД-5250	4
10. Экскаватор гидравлический с емкостью ковша 2-32 $м^3$	519
11. Думпкары железнодорожные 2ВС-105	759
12. Тепловозы ТЭМ-7	81
13. Автосамосвалы грузоподъемностью от 20 до 450 т	3 563
14. Шарнирно-сочлененные автосамосвалы грузоподъемностью до 40 т	136

Далее представим краткий обзор расстановки горнотранспортного оборудования по угледобывающим регионам России. Практически половина буровых станков типа СБШ-250 установлена на разрезах Кузбасса. Остальные равномерно распределены по угольным разрезам на месторождениях каменных углей. Все станки БТС-150 выполняют бурение взрывных скважин на разрезе «Бородинский» в Красноярском крае. Два станка СБР-160 бурят скважины на разрезах Иркутской области.

Практически половина драглайнов находится на горных работах в Кузбассе, и почти пятая часть эксплуатируется на разрезах Дальнего Востока при отработке вскрышных уступов, сложенных породами четвертичного возраста с низкой несущей способностью (см. рисунок).Один драглайн ЭШ-10/70 установлен на глубине 470 м на разрезе «Коркинский» в Челябинской области.

Единственный импортный роторный экскаватор, установленный на отработке надугольного вскрышного уступа в комплексе с отвалообразователем, используется на угольном разрезе «Назаровский». Один отвалообразователь находится в резерве на разрезе «Березовский» в Красноярском крае, и еще один – установлен на отсыпке внешнего породного отвала на разрезе «Бачатский» в Кузбассе. Все роторные экскаваторы отечественного производства (выпущены до развала СССР) используются на добыче бурых энергетических углей в Красноярском, Приморском краях, Иркутской и Читинской областях.

Более половины гидравлических экскаваторов импортного производства занимаются выемкой горной массы на угольных разрезах Кузбасса. Остальные используют на угольных месторождениях каменных углей со сложным горно-геологическим строением, углевмещающая толща которых сложена крепкими песчаниками.

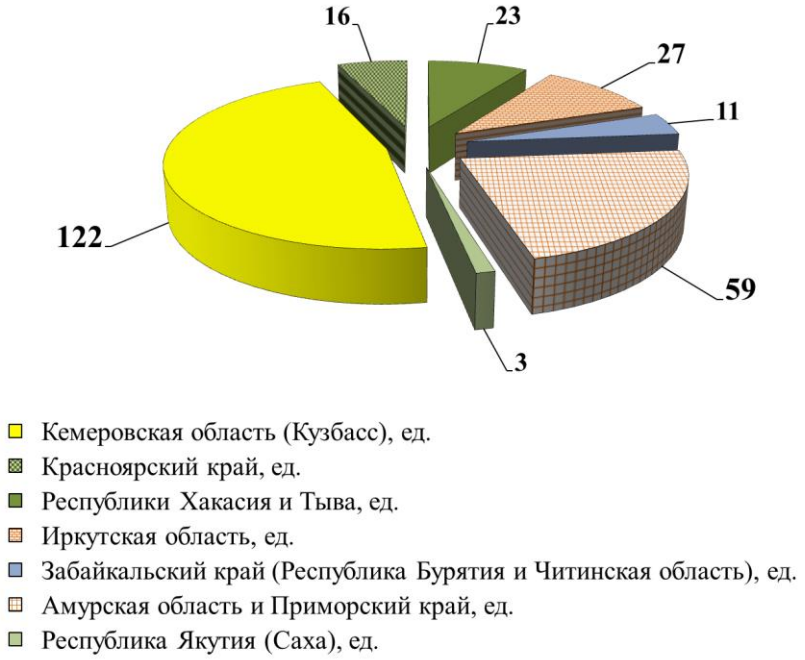


Рисунок. Распределение парка драглайнов на территории России

Транспортная составляющая угольных разрезов представлена железнодорожным, автомобильным и конвейерным (разрез «Березовский») транспортом. Железнодорожные думпкары в комплексе с тепловозами ТЭМ-7 используют на транспортировке вскрышных пород с верхних вскрышных уступов на внутренние и внешние отвалы. Железнодорожный транспорт равномерно распределен по угледобывающим регионам России (Урал, Кузбасс, Красноярский край, Иркутская и Читинская области, Приморский край). Железнодорожные составы скомплектованы по принципу – один тепловоз ТЭМ-7 и 8–11 думпкаров 2ВС-105 грузоподъемностью 105 т каждый. На вывозке добытого угля из забоев также используются тепловозы ТЭМ-7 с вагонами грузоподъемностью 70 т с выходом на магистрали РЖД.

В использовании автомобильного транспорта наметились следующие тенденции в обновлении его парка. За последние десятилетия в горном деле в практике открытых горных работ экономически доказан как в России, так и за рубежом переход на мощные экскаваторно-автомобильные комплексы. В открытой печати имеется немало работ с положительными результатами такого перехода. Например, в Кузбассе работает самый большой автосамосвал в мире грузоподъемностью 450 т производства Белорусского автомобильного завода (БелАЗ-75710). Аналогичные тенденции просматриваются и на

других угольных разрезах, начиная с Новосибирской области и заканчивая на Дальнем Востоке сахалинскими разрезами.

Кроме того, надо отметить положительный опыт применения шарнирно-сочлененных автосамосвалов повышенной проходимости при транспортировке горной массы на разрезах. Такие автосамосвалы эффективно работают в самых тяжелых горных условиях на дорогах с грунтами с малой несущей способностью. Шарнирно-сочлененные автосамосвалы используют на угольных разрезах Южного Кузбасса, Новосибирской области, Республики Хакасии, о. Сахалин.

В условиях горного производства, характеризующегося максимальной фондоотдачей, что обусловливает круглосуточный режим работы горных и транспортных машин период амортизации основных фондов существенно сокращается. Поэтому, вполне естественно, что в горнодобывающей промышленности постоянно должно происходить обновление парка оборудования. Информация о парке горного оборудования, полученная со снимков из космоса, обладает высокой достоверностью может быть использована при разработке долгосрочной стратегии развития отечественного горного машиностроения как на уровне правительства РФ, так и на отдельно взятых предприятиях этой отрасли (УЗТМ, ИЗ-КАРТЭКС, Рудгормаш и др.).

Заключение. По нашей оценке, объем добычи угля всех марок и видов открытым способом на территории Российской Федерации от Урала до о. Сахалин составляет 289,3 млн т в год. Для обеспечения добычи этого объема угля необходимо выполнить объем вскрышных работ на уровне 1400–1410 млн $м^3$. Усредненный коэффициент вскрыши на всех угольных разрезах России составляет 4,8566 $м^3$/т. При этом задействован парк горнотранспортных машин, состоящий из 145 буровых станков, 262 драглайнов, 904 гусеничных карьерных экскаваторов, 31 роторного экскаватора, 81 тепловоза с 759 железнодорожными думпкарами, а также 3 699 автосамосвалов, включая парк автосамосвалов повышенной проходимости.

В условиях, когда необходимо постоянно обновлять парк горных и транспортных машин весьма остро высвечиваются вопросы развития отечественного горного и транспортного машиностроения, решение которых определит строительство новых заводов тяжелого машиностроения либо расширение производственных мощностей на действующих заводах.

Список литературы

1. Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., Вокин В.Н. Угольные разрезы Красноярского края из космоса. Открытые горные работы // Уголь. 2017. № 1. С. 19–21.

2. Зеньков И.В., Бурлакова Е.Т. Управление ресурсным потенциалом малых угольных разрезов Красноярского края в условиях рыночной экономики // Уголь. 2017. № 11. С. 58–59.

3. Результаты дистанционного зондирования состояния горных работ и формирования растительной экосистемы на разрезе «Ерковецкий» в Амурской области / И.В. Зеньков, Ю.П. Юронен, Б.Н. Нефедов, Н.Б. Нефедов // Горный журнал. 2017. № 8. С. 78–82.

4. Зеньков И.В., Юронен Ю.П., Нефедов Б.Н. Результаты мониторинга формирования растительной экосистемы на отработанных участках Райчихинского буроугольного месторождения с использованием ресурсов дистанционного мониторинга // Экология и промышленность России. 2017. Т. 22, № 2. С. 28–33.

5. Угольные разрезы России из космоса. Горные работы и экология нарушенных земель / И.В. Зеньков, В.В. Заяц, Б.Н. Нефедов [и др.]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 519 с.

6. Материалы XXVI съезда КПСС. Политиздат. 1981. 384 с.

7. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь – сентябрь 2017 года // Уголь. 2018. № 1. С. 18–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-1-18-32.

8. Яновский А.Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России // Уголь. 2017. № 8. С. 10–14. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-8-10-14. URL: http://www.ugolinfo.ru/Free/082017.pdf.

УДК 528

К.В. Раевич[1], И.В. Зеньков[2], Б.Н. Нефедов[3]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
[3]Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: raevich.ap@yandex.ru

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ УГОЛЬНЫМИ РАЗРЕЗАМИ

На территории северных и южных районов Кемеровской области более 50 лет производят добычу угля открытым способом. Суммарный объем перерабатываемой горной массы 360 млн м^3. По результатам обработки спутниковых снимков с выделением границ и классов горнопромышленных ландшафтов действующих угольных разрезов определены экологически приемлемые коэффициенты рекультивации и самовосстановления растительного покрова на уровне 0,4. Такие показатели достигнуты за счет проведения работ по лесной рекультивации, а также самовосстановления всех ярусов растительного покрова в карьерных выемках и на породных отвалах. Установлено, что в условиях низкогорья процессы восстановления кустарниковой и лесной растительности протекают достаточно эффективно с позиции восстановления экологического баланса.

Ключевые слова: Кузнецкий угольный бассейн, южные и северные районы Кузбасса, разработка месторождений каменного угля, угольные разрезы, горнопромышленные ландшафты, дистанционное зондирование, растительная экосистема, рекультивация земель.

Угольные разрезы, территориально расположенные севернее г. Кемерово, производят добычу угля открытым способом более 50 лет. К настоящему времени глубина разрезов «Черниговский» и «Кедровский» превысила отметку 300 м. На разрезах добывают высококачественные коксующиеся и энергетические угли, в основном отправляемые на экспорт. По нашей оценке, на угольных разрезах, входящих в Северную группу, ежегодно добывается угля не менее 12 млн т [2; 4]. При этом объем вскрышных работ находится на уровне 114 млн м^3. Суммарный объем переработки горной массы обеспечивается горным оборудованием, представленным в табл. 1.

Таблица 1

Количественные показатели парка горного оборудования
на угольных разрезах Северной группы

Название угольного разреза	Количество горного оборудования, ед.		
	буровые станки	драглайны	карьерные экскаваторы
«Черниговский Северный»	3	8	13
«Черниговский»	3	5	29
«Кедровский»	3	4	15

В комплексе с карьерными экскаваторами работают автосамосвалы грузоподъемностью от 55 до 450 т в количестве 280 ед. Небольшой объем вскрышных пород с верх-

© Раевич К.В., Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., 2018

них уступов транспортируют на отвалы в железнодорожных составах из 8-9 думпкаров 2ВС-105 и одного тепловоза ТЭМ-7. Основной объем вскрыши вывозят автосамосвалами во внутренние и внешние отвалы, расположенные в непосредственной близости от карьерных выемок на участки, непригодные для добычи угля открытым способом. Все горные породы, включая уголь, и исключая верхний слой пород четвертичного возраста, перед их экскавацией разрыхляют с применением буровзрывных работ. На всех разрезах приняты транспортные системы разработки месторождений с постоянной углубкой горных работ и размещением вскрышных пород за пределами отрабатываемых участков с угольными пластами, пригодными для разработки открытым способом. Вполне естественно, что в ходе добычи угля увеличивается одновременно площадь как карьерных выемок, так и внешних отвалов.

Оценить последствия открытой угледобычи с позиции восстановления экологического баланса позволяет многосторонний анализ, включая обзор климата, качественных характеристик почвенной оболочки, видового разнообразия растительного покрова на территории разрабатываемых месторождений угля, а также исследование экологического состояния нарушенных земель с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли. Кемеровская область находится практически в центре Азиатской части материка, где главными факторами, определяющими климатические условия, являются отдаленность территории области от теплых морей Тихого, Индийского и Атлантического океанов и незащищенность с севера и северо-востока от прохождения холодных арктических воздушных масс. В связи с этим, климат Кемеровской области резко континентальный, с продолжительной холодной зимой и коротким, но жарким летом. Осадки в пределах области распределяются крайне неравномерно. В горах Кузнецкого Алатау осадков выпадает в год более 1000 мм, а на подветренных склонах Салаирского кряжа, в лесостепной и степной зонах области, сумма годовых осадков редко превышает 400 мм. Глубина снегового покрова устанавливается в степной зоне 19–32 см, в лесостепной – 40–80 см, в равнинной тайге – 40–200 см, в лесах горной тайги – 2–3 м [3].

Весь комплекс почвообразования, как известно, подчинен таким факторам как географическое расположение территории, рельеф, климат и растительный покров [1]. В центральном и северо-западном секторах Кузнецкой котловины (степь и южная лесостепь) распространены тучные, слабовыщелоченные, с мелкокомковатым строением черноземные почвы, обладающие высоким естественным плодородием. Толщина почвенной оболочки здесь достигает 30-40 см. Подзолистые почвы распространены на большей части равнинной тайги, на склонах гор. Зона серых лесных и дерново-оподзоленных почв расположена на территории низкогорья и среднегорья Салаирского кряжа, Кузнецкого Алатау и Горной Шории. Эти почвы наиболее типичны и характерны для горно-таежных областей. Обильные осадки вымывают из верхнего слоя питательные вещества, поэтому на таких почвах под пологом леса бедный травяной ярус.

В целом растительный покров Кемеровской области представляет собой большое разнообразие. В первую очередь, это проявляется в сочетании широтной и высотной зональности растительного покрова. Причем в предгорьях и в районах, близких к котловинам, а также в самих котловинах, растительность носит своеобразный характер концентрической зональности с уменьшением степных видов растений от центра к окраинам [5].

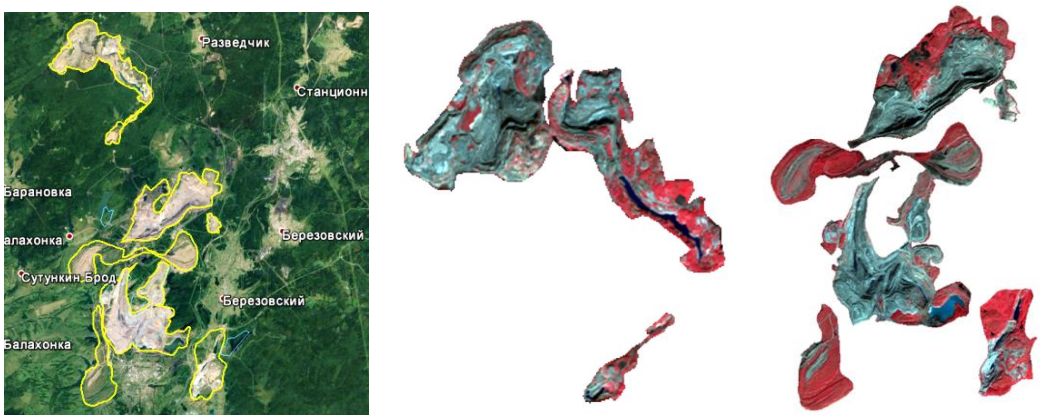
Леса представляют собой основной тип растительности. Общий характер их не одинаков и находится в прямой зависимости от особенностей климата. На исследуемой территории наиболее распространены пихтово-кедровые, сосново-березовые, березово-осиновые, пихтово-осиновые, кедровые, осиновые сообщества. Территория Кемеровской области по условиям произрастания древесных пород отнесена к Салаиро-Кузнецкой подпровинции темнохвойной черневой тайги с выделением трех поясов: степной, лесостепной и горно-лесной (Г.В. Крылов). Горно-лесной пояс разбит на три

подпояса: березово-осиновых лесов, произрастающих на высоте от 250 до 400 м над уровнем моря; пихтово-осиновой черневой тайги – 300–700 м над уровнем моря; высокогорной тайги в Кузнецком Алатау, на высоте 700–1200 м над уровнем моря; альпийских лугов, горных тундр.

Горнолесной пояс занимает более половины территории области. Пихтово-осиновые леса называются черневыми или сибирскими горнотаежными лесами. Именно в этом поясе присутствует разнообразие эндемичных и реликтовых видов растений Кузнецкого нагорья (брунера сибирская, кандык сибирский, незабудка Крылова, овсяница гигантская, копытень европейский, липа сибирская и др.). Черневая тайга состоит из пихты и кедра с примесью осины, березы и разнообразных кустарников: рябины, черемухи, калины, смородины красной и черной, боярышника. По флористическим исследованиям на территории области насчитывается около 1,5 тысяч высших сосудистых растений. Основные лесообразующие породы деревьев – пихта, осина, береза, сосна сибирская (кедр), ель.

Согласно классификации природных ландшафтов проф. Г.В. Крылова Северная группа разрезов располагается в зоне березово-осиновых лесов с включением в видовой состав сосны, пихты, лиственницы и кедра. Южная группа разрезов расположена на земной поверхности с преобладающими высотами более 400 м, где природные ландшафты характеризуются как пихтово-осиновая черневая тайга.

Экологическое состояние горнопромышленных ландшафтов на угольных разрезах проведено с использованием ресурсов дистанционного космического мониторинга [6]. В оценке были использованы снимки, сделанные в июле 2016 г. На рис. 1 представлены фрагменты космоснимка изучаемой территории, на которой находятся угольные разрезы «Черниговский Северный», «Черниговский» и «Кедровский».



а *б* *в*

Рис. 1. Фрагменты космоснимков угольных разрезов из Северной группы: *а* – расположение разрезов на местности; *б* – разрез «Черниговский Северный» на снимке, подготовленном для дешифрирования; *в* – разрезы «Черниговский» и «Кедровский» на снимке, подготовленном для дешифрирования

На рис. 2 представлены фрагменты космоснимка, на которых показаны объекты горнопромышленного ландшафта исследуемых угольных разрезов Северной группы (карьерные выемки разрезов «Черниговский», «Кедровский» и породные отвалы) с результатами дешифрирования.

На рис. 2 оттенками черного цвета показаны участки, на поверхности которых находится уголь. К таким участкам отнесены угольные пласты, подготовленные для их экскавации, отработанные угольные пласты, почва которых еще не засыпана внутренними отвалами, а также та часть угольных высокозольных некондиционных пластов, которая по экономическим условиям не может быть реализована потребителям и по-

этому размещена на породных отвалах. Оттенками синего цвета показаны участки, на которых располагаются техногенные водоемы, а также участки, поверхность которых является близкой к заболачиванию. Оттенками зеленого цвета показаны участки с различным видовым составом и различной плотностью произрастания растительного покрова (травы, кустарники, деревья, а также их комбинации). Желтым цветом выделены участки с признаками формирования растительного покрова. Остальными цветами, не поименованными выше, показаны участки без растительного покрова. Визуальный анализ космоснимков с результатами дешифрирования в целом высвечивает позитивную картину экологического состояния горнопромышленных ландшафтов, созданных при работе угольных разрезов Северной группы. На породных отвалах участки с оттенками зеленого цвета преобладают в пестроте цветовой гаммы выделенных категорий ландшафта. И этому, на наш взгляд, в значительной степени способствуют природно-климатические условия северных территорий Кемеровской области.

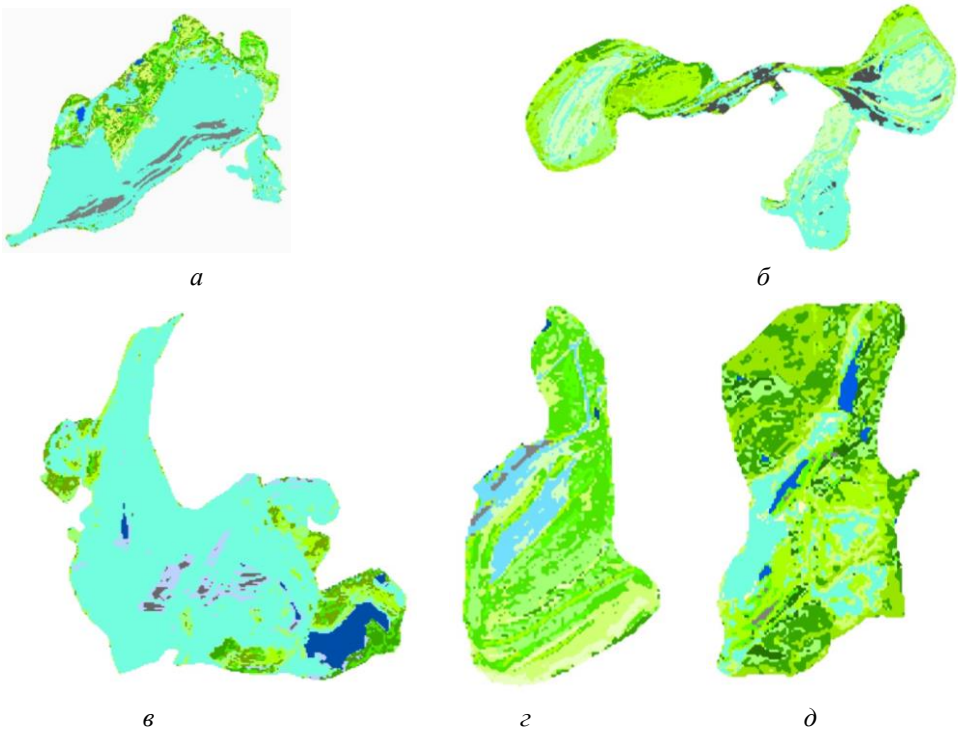


Рис. 2. Фрагменты космоснимков с выделением объектов и классов горнопромышленного ландшафта: *а* – разрез «Черниговский»; *б* – внешний отвал разреза «Черниговский»; *в* – разрез «Кедровский»; *г, д* – внешние отвалы разреза «Кедровский»

По результатам космической съемки суммарная площадь земель, нарушенных угольными разрезами Северной группы, составила 8364,7 га. Результаты определения площадей установленных классов горнопромышленного ландшафта представлены на диаграмме (рис. 3).

Анализ структуры нарушенных земель в виде горнопромышленных ландшафтов показывает, что значительная площадь нарушенных земель (52,5 %) остается к настоящему времени без растительного покрова. Площадь вскрытых или отработанных угольных пластов незначительная и составляет 1,99 %. Техногенные водоемы занимают 1,83 % площади нарушенных земель. Большую площадь (12,91 %) занимают участки под травянистым покровом. На нарушенных землях участки с травянисто-кустарниковой растительностью занимают 939,5 (11,23 %) га.

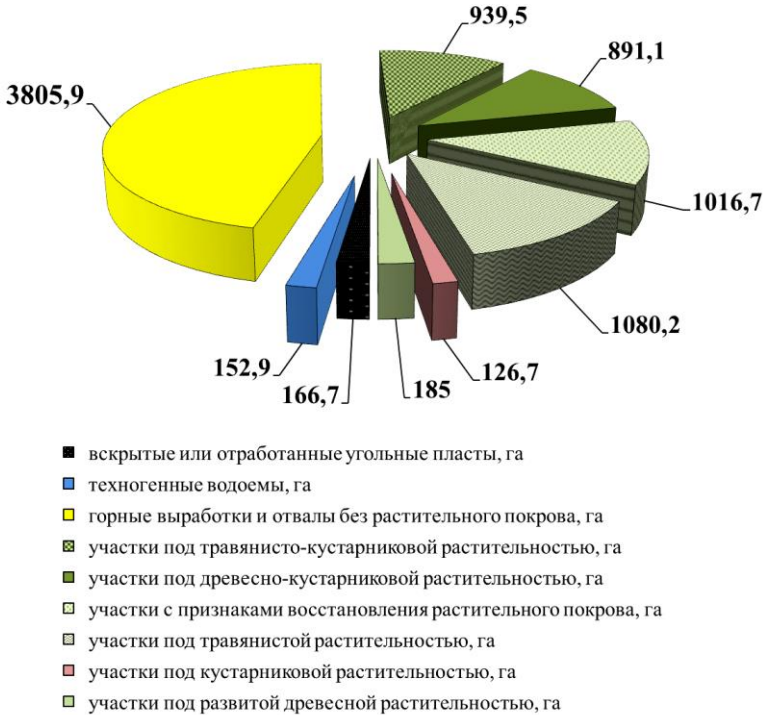


Рис. 3. Структура нарушенных земель под горными работами и экосистемой
на объектах горнопромышленных ландшафтов угольных разрезов Северной группы

Собственники угольных разрезов, входящих в эту группу, характеризуются положительным отношением к проведению специальных работ по рекультивации нарушенных земель с высадкой саженцев деревьев хвойных пород. Поэтому на территории отвалов наблюдаются многочисленные участки с лесной рекультивацией, проведенной в различные периоды работы разрезов. На территории горнопромышленных ландшафтов исследуемой группы разрезов необходимо отметить положительную тенденцию в постоянном увеличении суммарной площади участков породных отвалов, на которых произрастает хорошо развитая древесная и кустарниковая растительность любого возраста и всех степеней плотности произрастания. Размер площади этих участков в момент получения снимка из космоса составлял 1202,8 (14,38 %) га.

Коэффициент рекультивации и самовосстановления экосистемы в виде техногенных водоемов и всех видов растительного покрова (без участков с признаками восстановления растительного покрова) находился на уровне 0,4.

Более масштабная добыча угля открытым способом в отличие от северных территорий Кузбасса производится в его южных районах. По нашей оценке на угольных разрезах, входящих в Южную группу, ежегодно добывается угля не менее 39 млн т. При этом необходимый объем вскрышных работ достигает уровня 220 млн м^3. Суммарный объем переработки горной массы обеспечивается горным оборудованием, представленным в табл. 2.

В настоящее время на трех разрезах «Междуреченский», «Красногорский», «Томусинский» вскрышные породы укладывают в выработанное пространство, на место отработанных угольных пластов. На этих разрезах техногенный ландшафт представлен карьерными выемками, вытянутыми в широтном направлении, частично заполненными породными отвалами. Такие технологии разработки угольных пластов открытым способом позволяют существенно снизить землеемкость горных работ за счет отказа отсыпки вскрышных пород во внешних отвалах. Карьерные выемки в ходе увеличения их площади заполняют вскрышными породами с использованием драглайнов с емкостью

ковша 11-40 м^3 в бестранспортных технологиях. Горно-геологическое строение месторождений (углы падения угольных пластов), разрабатываемых другими разрезами, не позволяет производить отсыпку внутренних отвалов, поэтому вскрышные породы размещают во внешних отвалах, располагаемых на участках со смешанным и таежным лесом, а также на землях сельскохозяйственного назначения (пашни, сенокос и др.).

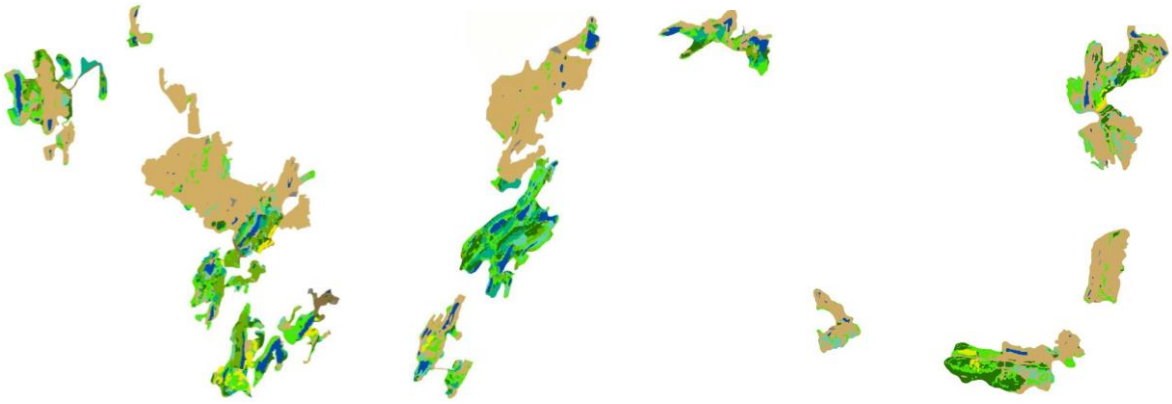
Таблица 2

Количественные показатели парка горного оборудования
на угольных разрезах Южной группы

Название угольного разреза	Количество горного оборудования, ед.		
	буровые станки	драглайны	карьерные экскаваторы
Бунгурский Северный	–	2	17
Березовский	2	5	17
Сибэнергоуголь	2	1	29
Осинниковский	3	–	14
Калтанский	1	1	8
Сибиргинский	2	3	25
Красногорский	4	8	20
Междуреченский	1	10	7
Томусинский	2	6	4
Распадский»	2	3	15

Фрагменты космоснимков с выделением границ объектов горнопромышленных ландшафтов угольных разрезов, входящих в Южную группу и результатами дешифрирования выборочно представлены на рис. 4.

На рис. 4 коричневым цветом выделены участки без растительного покрова. Синим цветом показаны техногенные водоемы в отработанных карьерных выемках. На исследуемой территории имеется развитая поверхностная гидрологическая сеть, состоящая из большого количества мелководных ручьев и рек.



а *б* *в*

Рис. 4. Фрагменты космоснимков с выделением границ объектов и классов горнопромышленного ландшафта на угольных разрезах Южной группы: *а* – Березовский, Бунгурский Северный; *б* – Сибэнергоуголь; *в* – Калтанский, Осинниковский

Кроме того, в толще горных пород залегают подземные водоносные горизонты, разгружающиеся в карьерных выемках. Поэтому, после окончания добычи угля и демонтажа насосных установок, обеспечивающих карьерный водоотлив, начинается стремительное заполнение выработанного пространства карьеров поверхностными и подземными водами. Черным цветом показаны участки, на поверхности которых нахо-

дится уголь. Их площадь настолько мала, что разглядеть без необходимого увеличения космоснимка угольные пласты рассмотреть невозможно.

Оттенками зеленого цвета (в порядке насыщения цвета) показаны участки с различными видами развитого растительного покрова: с травянистой и кустарниковой растительностью, со смешанным лесом и с хвойными породами древостоя, а также комбинации перечисленных выше видов. Желтым цветом выделены участки с признаками восстановления растительного покрова.

Визуальный анализ космоснимков с результатами дешифрирования в целом указывает на то, что в первую очередь растительный покров начинает восстанавливаться на породных отвалах, отсыпанных не ранее 15 лет назад и на которых отсыпка вскрышных пород больше не производится. На момент получения снимка из космоса на этих участках сформированы достаточно развитые третий и четвертый растительные ярусы. Во всех отработанных карьерных выемках образованы техногенные водоемы при их заполнении поверхностными и подземными водами. Хорошо развитые виды растительного покрова находятся также и на нерабочих бортах карьеров. На территории действующих разрезов находится большая доля участков, на которых отмечены процессы восстановления растительного покрова.

По результатам космической съемки суммарная площадь земель, нарушенных угольными разрезами, входящими в Южную группу, составила 22272,1 га. Результаты определения площадей выделенных 12 классов горнопромышленного ландшафта показаны на диаграмме (рис. 5).

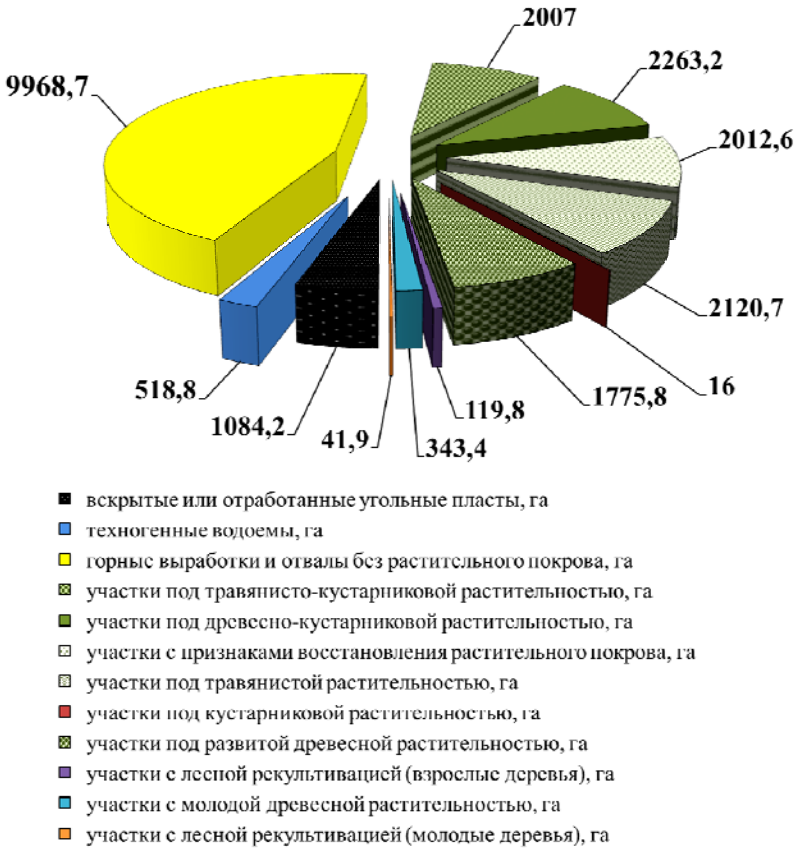


Рис. 5. Структура нарушенных земель под горными работами и экосистемой на объектах горнопромышленных ландшафтов угольных разрезов Южной группы

Значительная их площадь (58,66 %) остается к настоящему времени без растительного покрова. Признаки восстановления растительного покрова отмечены на площади 9,04 % в структуре нарушенных земель. На разрезах этой группы площадь вскрытых или отработанных угольных пластов значительная и составляет 4,87 %. Техногенные водоемы занимают 2,33 % площади нарушенных земель. Почти десятую часть всей площади нарушенных земель (9,5 %) занимают участки под травянистым покровом. Коэффициент рекультивации и самовосстановления экосистемы в виде техногенных водоемов и всех видов растительного покрова (без участков с признаками восстановления растительного покрова) составил на момент оценки 0,413. По этой группе разрезов необходимо отметить близость смешанных и горно-таежных лесов к объектам горнопромышленного ландшафта (карьерные выемки и породные отвалы), что способствует ускоренному появлению кустарниковой и лесной растительности на их поверхности. Участки с древесной и кустарниковой растительностью всех возрастов по результатам космической съемки в июле 2016 г. занимали площадь 6 567,1 (29,5 %) га.

Итак, применение космических технологий в исследовании угольных разрезов, функционирующих на территории Северных и Южных районов Кузбасса, позволило определить парк горнотранспортного оборудования на вскрышных и добычных работах, а также установить структуру нарушенных земель под горными работами и сформированной экосистемой согласно установленным классам горнопромышленного ландшафтов.

Список литературы

1. Почвы СССР / Т.В. Афанасьева, В.И. Василенко, Т.В. Терешина [и др.]. М.: Мысль, 1979. 380 с.

2. Угольные разрезы России из космоса. Горные работы и экология нарушенных земель / И.В. Зеньков [и др.] // Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2017. 519 с.

3. URL: http://ecokem.ru/klimaticheskie-usloviya/.

4. URL: https://www.google.com/earth/.

5. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki.

6. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/.

УДК 528

К.В. Раевич[1], И.В. Зеньков[2], Б.Н. Нефедов[3]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
[3]Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: raevich.ap@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗЕМЕЛЬ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ

На территории Кузнецкого угольного бассейна с середины 1960-х гг. производится масштабная разработка открытым способом месторождений каменных углей. В последние годы добычу угля на территории Кемеровской области осуществляют более сорока угольных разрезов с суммарной производственной мощностью 140,0 млн т угля в год. По результатам обработки спутниковых снимков горнопромышленных ландшафтов действующих угольных разрезов определены коэффициенты рекультивации и самовосстановления растительного покрова на уровне 0,357. Установлено, что в условиях континентального климата при интенсивных темпах разработки угольных месторождений открытым способом происходит медленное фор-

© Раевич К.В., Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., 2018

мирование всех видов растительного покрова, что не отвечает требованиям восстановления экологического баланса при ведении хозяйственной деятельности предприятиями горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: Кемеровская область, добыча угля в Кузбассе, угольные разрезы, горнопромышленные ландшафты, нарушенные земли, дистанционное зондирование, растительная экосистема, рекультивация земель.

В последнее десятилетие в России наблюдается ежегодный рост объемов добычи угля с выходом на уровень 385 млн т в 2016 г. Из этого объема 227 млн т приходится на долю Кузбасса, где уровень добычи угля открытым способом достиг 145 млн т. Как известно, именно открытые горные работы оказывают наиболее существенное влияние на окружающую природную среду в плане негативного воздействия, поэтому к регионам, на территории которых производят добычу любых твердых полезных ископаемых, в том числе и угля, на всех без исключения континентах направлено самое пристальное внимание экологов. Изучением и решение вопросов экологии в горном деле занимаются различные научные школы как в России, так и за рубежом.

Вместе с тем в оценке экологического состояния горнопромышленных ландшафтов практически не используются космические технологии дистанционного зондирования Земли, которые позволяют проводить исследования состояния нарушенных земель в глобальном формате и в долговременном периоде (25–30 лет). Закрывает этот пробел созданная Заслуженным экологом РФ И.В. Зеньковым единственная в России совместная научно-практическая школа (Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва и Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» ИВТ СО РАН) по исследованию открытых горных работ с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которая развивается по двум направлениям: исследование технологических параметров систем разработки открытым способом рудных (нерудных) и угольных месторождений и долговременный мониторинг формирования и развития растительных экосистем на территории отработанных (действующих) карьеров и породных отвалов. Формируемое научное направление основано на принципах проведения исследований в долговременном периоде и на движении от простого к сложному, что отражено в трудах [1–6]. Зарубежные специалисты-экологи в горном деле постоянно сталкиваются с отраслевыми проблемами, решение которых выборочно представлены в трудах [7–12].

На территории Кемеровской области находится один из крупнейших в мире Кузнецкий угольный бассейн – Кузбасс. Большая часть бассейна находится в пределах Кемеровской области, незначительная часть – в Новосибирской области РФ. Площадь угольного бассейна составляет 26,7 тыс. км^2, наибольшая длина – 335 км, ширина – 110 км. Кузнецкий угольный бассейн расположен на территории обширной впадины (Кузнецкой котловины), ограниченной с северо-востока горными вершинами Кузнецкого Алатау, с юга – поднятиями Горной Шории, с юго-запада – Салаирским кряжем. Рельеф Кузнецкой впадины эрозионный. Высотные отметки водоразделов постепенно снижаются с юга на север от 550–600 до 200–250 м. Поверхность территории бассейна степная и лесостепная. Восточные и южные горные окраины покрыты тайгой.

Крупнейшими промышленными и культурными центрами области считаются города: Кемерово, Новокузнецк, Прокопьевск, Ленинск-Кузнецкий и др. За годы промышленного развития Кузнецкий угольный бассейн превращен в крупнейший центр тяжелой индустрии. Кроме угольной промышленности, здесь расположены многочисленные предприятия черной, цветной металлургии, химии, энергетики и машиностроения. На территории области развита транспортная инфраструктура – с севера на юг проложена двухпутная железная дорога с выходом в двух точках (станции Юрга и Ан-

жерская) на транссибирскую магистраль. Второй железнодорожный транспортный выход имеется на юге области через столицу Хакасии Абакан на железнодорожную ветку Абакан – Тайшет. Также имеется развитая сеть автомобильных дорог.

Общие геологические запасы угля бассейна в 1979 г. до глубины 1 800 м оценивались в 637 млрд т, из них 548 млрд т отвечали параметрам по мощности пластов и зольности угля, принятых в качестве кондиций для месторождений, вовлекаемых в промышленное освоение. Балансовые запасы угля Кузнецкого угольного бассейна, подсчитанные в основном до глубины 600 м в 1985 г., составляют 110,8 млрд т, из них разведанные по сумме категорий А + В + С1 – около 66,8 млрд т, предварительно оцененные (категория С2) – 44,0 млрд т. По запасам коксующихся углей Кузнецкий угольный бассейн – самый крупный в РФ. На долю коксующихся углей приходится 42,8 млрд т, из них дефицитных марок Ж, К, ОС – 25,4 млрд т. По запасам углей, пригодных для разработки открытым способом, Кузбасс занимает 2-е место в РФ после Канско-Ачинского бассейна, а по степени их промышленного освоения – первое. Разведанные запасы для открытых работ оцениваются в 11,4 млрд т, в том числе коксующихся дефицитных марок КЖ, К, ОС – 1,8 млрд т.

На территории Кузбасса мы условно выделили четыре группы угольных разрезов: Северная и Южная группы, Западный и Восточный секторы. В основу группировки положены два признака: концентрация разрезов на территории области и их территориальное расположение. В Северную группу угольных разрезов Кузбасса входят разрезы «Черниговский Северный», «Черниговский» и «Кедровский» (рис. 1). Эти разрезы находятся на расстоянии 10–37 км в северном направлении от Кемерово.

В южном направлении от Кемерово выделено два больших по площади участка, на которых производится масштабная разработка угольных месторождений открытым способом, условно названные в исследованиях Западный и Восточный секторы. На севере границей выделенных секторов считается линия на карте, проходящая через населенные пункты: Гурьевск, Полысаево, Новогеоргиевка, Тараданово. На юге за границу принята воображаемая ломаная линия, проходящая по земной поверхности через населенные пункты: Новорождественское, Спиченково, Новокузнецк, Чистогорский, Осиновое Плесо (рис. 2). Граница между территориями секторов показана отрезком АБ на рис. 2.

Западный сектор имеет в плане форму полосы шириной до 10 км протяженностью 83 км. С позиции географического расположения на территории Кемеровской области ось симметрии Западного сектора ориентирована с северо-запада на юго-восток до города Краснобродского, далее направление оси практически южное. В Западном секторе работают 8 крупных угольных разрезов с севера на юг: «Шестаки», «Бачатский», «Краснобродский», «Краснобородский Южный», «Киселевский», «Краснобродский Вахрушевское поле», «Коксовый», «Прокопьевский».

Восточный сектор представляет собой полосу шириной до 22 км протяженностью 95 км. Ось симметрии этого сектора имеет направление с северо-запада на юго-восток. В Восточном секторе работают крупные угольные разрезы с севера на юг: «Моховский», «Сартакинский», «Пермяковский», «Виноградовские 1 и 2», «Караканский», «Беловский», «Черемшанский», «Первомайский», «Таежный», «Восточный», «Талдинский», «Ерунаковский».

Южная группа угольных разрезов на карте Кемеровской области располагается южнее линии, определяемой населенными пунктами: Новорождественское, Спиченково, Новокузнецк, Чистогорский, Осиновое Плесо (рис. 3). В Южную группу входят разрезы (с запада на восток): «Березовский», «Бунгурский Северный», «Сибэнергоуголь», «Осинниковский», «Калтанский», «Томусинский», «Междуреченский», «Красногорский», «Сибиргинский» «Распадский».

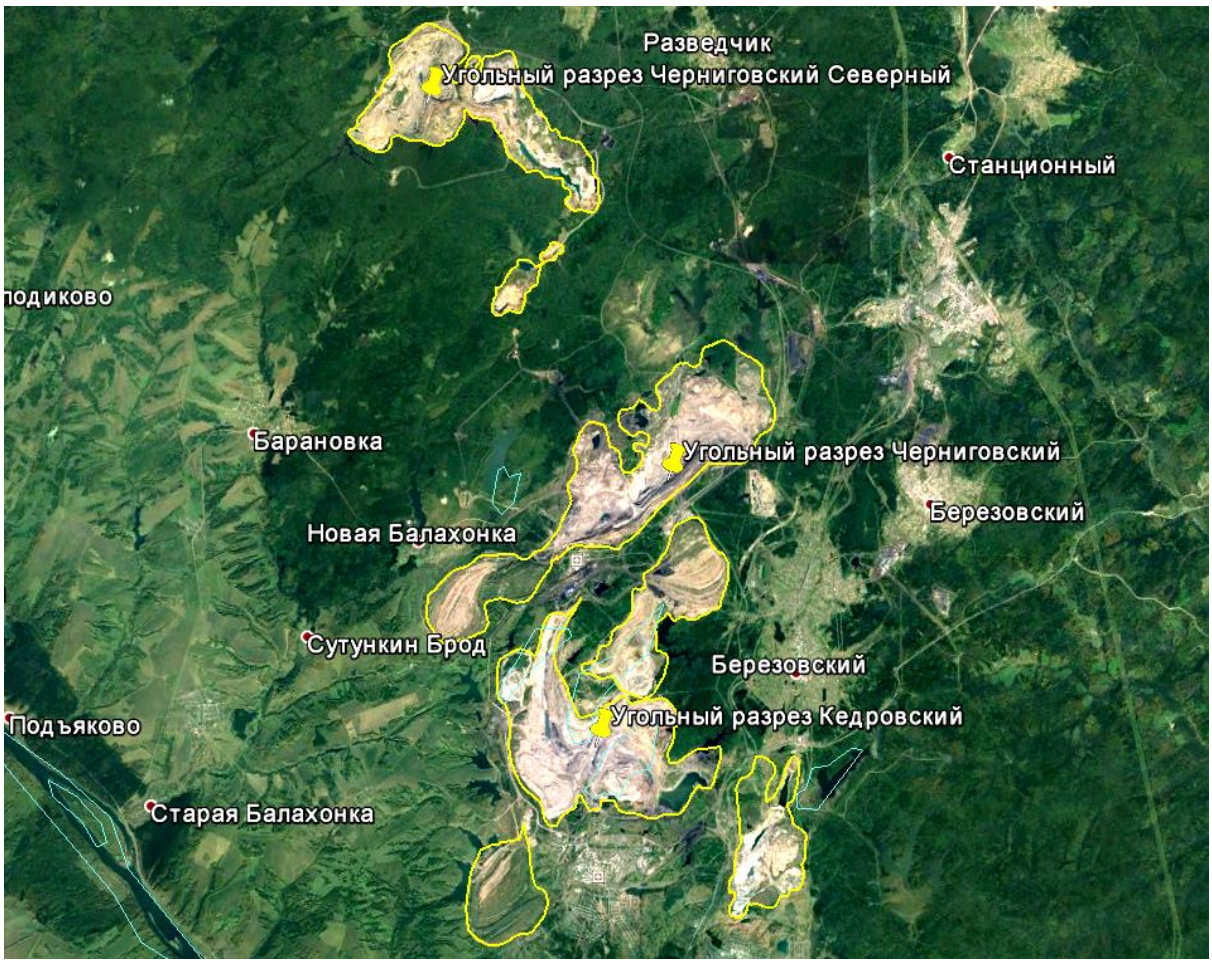


Рис. 1. Фрагмент космоснимка с выделением горных отводов угольных разрезов на территории северных районов Кемеровской области

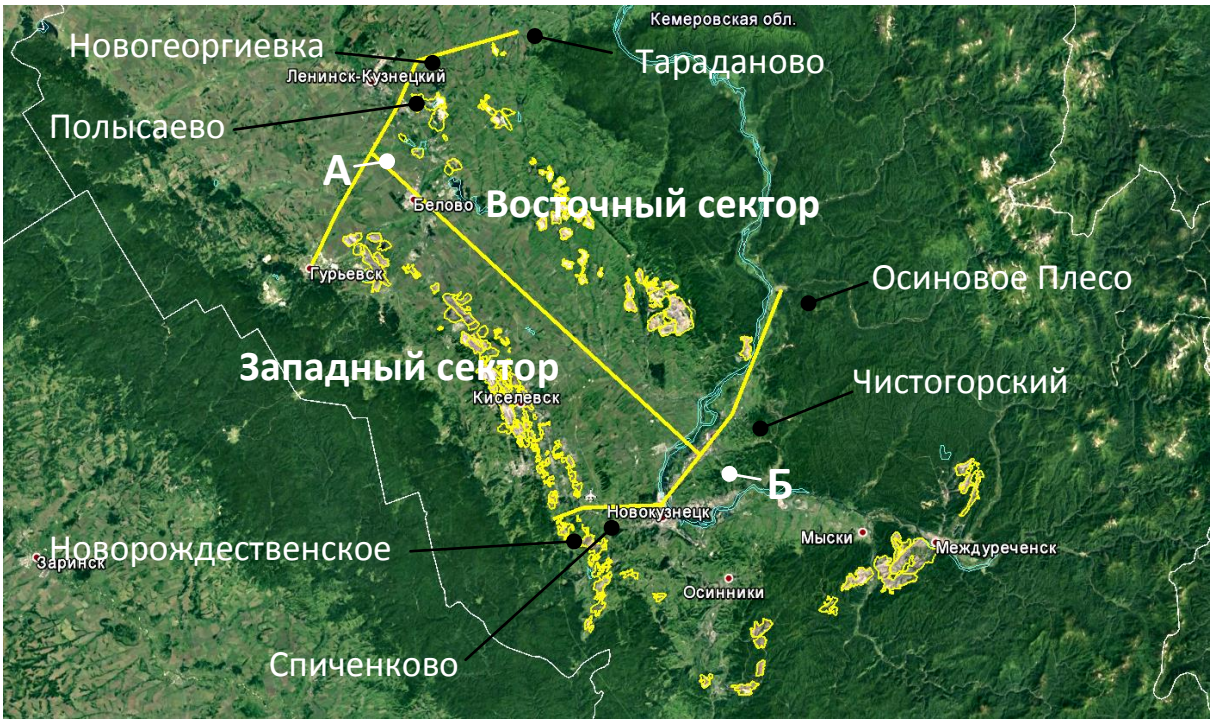


Рис. 2. Фрагмент космоснимка с размещением угольных разрезов на территории Кузнецкой котловины

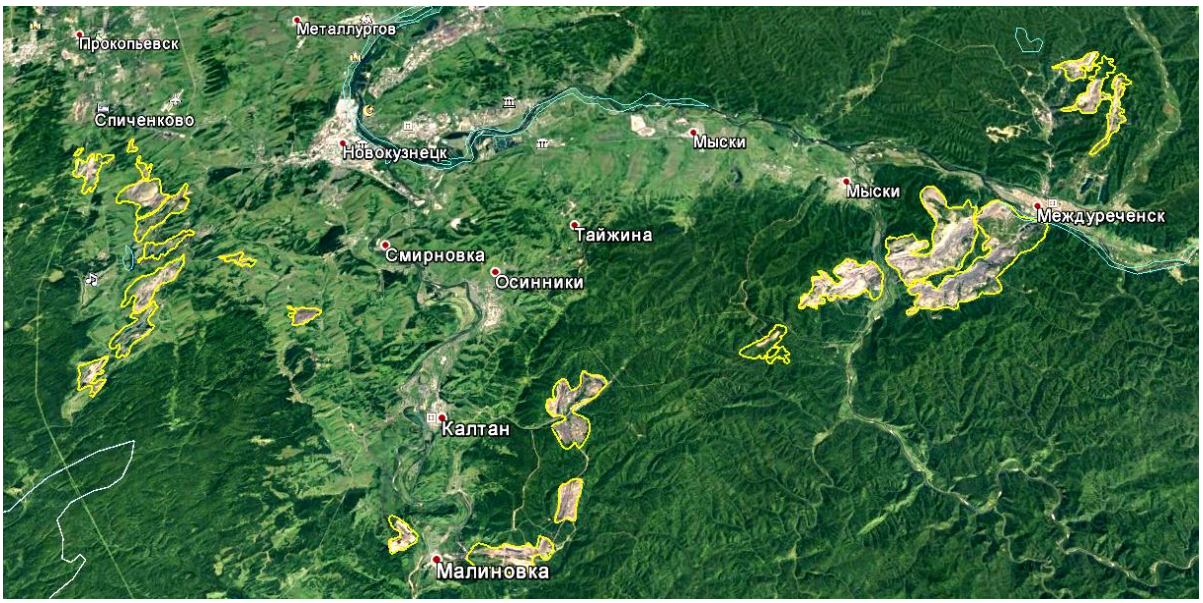


Рис. 3. Фрагмент космоснимка с контурами горных работ и породных отвалов угольных разрезов на территории южных районов Кузбасса

Всего на территории Кемеровской области работает 34 крупных угольных разреза. Вместе с тем отметим, что угольный разрез в классическом понимании – это угледобывающее предприятие, производящее разработку угольного месторождения открытым способом. Поскольку угольное месторождение может быть представлено разрозненными участками, то в принципе на любом разрезе может быть организовано несколько добычных участков. Каждый такой участок вскрывается въездными траншеями внешнего или внутреннего заложения, т.е. имеет индивидуальную систему вскрывающих выработок. В результате каждый такой участок, по сути, представляет самостоятельный угольный разрез. Поэтому мы не ставили задачу определить на карте все угольные разрезы, а ограничились показом основных предприятий, имеющих в своей организационной структуре добычные участки. При определении количества горного оборудования мы сделали привязку к угольным разрезам в отличие от оценки состояния нарушенных земель, поскольку без кадастровой информации невозможно определить площадь земель, занимаемых тем или другим конкретным угледобывающим предприятием, имеющим свое уникальное единственное название.

Далее представлена характеристика современного состояния горных работ и экологии нарушенных земель на угольных разрезах Кемеровской области. Разрабатываемые угольные месторождения представлены всем спектром каменных углей: марки А (антрациты), К (коксующиеся), Д (энергетические). Всего на территории области в разработке находилось более 50 участков месторождений каменного угля. На них функционирует 34 угольных разреза с мощностью по добыче угля более 1,0 млн т в год. Также на территории области производят добычу угля более 10 малых разрезов с производственной мощностью до 1,0 млн т угля в год.

Суммарный годовой объем добычи угля составляет 140 млн т. Для того чтобы добыть уголь в этом объеме, необходимо выполнить вскрышные работы в объеме 890 млн м^3. Усредненный коэффициент вскрыши по всем разрабатываемым месторождениям находится на уровне 6,357 м^3/т. На угольных разрезах Кузбасса работает следующее горное оборудование. Буровые станки типа СБШ-250 или их импортные аналоги составляют 63 ед., драглайны с емкостью ковша от 10 до 40 м^3 – 122 ед., карьерные экскаваторы типа ЭКГ с емкостью ковша от 5 до 40 м^3 – 204 ед. и гидравлические экскаваторы типа прямая и обратная лопата с ковшом емкостью от 1,5 до 32 м^3 – 341 ед. Всего экскаваторов, по нашей оценке, на разрезах Кузбасса насчитывается 667 ед.

Количество горных машин, составляющих парк горного оборудования, представлен в таблице.

Таблица

Сводный количественный состав горного
оборудования на угольных разрезах Кемеровской области

Наименование горнотранспортного оборудования	Кол-во, ед.
Буровой станок СБШ-250	63
Экскаватор карьерный ЭКГ-5 – ЭКГ-40	204
Экскаватор гидравлический с емкостью ковша до 32 м^3	341
Драглайны ЭШ-10/70 – ЭШ-40/85	122

Структура экскаваторного парка с большим количеством драглайнов объясняется горно-геологическим строением угольных пластов, при разработке которых достигается значительный экономический эффект от их использования. Значительное количество гидравлических экскаваторов связано с отработкой значительного количества участков угольных пластов с вертикальным смещением, а также со сложным внутренним строением самих пластов.

По нашей оценке, на всех угольных разрезах, независимо от мощности по добыче угля, в наличии имеется не менее 2 500 автосамосвалов грузоподъемностью в широком диапазоне от 40 до 450 т. Кроме того, на разрезах, где верхние вскрышные уступы отрабатывают с использованием железнодорожного транспорта имеется в наличии 36 тепловозов ТЭМ-7 и 246 думпкаров 2ВС-105.

За весь период разработки угольных месторождений на территории Кемеровской области площадь нарушенных земель составила порядка 76 997,6 га. Распределение нарушенных земель, находящихся под горными работами, породными отвалами на угольных разрезах по районам добычи угля: Северная и Южная группы, Западный и Восточный секторы – представлено на рис. 4. По нашей оценке общая площадь нарушенных земель гораздо больше и достигает уровня 88 тыс. га за счет функционирования объектов производственной и транспортной инфраструктуры угледобывающей отрасли (автобазы, административно-бытовые комбинаты, мастерские, обогатительные фабрики и т.п.), обслуживающих добычу угля открытым способом. Доля земель, отчужденных под нужды только угольных разрезов (без шахт) находится на уровне 0,92 % от территории Кемеровской области.

На первом месте по площади нарушенных земель находится Западный сектор угольных разрезов (30,3 %). Второе место занимает Восточный сектор (29,9 %). На третьем и четвертом местах находятся соответственно Южная (28,9 %) и Северная группа разрезов (10,9 %).

В ходе исследования состояния нарушенных земель было выделено 13 категорий горнопромышленного ландшафта, отчетливо определяемых на снимках из космоса. Максимальное значение имеет категория земель «Участки без растительного покрова» 41 657 га, а самое низкое значение – 48,5 га – имеет категория земель «Породные отвалы с дачными участками и строениями». На диаграмме представлены все основные категории горнопромышленного ландшафта, в полной мере отражающих современное состояние нарушенных земель в Кузбассе (рис. 5).

Суммарный коэффициент рекультивации и самовосстановления экосистемы на угольных разрезах Кемеровской области в виде техногенных водоемов и всех видов растительного покрова (без участков с признаками восстановления растительного покрова), включая сельскохозяйственные угодья, составил на момент оценки 0,357.

Если принять во внимание то обстоятельство, что участки с признаками восстановления растительного покрова – это те потенциальные «ботанические точки роста»,

которые через несколько лет будут представлять участки с устойчивым травянистым, кустарниковым и древесным покровом, то уровень этого коэффициента несколько увеличится до уровня 0,436.

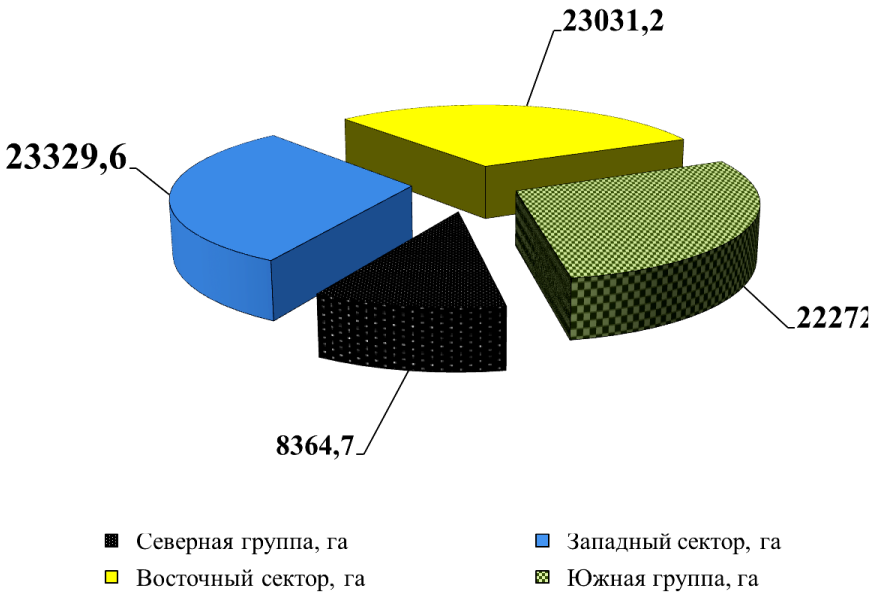


Рис. 4. Структура нарушенных земель под открытыми горными работами
и породными отвалами угольных разрезов на территории Кемеровской области

Проанализировав структуру нарушенных земель площадью 76 997,6 га и восстановленной экосистемы на отработанных участках угольных месторождений (карьерные выемки) и на поверхности породных отвалов суммарной площадью 27 495,8 га в Кемеровской области сформулируем основные выводы.

Техногенные водоемы занимают 2,55 % от площади созданных горнопромышленных ландшафтов. На территории, составляющей 7,9 % от площади нарушенных земель, наблюдаются признаки восстановления растительного покрова. Как правило, это разрозненные участки, на которых начинает появляться пионерная группировка нижних ярусов растительности. Сплошной травянистый покров хорошо развит на разобщенных участках суммарной площадью 12,5 % от площади нарушенных земель. Древесно-кустарниковая растительность хорошо развита на участках породных отвалов, отсыпанных не ранее чем 20–25 лет назад и на межуступных площадках и откосах уступов бортов карьеров, поставленных в нерабочее положение. Географически древесно-кустарниковая растительность в основном находится на внешних и внутренних внутренних отвалах вскрышных пород, поверхностный слой которых сложен смесью почвенных слоев с породами четвертичного возраста (суглинки, глины пески и т.п.). Суммарная площадь участков, покрытых этим видом растительной экосистемы, составляет 4,1 % площади техногенного ландшафта.

Смешанный лес хорошо развит на участках, расположенных на отвалах, отсыпанных на ранних стадиях разработки месторождений. К моменту снимка из космоса эта категория земель представляет собой хорошо сомкнутые кроны взрослых деревьев. Суммарная площадь участков, покрытых смешанным лесом, составляет 6,36 % от всей площади, на которой произошла трансформация природной экосистемы под влиянием открытых горных работ.

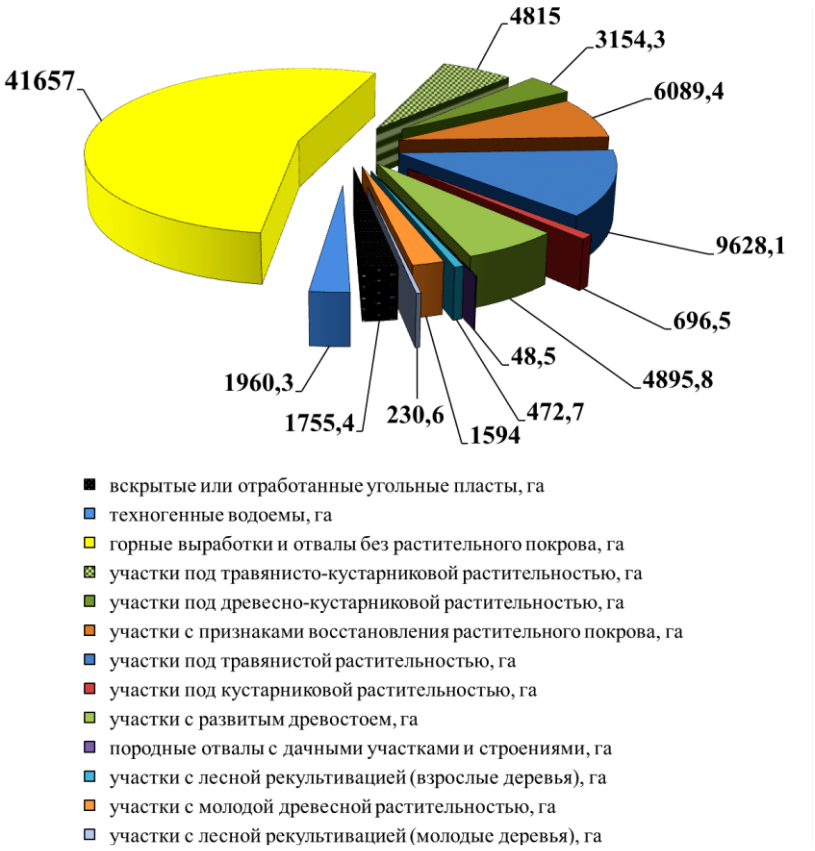


Рис. 5. Структура нарушенных земель и сформированной экосистемы на угольных разрезах Кемеровской области

Участки с лесной рекультивацией (молодые и взрослые деревья хвойных пород) занимают площадь 703,3 га, или 0,91 % от площади территории с техногенными нарушениями. Невысокое значение объясняется тем, что в последние годы происходит массовый отказ угольных разрезов от проведения комплекса специальных работ по рекультивации нарушенных земель с высадкой саженцев деревьев на отработанных землях.

Таким образом, в статье наглядно показаны результаты применения космических технологий в оценке производственного потенциала угольных разрезов. Кроме того, независимость от субъективных оценок и масштаб космической съемки позволяют использовать результаты дистанционного зондирования Земли в качестве метода объективного контроля за экологическим состоянием нарушенных земель. В целом состояние нарушенных земель в Кузбассе характеризуются весьма низкими коэффициентами рекультивации и самовосстановления экосистемы. На наш взгляд, в исследованном угледобывающем регионе необходимо уделять большее внимание работам по рекультивации нарушенных земель и направлять адекватный техногенным нарушениям объем финансовых ресурсов на восстановление экологического баланса на этой территории, состояние которого оценивается как очень далекое от идеального.

Список литературы

1. Угольные разрезы России из космоса. Горные работы и экология нарушенных земель / И.В. Зеньков [и др.] // Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 519 с.

2. Remote monitoring of ecological state of disturbed lands in the area of Trojanovo open pit coal mine in Bulgaria / I.V. Zenkov, YU. P. Yuronen, B.N. Nefedov, V.V. Zayats // Eurasian mining. 2017. № 1. C. P. 38–41.

3. Исследование формирования растительной экосистемы на горнопромышленных ландшафтах угольных разрезов в условиях Азиатского низкогорья с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли / / И.В. Зеньков [и др.] // Уголь. 2016. № 7. С. 85–88.

4. Remote sensing in estimation of forest ecosystem generation at crushed stone quarries in Siberia / I.V. Zenkov, YU. P. Yuronen, B.N. Nefedov, I.M. Baradulin // Eurasian mining. 2016. Vol. 1. P. 50–54.

5. Зеньков И.В., Юронен Ю.П. Нефедов Б.Н. Результаты мониторинга формирования растительной экосистемы на отработанных участках Райчихинского буроугольного месторождения с использованием ресурсов дистанционного зондирования // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 2. С. 28–33.

6. Мониторинг формирования экосистемы в карьерах и на породных отвалах при разработке Баженовского месторождения асбеста с использованием дистанционного зондирования / И.В. Зеньков, Ю.П. Юронен, Б.Н. Нефедов, В.Н. Вокин // Горный журнал. 2017. № 3. С. 81–85.

7. Gardner and Lauchlan H. Fraser. Genomics to assist mine reclamation: a review / Heath W. Garris, Susan A. Baldwin, Jonathan D. Van Hamme, Wendy C. // Restoration Ecology. 2016. Vol. 24, № 2. P. 165–173.

8. The use of remote sensing to develop a site history for restoration planning in an arid landscape / Meshal M. Abdullah, Rusty A. Feagin, Layla Musawi, Steven Whisenant and Sorin Popescu // Restoration Ecology. 2016. Vol. 24, № 1. P. 91–99.

9. Joseph K. Brady. Salamander diversity of reforested abandoned surface coal mines in the Appalachian Region, USA // Restoration Ecology. 2016. Vol. 24, № 3. P. 398–405.

10. The relative influence of in situ and neighborhood factors on reptile recolonization in post-mining restoration sites / Maggie D. Triska, Michael D. Craig, Vicki L. Stokes, Roger P. Pech and Richard J. Hobbs // Restoration Ecology. 2016. Vol. 24, № 4. P. 517–527.

11. Планета Земля.URL: https://www.google.com/earth/.

12. EarthExplorer. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/.

УДК 528

К.В. Раевич[1], И.В. Зеньков[2], Б.Н. Нефедов[3]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
[3]Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: raevich.ap@yandex.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

На территории Кемеровской области в западной ее части более 70 лет производят добычу угля открытым способом. Суммарный объем перерабатываемой горной массы 360 млн м^3. По результатам обработки спутниковых снимков с выделением границ и классов горнопромышленных ландшафтов действующих угольных разрезов определены коэффициенты рекультивации и самовосстановления растительного покрова на отвалах и в карьерах в диапазоне 0,033–0,476. Для угольных разрезов с низкими значениями коэффициентов самовосстановления

© Раевич К.В., Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., 2018

экосистем рекомендованы мероприятия по улучшению экологической обстановки путем проведения работ по рекультивации нарушенных земель. Установлено, что в условиях лесостепной зоны Кузбасса процессы самовосстановления кустарниковой и лесной растительности характеризуются невысокими темпами их протекания во времени и являются малоэффективными с позиции восстановления экологического баланса.

Ключевые слова: Кузнецкий угольный бассейн, центрально-промышленные районы Кузбасса, разработка месторождений каменного угля, угольные разрезы, горнопромышленные ландшафты, дистанционное зондирование, растительная экосистема, рекультивация земель.

В Кемеровской области начало добычи угля открытым способом было положено в послевоенное время на западных территориях центральных промышленно-экономических районов между городами Белово и Прокопьевском. В наших исследованиях этот сектор региона получил условное название Западный сектор. Исследуемый сектор имеет в плане форму полосы шириной до 10 км и протяженность 83 км. С позиции географического расположения на территории Кемеровской области ось симметрии Западного сектора ориентирована с северо-запада на юго-восток от пос. Родниковый до г. Краснобродский, далее направление оси практически южное. В Западном секторе работают 8 крупных угольных разрезов с севера на юг: «Шестаки», «Бачатский», «Краснобродский», «Краснобородский Южный», «Киселевский», «Краснобродский Вахрушево поле», «Коксовый», «Прокопьевский» Количественные показатели парка горного оборудования, размещенного на этих угольных разрезах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количественные показатели парка горного оборудования, размещенного на угольных разрезах Западного сектора

Название угольного разреза	Количество горного оборудования, ед.		
	буровые станки	драглайны	карьерные экскаваторы
Шестаки	2	1	6
Бачатский	4	5	14
Краснобродский	1	6	16
Краснобродский Южный	1	–	10
Киселевский	1	4	26
Коксовый	3	–	17
Краснобродский Вахрушево поле	1	1	12
Прокопьевский	2	2	27

Параллельно с работой крупных разрезов на этой территории производят добычу угля малые разрезы. Сводные показатели переработки горной массы малыми разрезами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели работы малых угольных разрезов Западного сектора

Название угольного разреза	Объем вскрышных работ, млн $м^3$/г.	Объем добычи угля, млн т/г.
Малые разрезы	32	8

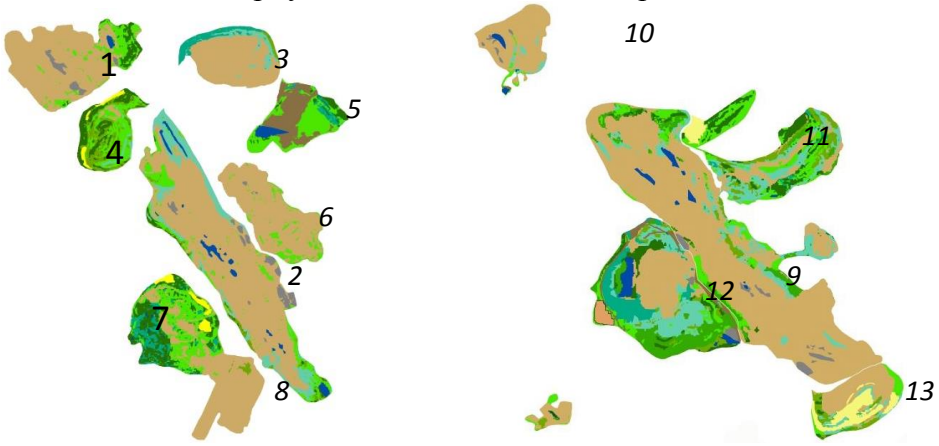
По нашей оценке, на всех угольных разрезах, входящих в Западный сектор, ежегодно добывается угля не менее 45,5 млн т [2; 4]. При этом необходимо обеспечить ежегодный объем вскрышных работ на уровне 275 млн $м^3$.

Оценить последствия открытой угледобычи с позиции восстановления экологического баланса позволяет многосторонний анализ, включая обзор климата, качественных характеристик почвенной оболочки, видового разнообразия растительного покрова на

территории разрабатываемых месторождений угля, а также исследование экологического состояния нарушенных земель с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли. Климат в Кемеровской области, в том числе и на территории исследуемого сектора резко континентальный. В Кузнецкой котловине распространены дерново-подзолистые и серые лесные почвы. Плодородный слой достигает 50 см, такие почвы хорошо прогреваются солнцем, пропускают воздух и влагу, необходимые корням растений. Большая часть черноземов распахана под посевы. В центральной части находятся таежные массивы, представленные хвойными и смешанными лесами, и остаточные сосновые и кедровые боры. В поймах рек произрастают топольники и ольшаники. По северным отрогам, на склоновых участках наблюдается внедрение степных сообществ. К степному поясу относится пониженная западная часть Кузнецкой котловины, левобережье реки Ини – между рекой Иней и Салаирским кряжем. На ковыльно-разнотравной равнинной степи растет ковыль перистый, типчак тонконог, полынь, люцерна и др. Растительность разнотравных степей, близкая к лесостепному поясу, более густая. Здесь растет скабиоза, лабазник, клубника, горицвет, зубровка душистая, тимофеевка, мятлик. Леса здесь разбросаны отдельными березовыми, березово-осиновыми колками и островами, со свойственным им подлеском и травяным покровом. Степная растительность сохраняется по сухим логам, на склонах грив и увалов.

Оценка экологического состояния горнопромышленных ландшафтов угольных разрезов на территории Западного сектора проведена с использованием ресурсов дистанционного зондирования. В оценке были использованы снимки, сделанные в июле 2016 г. На всех рисунках с результатами дешифрирования космоснимков черным цветом показаны участки, на поверхности которых находится уголь. К таким участкам отнесены угольные пласты, подготовленные для экскавации, отработанные угольные пласты, остатки которых еще не засыпаны внутренними отвалами, а также та часть угольных некондиционных пластов, которая по экономическим условиям не может быть реализована потребителям и поэтому размещена на породных отвалах. Синим цветом показаны техногенные водоемы. Оттенками зеленого цвета выделены участки с различным видовым составом и различной плотностью произрастания растительного покрова (травы, кустарники, деревья, а также их комбинации). Желтым цветом показаны участки с признаками восстановления растительного покрова. Остальными цветами, не поименованными выше, показаны участки без растительного покрова.

На рис. 1 представлен фрагмент космоснимка изучаемой территории, на которой находятся угольные разрезы «Шестаки» (1), «Бачатский» (2), «Краснобродский» (9), структурно входящие в северную часть Западного сектора.



а *б*

Рис. 1. Фрагмент космоснимка с выделением границ объектов исследования и результатами дешифрирования: *а* – угольные разрезы «Шестаки» (*1*), «Бачатский» (*2*), внешние отвалы (*3-4, 6-8*); *б* – угольный разрез «Краснобродский» (*9*), внешние отвалы (*11–13*)

Угольный разрез «Шестаки» был построен в конце 1970-х гг. За период его эксплуатации сформированы две карьерные выемки, одна из которых имеет глубину более 200 м и протяженность с севера на юг 2,7 км. Весь объем вскрышных пород отсыпали во внешние отвалы, и лишь в последнее время вскрышу отсыпают на локальных участках в выработанном пространстве карьера. Общая площадь объектов горнопромышленного ландшафта составляет 825 га. На территории нарушенных земель участки с травянистой растительностью занимают площадь 100,4 га, хорошо развитый смешанный лес находится на отвалах площадью 48,5 га, где вскрышные породы не отсыпают более 25 лет. Техногенные водоемы общей площадью 6,6 га находятся в понижениях техногенного рельефа и приурочены к придонной части карьеров. Коэффициент самовосстановления экосистемы на этом разрезе составляет 0,186.

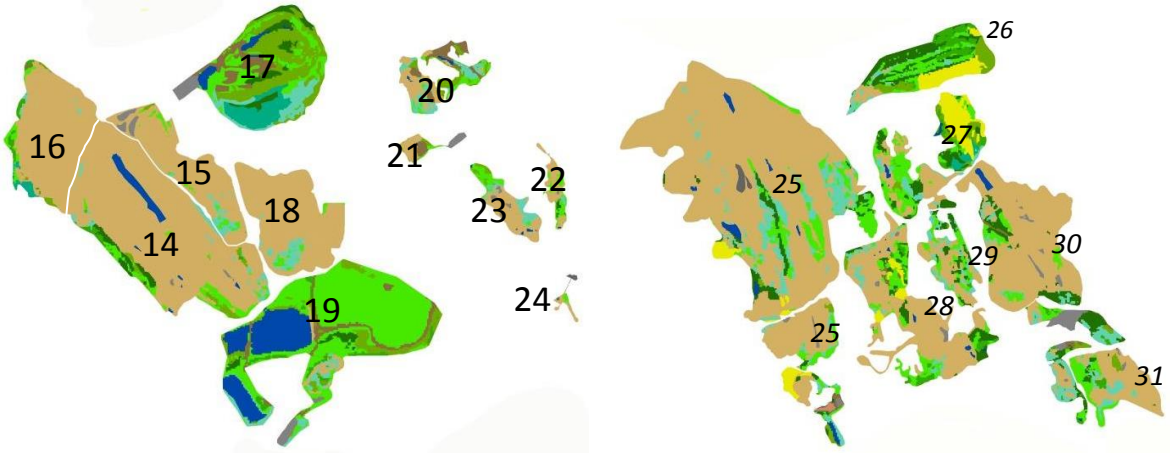
Угольный разрез «Бачатский» был построен в послевоенное время в конце 1940-х гг. За период его эксплуатации сформированы одна карьерная выемка (2) протяженностью 9 км и глубиной более 400 м. Вскрышные породы примерно в равных пропорциях были вывезены железнодорожным (объекты 3 и 4) и автомобильным транспортом (объекты 6 и 7) во внешние отвалы. Объект 5 – пруд-отстойник (огорожен дамбой), в который сливают внутрикарьерные воды. С августа 2011 г. вскрышные породы с доставкой конвейерным транспортом начинают отсыпать во внешние отвалы с использованием отвалообразователя (объект 8). В результате рядом с карьером находятся пять породных отвалов. В последние годы небольшой объем автомобильной вскрыши отсыпают в центральной части разреза с межуступных площадок восточного нерабочего борта. Общая площадь объектов горнопромышленного ландшафта на разрезе «Бачатский» составляет 4657,6 га.

На территории карьера размером 1 716,4 га участки со всеми видами хорошо развитого растительного покрова занимают площадь 210,9 га. Внешние отвалы занимают территорию размером 2 941,2 га. На отвалах сформированы все виды растительного покрова общей площадью 1 272,7 га. На этой территории находятся два участка с лесной рекультивацией размером 55,7 га. Смешанный лес в стадии развития и хорошо развитый находится на нерабочих бортах карьера, на отвалах и занимает площадь 484 га. Коэффициент рекультивации и самовосстановления растительной экосистемы на этом разрезе составляет 0,319.

Угольный разрез «Краснобродский» – первый в Кузбассе. Был построен в 1947 г. Разрез отрабатывает три угольных месторождения самостоятельными карьерами («Краснобродский», «Краснобродский южный» и «Краснобродский Вахрушево поле»). За период их эксплуатации сформированы девять карьерных выемок, каждая из которых имеет глубину более 200 м. Общая протяженность карьеров по верху составила 16,3 км. С июля 2013 г. добыча угля прекращена на отдельном добычном участке площадью 227,1 га (объект 10). За период работы разреза «Краснобродский» вскрышные породы отсыпали во внешние железнодорожные отвалы (11–13). В последние годы автомобильную вскрышу складируют на поверхности этих отвалов путем организации новых отвальных ярусов. В результате этого общая высота отвалов достигает 150–180 м. Небольшой объем вскрыши размещают в выработанном пространстве карьера.

Общая площадь объектов горнопромышленного ландшафта составляет 3 403,9 га. На территории карьера размером 1 620,9 га участки со всеми видами хорошо развитого растительного покрова занимают площадь 183,5 га. Внешние отвалы размещены на территории размером 1 555,9 га. На них сформирован растительный покров общей площадью 835,3 га. На отвалах находятся два участка с лесной рекультивацией размером 98,1 га. Участки с древесно-кустарниковой растительностью занимают площадь 620,4 га. На внешнем отвале (12) разместились дачные строения площадью 19,6 га. Средний коэффициент рекультивации и самовосстановления растительной экосистемы на этом разрезе составляет 0,299.

На рис. 2 представлен фрагмент космоснимка изучаемой территории, на которой находятся разрезы «Краснобродский Южный» (14–15), «Киселевский» (25) и его добычные участки (27–31), входящие в среднюю часть Западного сектора. Цифрами 16-18, 26 обозначены внешние породные отвалы, отсыпаемые в ходе добычи угля. Объект 19 – пруд-отстойник площадью 707,4 га для слива внутрикарьерной воды, поднимаемой по трубам с придонной части разреза «Краснобродский Южный».



а *б*

Рис. 2. Фрагмент космоснимка с выделением границ объектов исследования и результатами дешифрирования: *а* – угольный разрез «Краснобродский Южный», внешние отвалы и малые разрезы; *б* – угольный разрез «Киселевский», внешние отвалы и добычные участки

Угольный разрез «Краснобродский Южный» был построен в середине 1970-х гг. За период его эксплуатации сформировано две карьерные выемки (14–15) общей протяженностью 6,4 км и глубиной более 250 м. В настоящее время карьерную выемку (15) заполняют вскрышными породами. В основной период работы до 2003 гг. вскрышные породы транспортировали железнодорожным транспортом на внешний отвал (объект 17). В дальнейшем вскрышу перемещали в отвалы с использованием автомобильного транспорта (объекты 16-18). В результате добычи угля рядом с карьером находятся три породных отвала и один внутренний, отсыпаемый на месте отработанных угольных пластов. Общая площадь объектов горнопромышленного ландшафта на разрезе «Краснобродский Южный» составляет 2751,9 га. На территории карьера размером 970,6 га участки со всеми видами хорошо развитого растительного покрова занимают общую площадь 96,9 га. Внешние отвалы размещены на площади 1073,9 га. На этой территории лесная рекультивация не проводилась. Смешанный лес в стадии развития и хорошо развитый лес произрастают в виде разрозненных участков на поверхности отвалов общей площадью 91,6 га. Участки с травянисто-кустарниковой растительностью на их поверхности занимают площадь 256 га. Участки со всеми видами растительного покрова, включая экологические показатели пруда-отстойника карьерных вод (500,3 га), занимают площадь 929,2 га на территории нарушенных земель угольным разрезом «Краснобродский Южный». Коэффициент самовосстановления растительной экосистемы на объектах горнопромышленного ландшафта этого разреза составляет 0,338.

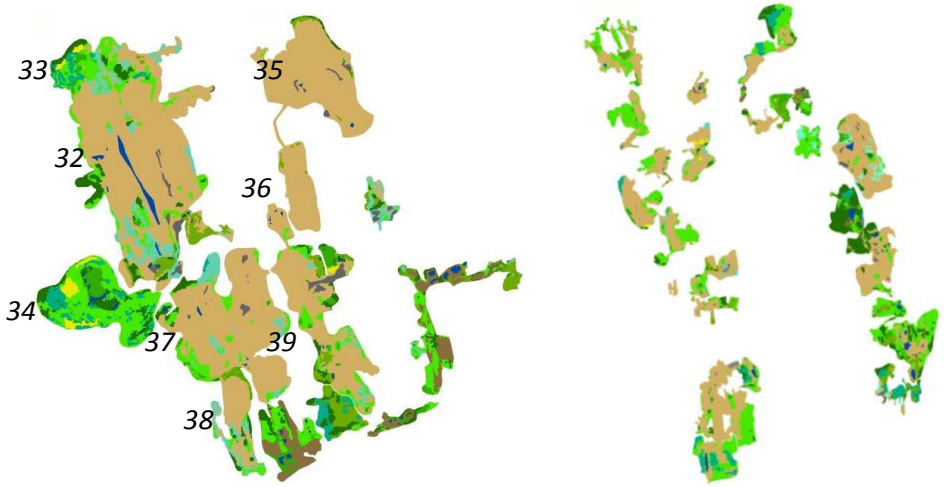
Площадь нарушенных земель малыми разрезами (объекты 20–24), территориально расположенными восточнее разреза, составляет 288,1 га. Участки с травянистой, кустарниковой и травянисто-кустарниковой растительностью на них занимают площадь 74,9 га.

Угольный разрез «Киселевский» был построен в 1953 г. За период его эксплуатации сформировано восемь карьерных выемок (25, 27–31) общей протяженностью 10,2 км и глубиной от 80 до 280 м. До начала 2000-х гг. на разрезе вскрышные породы

с верхних уступов вывозили железнодорожным транспортом на внешний отвал (26). В настоящее время добычу угля производят в основной карьерной выемке (25). Значительную часть вскрыши в основной период работы до 2017 гг. транспортировали автосамосвалами на внешние отвалы. На рис. 2 внешние отвалы отличить от горных работ можно только по наличию на них участков с растительным покровом, поскольку горнопромышленный ландшафт, формируется при добыче угля на этом разрезе и его добычных участках таким образом, что многочисленные отработанные карьерные выемки сразу же засыпают вскрышными породами. Общая площадь объектов горнопромышленного ландшафта на разрезе «Киселевский» составляет 3 721,7 га.

На территории основой карьерной выемки с приконтурными внешними отвалами размером 1 647,1 га участки со всеми видами хорошо развитого растительного покрова занимают площадь 147,8 га. На территории внешних отвалов частично проведена лесная рекультивация. Общая площадь участков рекультивации с молодыми и взрослыми деревьями хвойных пород составила 159,8 га. Смешанный лес в стадии развития и хорошо развитый находится на нерабочих бортах карьера, на отвалах и занимает площадь 286,6 (7,7 %) га. В то же время участки с травянисто-кустарниковой растительностью занимают площадь 143,1 га. Участки со всеми видами растительного покрова располагаются на площади 1 042,4 га. Коэффициент рекультивации и самовосстановления растительной экосистемы на этом разрезе, его внешних отвалах и добычных участках составляет 0,28.

На рис. 3, *а* представлен фрагмент космоснимка изучаемой территории, на которой находятся угольные разрезы «Краснобродский Вахрушево поле» (32), «Коксовый» (35), «Прокопьевский» (37), входящие в среднюю часть Западного сектора. На рис. 3 (б) представлен фрагмент космоснимка территории, на которой находятся малые угольные разрезы, входящие в южную часть Западного сектора.



а *б*

Рис. 3. Фрагмент космоснимка с выделением границ объектов исследования и результатами дешифрирования: *а* – угольные разрезы «Краснобродский Вахрушево поле», «Коксовый», «Прокопьевский»; *б* – малые разрезы

Угольный разрез «Краснобродский Вахрушево поле» был построен в середине 1970-х гг. За период его эксплуатации сформировано две самостоятельные карьерные выемки (32) общей протяженностью 5,5 км и глубиной более 200 м. В настоящее время в этих карьерах производят добычу угля на нижних уступах. В период работы вплоть до 2017 г. вскрышные породы транспортировали исключительно автомобильным транспортом на внешние отвалы (объект 33–34). В результате добычи угля рядом с карьером находятся три породных отвала, отсыпанные с севера, запада и востока от гор-

ных работ сплошным массивом, имеющим в плане форму подковы. Общая площадь объектов горнопромышленного ландшафта на разрезе «Краснобродский Вахрушево поле» составляет 1 811,8 га.

На территории нарушенных земель участки со всеми видами хорошо развитого растительного покрова занимают площадь 722,6 га. По нашей оценке на территории горнопромышленного ландшафта этого разреза имеется породный отвал со 100%-ным восстановлением экологического баланса (объект 34). Участки с травянистой и кустарниковой растительностью находятся на площади 196,7 и 30,5 га соответственно. На территории отвала проведена лесная рекультивация с высадкой хвойных пород деревьев на площади 26,3 га. Кроме того, здесь присутствует смешанный лес во всех стадиях его развития на площади 119,9 га. В центральном секторе отвала образован техногенный водоем площадью 9,6 га. Лесная рекультивация также проведена на участке отвала (33) площадью 6,4 га. Коэффициент рекультивации и самовосстановления растительной экосистемы в карьере и на его внешних отвалах составляет 0,399.

Угольный разрез «Коксовый» был построен в начале 2000-х гг. с целью доработки запасов угля, оставшихся от подземной добычи и засыпки впадин рельефа, оседающего на месте выемки угля шахтным способом. За период его эксплуатации сформирована одна карьерная выемка (35) Г-образной формы размером 1,7×2,7 км и глубиной 180 м. В основной период работы до 2016 г. вскрышные породы транспортировали автомобильным транспортом на внешний отвал (объект 36). С 2016 г. разрез перешел на внутреннее отвалообразование. В настоящее время карьерную выемку в южной ее части заполняют вскрышными породами. В результате добычи угля рядом с карьером находятся три породных отвала и один внутренний, отсыпаемый на месте отработанных угольных пластов. Общая площадь двух объектов горнопромышленного ландшафта (карьер и отвал), образованного при работе разреза «Коксовый» составляет 597,8 га.

На территории нарушенных земель участки со всеми видами хорошо развитого растительного покрова занимают площадь 19,8 га. Участки с травянистым и травянисто-кустарниковым покровом расположены на площади 1,2 и 10,8 га соответственно, а участки с кустарниковым и древесным покровом – соответственно на площади 1,5 и 6,3 га. Коэффициент самовосстановления растительной экосистемы в карьерной выемке и на поверхности внешнего отвала составляет 0,033.

Угольный разрез «Прокопьевский» был построен в 1953 г. на базе мелких разрезов, принадлежащих шахтам. За период его эксплуатации сформированы две карьерные выемки (37) общей протяженностью 2,3 км и глубиной до 200 м, разделенные между собой безугольным участком. Вскрышные породы вывозят автомобильным транспортом на внешние отвалы (объект 38–39). Отвал (39) расположен на расстоянии от карьера таким образом, чтобы по мере развития горных работ он не находился в секторе угольных пластов, предназначенных для выемки открытым способом. В результате добычи угля рядом с карьером находятся четыре породных отвала. Общая площадь объектов горнопромышленного ландшафта, состоящего из двух карьеров и четырех отвалов разрезе «Прокопьевский» составляет 1 413,1 га.

На территории нарушенных земель участки со всеми видами хорошо развитого растительного покрова занимают площадь 290,2 га. На поверхности породного отвала (объект 39) угольным разрезом проведена лесная рекультивация с высадкой саженцев хвойных пород деревьев на небольшой площади 3,42 га Смешанный лес в стадии развития и хорошо развитый находится на нерабочих бортах карьера, на отвалах и занимает незначительную площадь 54,1 га. Участки с травянисто-кустарниковой и кустарниковой растительностью занимают площадь 79,6 га. Коэффициент самовосстановления растительной экосистемы на объектах горнопромышленного ландшафта этого разреза составляет 0,205.

Суммарная площадь нарушенных земель в ходе деятельности малых угольных разрезов южной части Западного сектора составляет 2807,3 га. Участки со всеми видами растительного покрова занимают площадь 1336,9 га. Коэффициент рекультивации и самовосстановления растительной экосистемы на территории нарушенных земель малыми разрезами на исследуемой территории составляет 0,476.

Кроме рассмотренных выше, в этом секторе также имеются нарушенные земли инфраструктурных предприятий, деятельность которых связана с обслуживанием угледобывающей отрасли. Количественные и экологические показатели этих предприятий, не представленные в статье, вошли в общую структуру нарушенных земель и восстановленной экосистемы. Суммарная площадь земель, нарушенных в результате добычи угля открытым способом на территории Западного сектора, составила 23329,6 га. Результаты определения площадей выделенных 12 классов ландшафта представлены в виде диаграммы на рис. 4.

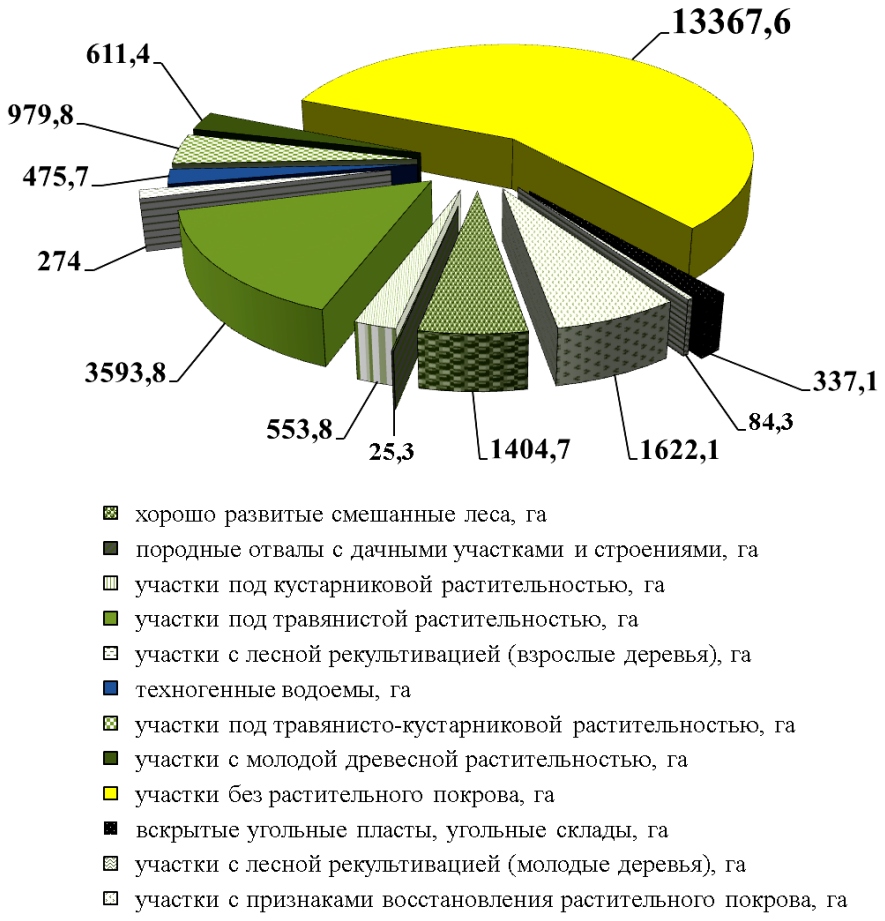


Рис. 4. Структура нарушенных земель под горными работами и экосистемой на объектах горнопромышленных ландшафтов угольных разрезов Западного сектора Кузбасса

Далее представим краткий анализ структуры нарушенных земель. Значительная их площадь (58,7 %) остается к настоящему времени без растительного покрова. Площадь вскрытых или отработанных угольных пластов незначительная и составляет 1,4 %. Техногенные водоемы занимают 2,0 % площади нарушенных земель. Почти шестую часть всей площади нарушенных земель (15,4 %) занимают участки под травянистым покровом. Коэффициент рекультивации и самовосстановления экосистемы в виде техногенных водоемов и всех видов растительного покрова (без участков с признаками

восстановления растительного покрова) на угольных разрезах Западного сектора имеет невысокое значение. На момент оценки его значение составляло 0,343. Вместе с тем, необходимо отметить положительную тенденцию в увеличении общей площади участков породных отвалов, на которых произрастает древесная и кустарниковая растительность любого возраста и всех степеней плотности произрастания, которая по результатам спутниковой съемки определена на уровне 3 933,3 га (16,7 %).

На тех угольных разрезах, где поверхности породных отвалов практически на 100 % сложены глубинными породами – песчаниками, алевролитами и т.п., а также отмечены низкие коэффициенты самовосстановления растительной экосистемы, необходим комплекс специальных работ по горнотехнической и биологической рекультивации земель с решением задач формирования рельефа, повышения содержания гумуса в поверхностном слое, а также проведением лесной рекультивации с высадкой саженцев деревьев хвойных пород.

Список литературы

1. Угольные разрезы России из космоса. Горные работы и экология нарушенных земель / И.В. Зеньков [и др.]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 519 с.
2. URL: http://ecokem.ru/klimaticheskie-usloviya/.
3. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki.
4. URL: http://big-archive.ru/geography/physical_geography_of_the_Soviet_Union/166.php.
5. URL: https://www.google.com/earth/.
6. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/.

УДК 528.88::556

В.Ю. Ромасько[1, 4], И.Н. Гордеев[2, 4], Д.А. Бураков[3, 4]

[1]НИЦ «Планета», Новосибирск, Россия
[2]Среднесибирское УГМС, Красноярск, Россия
[3]Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
[4]Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия
e-mail: rvu@rcpod.siberia.net, biggin83@mail.ru, daburakov@yandex.ru

ОЦЕНКА СНЕГОЗАПАСОВ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА AMSR-2

Рассмотрена стандартная методика оценки снегозапасов по данным микроволнового радиометра AMSR-2, установленного на спутнике GCOM-W1. Проведен сравнительный анализ результатов оценки снегозапасов с наземными данными маршрутной снегосъемки на территории Красноярского края и бассейна Верхней Оби.

Ключевые слова: запасы воды в снеге, AMSR, маршрутные снегосъемки.

Снежный покров со спутников наблюдается практически с первых попыток взглянуть на Землю с орбиты, что неудивительно, так как он всегда присутствует на поверхности планеты. Регулярное картографирование снежного покрова ведется NOAA с 1966 г. [1] и превратилось в одно из привычных применений дистанционного зондирования, основанное на данных современных метеорологических и природно-ресурсных спутников. Однако задача определения высоты снежного покрова или запа-

© Ромасько В.Ю., Гордеев И.Н., Бураков Д.А., 2018

сов воды в снеге оказалась существенно сложнее. Первая предложенная методика была опубликована только в 1982 г. [2] и рассчитана на использование данных микроволнового радиометра SMMR со спутника Nimbus-7 – первого микроволнового сканирующего радиометра с конической разверткой и параболическим главным зеркалом. После ряда последующих работ [3–5], основанных на данных того же и последующих микроволновых радиометров подобной конструкции, таких как SSM/I на КА DMSP и AMSR-E на КА Aqua, сформировался современный подход к оценке высоты снежном покрова и запасов воды в снеге по измерениям радиационной температуры в различных диапазонах сантиметровых волн.

В настоящее время на орбите действует КА GCOM-W, имеющий на борту микроволновой радиометр AMSR-2, данные которого централизованно принимаются и обрабатываются в Японском космическом агентстве, и доступны для свободного использования. Этот радиометр имеет коническую развертку с углом к вертикали 55°, гарантирующую постоянство размеров мгновенного поля зрения на местности. Главное параболическое зеркало диаметром 2 м обеспечивает хорошую фокусировку и малое мгновенное поле зрения. Радиометр имеет 8 каналов в диапазоне от 6 до 90 ГГц. Разрешение на местности пропорционально длине волны и составляет от 3×5 до 35×62 км. Угол сканирования в 122° с солнечно-синхронной орбиты высотой 700 км обеспечивает полосу захвата шириной 1600 км, чего, однако, недостаточно для полного покрытия поверхности Земли каждые сутки. Полное покрытие за сутки обеспечивается только для широт выше 51°.

Данные AMSR-2 собираются и обрабатываются централизованно и доступны в трех вариантах обработки. Формат обмена данными – HDF5. В настоящем исследовании использовались данные 3-го уровня обработки на сетке 0,1° в географической системе координат на весь земной шар в виде наложения витков друг на друга за 12 ч.

Применяемый алгоритм оценки высоты снега [6] несложен и содержит две ветви. Сначала оценивается наличие глубокого снега по условиям: $T_{36H} < 245$ K и $T_{36V} < 255$ K, или $T_{10V} > T_{36V}$, или $T_{10H} > T_{36H}$, где $T_{NH/V}$ – это радиационная температура на частоте N горизонтальной (H) или вертикальной (V) поляризации.

Если условия не выполняются, то оценивается наличие тонкого снега по выполнению условий: $T_{89V} <= 255$ K, и $T_{89H} <= 265$ K, и $T_{23V} > T_{89V,}$ и $T_{23H} > T_{89H,}$ и $T < 267$ K, где $T = 58{,}08–0{,}39\ T_{18V} + 1.21\ T_{22V} – 0{,}37\ T_{36H} + 0{,}36\ T_{89V}$. Если условия наличия тонкого снега выполняются, то высота снежного покрова принимается равной 5 см. Иначе оценивается высота глубокого снежного покрова по формуле

$$SD = ff\ SD_f + (1 – ff)\ SD_o,$$

где ff – доля площади, покрытая лесом; SD_f и SD_o – оценки высоты снега для лесистой и безлесной части пикселя:

$$SD_f = (T_{18V} – T_{36V}) / [\log_{10}(pol36)\ (1 – 0.6fd)],$$

$$SD_o = (T_{10V} – T_{36V}) / \log_{10}(pol36) + (T_{10V} – T_{18V}) / \log_{10}(pol18),$$

где fd – плотность древостоя по карте покрытия растительности (Vegetation Continuous Fraction) Университета штата Мериленд, а pol36 и pol18 – поляризационные множители – разница между радиационной температурой вертикальной и горизонтальной поляризаций на 36 и 18 ГГц, помогающие в некоторой степени учитывать средний размер зёрен снега.

Авторы алгоритма отмечают [6] потенциальные неучтенные или недоучтенные факторы, искажающие оценки по этому алгоритму, такие как: ослабление излучения в атмосфере, ослабление излучения высокой вертикальной растительностью, изменение плотности и грануляции снега со временем, влияние наличия в пределах пикселей мелких водных объектов, а также невозможности оценки высоты тающего снега. Так, ослабление излучения неучтенными вариациями в оптической плотности атмосферы,

приведенные к ошибке запасов воды в снеге, могут достигать 25–50 % [7]. Применяемая методика учета влияние древостоя снижает, но исключает полностью его влияние, то же относится и к учету размера гранул с помощью поляризационных множителей. Влияние мелких озер в пределах пикселей в принципе не учитывается, тогда как, фактически, их эффект для тундры и бореальных лесов имеет даже разный знак. Наличие тающего снега только приблизительно обнаруживается, в случае чего алгоритм просто не применяется.

Для оценки точности измерений запасов воды в снеге по данным прибора AMSR-2 использовались данные наземной съемки с 96 снегомерных маршрутов и 11 снегомерных пунктов Красноярского края и бассейнов Енисея и Верхней Оби, всего с 94 метеостанций. Маршрутная снегомерная съемка проводится каждую декаду (реже каждые 5 суток) в период наличия снежного покрова. Вне графика обычно также отмечается дата схода снега. Для сравнения использовались только данные по запасам воды в снеге. Всего для сравнения использовано более 6398 наземных измерений за период с 2012–2017 гг.

Для сбора и обработки данных AMSR-2 была разработана автоматическая система с расчетом на ее дальнейшее использование в оперативной практике. Собираемые данные накапливаются в базе данных под управлением СУБД PostgreSQL. Собираемая информация AMSR-2 включает за каждый момент наблюдения (дважды в сутки) матрицу 4×4 из 16 ближайших к каждой метеостанции узлов сетки, а также результаты пространственной билинейной и бикубической интерполяции в точке метеостанции. П ходу исследования система усложнялась добавлением новых видов обработки, например, таких как вычисление максимума, среднего и медианы в скользящем окне за 16 суток.

В результате анализа полученных наборов данных было выявлено несколько основных особенностей данных AMSR-2, а именно:

- наличие провалов до нуля в данных среди зимнего сезона,
- ограничение сверху на максимальный обнаруживаемой снегозапас;
- слабая периодическая 16-суточная составляющая;
- бесполезность пространственной интерполяции.

Наличие нулей в данных обусловлено вышеупомянутой чувствительностью к наличию воды на поверхности снега, в случае наличия которой метод полностью теряет чувствительность до нуля. Несмотря на наличие оценки применимости метода через эмпирическую оценку температуры, сам факт неприменимости метода в данных никак не отмечается. Соответственно, нули в данных могут появиться в любой момент, например, в период оттепели зимой. При этом они, естественно, не имеют смысла, как все другие данные AMSR-2, фиксирующие снижение снегозапасов. Таким образом, требуется обязательная внешняя проверка применимости данным AMSR-2.

Для метеостанций с большим зимними накапливаемыми снегозапасами проявляется ограничение на максимальный снегозапас, который может быть оценен по данным AMSR-2. В описании методики приводятся верхние оценки высоты снежного покрова, обнаруживаемые методом, в 1 м, что соответствует снегозапасу в 150–400 кг/м^2. И действительно, максимальное зарегистрированное значение в окрестностях метеостанций по данным AMSR-2 составило 565 кг/м^2. Однако, фактически по результатам сравнения максимально обнаруживаемый снегозапас по данным AMSR-2 для многоснежных метеостанций значительно ниже – в районе 75–200 кг/м^2 при фактических максимумах по наземным данным 200–950 кг/м^2. Неприятным является также тот факт, что из самих данных AMSR-2 признаки его ограничения никак не вытекают, и чтобы это ограничение обнаружить требуются независимые наземные данные. Поэтому из дальнейшего исследования пришлось исключить метеостанции, для которых наблюдавшийся максимум оценки снегозапаса по AMSR-2 не достигал наблюдаемых максимумов по наземным данным. После исключения осталось 34 пункта из 106.

Детальное рассмотрение временного ряда значений AMSR-2 демонстрирует наличие 16 суточной периодичности, амплитуда которой зависит от места наблюдения. Данный феномен вызван комбинацией геометрии луча зрения и 16-суточным периодом повторения орбиты. Каждые 16 суток солнечно-синхронная орбита спутника повторяется, и, соответственно, повторяются азимуты наблюдения данной точки и паттерны пикселей на местности. При наличии неоднородности растительного покрова или развитого рельефа местности (т.е. практически всегда) возникает и 16-суточные осцилляции в данных. Для исключения этой периодической составляющей необходимо применять фильтрацию в скользящем окне длиной в 16 суток, а в качестве функции фильтра применять среднее или перцентиль данных в окне. Было опробованы три функции: максимум, среднее и медиана. Наиболее состоятельной из них оказалась медиана.

Линейные регрессионные состоятельные модели оценки наземных данных по AMSR-2, отдельные для каждой метеостанции, построены для 24 станций из 34 по условию наличия 20 и более пар точек. Независимой переменной считались данные AMSR-2, прошедшие фильтрацию медианой в окне 16 суток (привязанную к 8 суткам окна) и интерполированные билинейной интерполяцией в точку метеостанции по ближайшим 4 узлам. Квадрат коэффициента корреляции этих моделей (R^2) составил от 0,29 до 0,76, для 50 % станций — более 0,46. Линейный коэффициент пропорциональности в моделях от 0,156 до 0,86, константа от –7,29 до 41,86 кг/м^2. Попытка использовать в качестве данных не интерполированные данные узлов, показала, что всегда можно найти узел, дающий более точную модель, чем получается построить по интерполированным данным. В случае поиска наилучшего узла, обеспечивающего лучшую корреляцию, квадрат коэффициента корреляции этих моделей (R^2) составил от 0,33 до 0,83, для 50 % станций – более 0,55. Таким образом, процедура пространственной интерполяции представляется бесполезной из-за сильной неоднородности поверхности внутри площадки пикселя в несколько километров в диаметре. Получается, что окрестные пиксели могут иметь случайно более близкие интегральные оценки снегозапаса к точечным наземным наблюдениям, чем результаты формальной интерполяции по ближайшим узлам.

Для двух станций не удалось построить состоятельную модель даже при наличии более 20 пар данных. Для метеостанции Кресты Таймырские коэффициент пропорциональности получился отрицательным, а квадрат коэффициента корреляции 0,139, для Тембенчи – $R^2 = 0{,}046$. Облако точек на скаттерограмме у них, фактически, круглое и не имеет выраженной ориентации. Это можно объяснить случайным фактическим распределением типа поверхности и рельефа местности в пределах пикселей AMSR-2. Так, например, Кресты Таймырские расположены на берегу реки Хатанги в окружении тундровых озер, негативное влияние которых отмечалось в литературе выше.

Заключение. Таким образом, использование данных микроволнового радиометра AMSR-2, установленного на КА GCOM-W, для оценки запасов воды в снеге возможно только в период снегонакопления и невозможно в период снеготаяния. Для исключения 16-суточной периодической составляющей в данных в качестве варианта обработки можно использовать медиану в скользящем окне за 16 суток. При необходимости связать данные о запасах воды в снеге с AMSR-2 с данными наземных измерений требуется построение отдельной регрессионной зависимости для каждого пункта наземных измерений с подбором узла сетки данных AMSR-2 с наибольшим коэффициентом корреляции в качестве независимой переменной. Построение регрессионной зависимости не всегда возможно по условиям местности вокруг метеостанции. Также максимальные возможные снегозапасы в точке метеостанции не должны превышать величины около 200 кг/м^2, выше которой снегозапасы по данным AMSR-2 оценить невозможно по условиям применимости методики.

Список литературы

1. Matson M. NOAA satellite snow cover data//Paleogeography and Paleoecology. 1995. № 90. P. 213–218.

2. Kunzi K.F., Patil S., Rott H. Snow-cover parameters retrieved from Nimbus-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) data//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE20. 1982. P. 452–467.

3. Chang A.T.C., Foster J.L., Hall D.K. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters//Ann. Glaciol. 1987. № 9. P. 39–44.

4. Kelly R.E.J., Chang A.T.C. Development of a passive microwave global snow depth retrieval algorithm for SSM/I and AMSR-E data // Radio Science. 2003. № 38.

5. Kelly R. The AMSR-E snow depth algorithm: description and initial results. Journal of the Remote Sensing Society of Japan. 2009. № 29 (1). P. 307–317.

6. Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 Algorithms. Japan Aerospace Exploration Agency Earth Observation Research Center, 2013. URL: http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/data/doc/NDX-120015A.pdf.

7. Wang J., Tedesco M. Identification of atmospheric influences on the estimation of snow water equivalent from AMSR-E measurements // Remote Sensing of Environment. 2007. № 111 (2–3). P. 398–408.

УДК 551.507.362.2: 504.3.054

Л.Г. Свердлик

Научная станция РАН в Бишкеке, Киргизская Республика
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ НАД СЕВЕРНЫМ ТЯНЬ-ШАНЕМ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Проанализированы результаты многолетних спутниковых измерений (*MODIS/EOS Aqua&Terra*) аэрозольной оптической толщи (*AOD*), восстановленные с применением алгоритмов *Dark Target* и *Deep Blue* над северным Тянь-Шанем. Проведена оценка точности спутниковых данных путем сопоставления с результатами наземных наблюдений (*AERONET*), выделены структурные составляющие временных рядов *AOD* (2001–2016 гг.).

Ключевые слова: аэрозоль, спутниковые измерения, оптическая толща, AERONET, сезонные изменения, тренд, «Кумтор».

Введение. Одной из важных задач современных измерений в атмосфере, направленных на получение информации о качестве воздуха, источниках загрязнения и количественных оценках радиационного воздействия на климат [1], является исследование трансформации во времени оптических свойств аэрозоля [2–5]. Как средство глобального мониторинга изменчивости характеристик аэрозоля, в первую очередь его оптической толщи (*AOD*), в экологических и климатических исследованиях все более широко применяется дистанционное зондирование с помощью орбитальных обсерваторий. В последние годы с использованием спутниковых наблюдений выполнены многочисленные исследования изменчивости свойств аэрозоля, однако на уровне региональных данных этот вопрос в полной мере не изучен [3]. В настоящей работе рассмотрен мето-

© Свердлик Л.Г., 2018

дический подход к анализу многолетних спутниковых данных, который включает оценку погрешности восстановления значений аэрозольной оптической толщи, и результаты выделения структурных составляющих долговременных временных рядов *AOD* (в первую очередь, сезонного цикла и тренда).

Регион исследования, спутниковые и наземные данные *AOD*. Проанализированы результаты спутниковых измерений *AOD*, полученные в пределах участка с координатами: 41.5–43.0 °N; 76.5–78.0 °E (рисунок 1). Выбор этого региона определили два обстоятельства. Во-первых, здесь расположена станция «Иссык-Куль», входящая в состав глобальной Сети *AERONET*, на которой получены данные о свойствах атмосферного аэрозоля с августа 2007 г. по ноябрь 2016 г. Во-вторых, нахождением в этом регионе крупного рудника по добыче золота «Кумтор» (*Centerra Gold Inc.*), работы на котором будут продолжаться до 2026 г., что потенциально может оказывать негативное воздействие на состояние атмосферы и ледников.

Для анализа были построены временные ряды среднемесячных значений *AOD* на длине волны λ=550 нм по данным измерений (2001–2016 гг.) спектрометрами *MODIS*, установленными на спутниках Terra и Aqua ($MODIS_{(T)}$ и $MODIS_{(A)}$) [6]. Значения *AOD* были получены на основе файлов MOD08_M3 и MYD08_M3 коллекции 6 с применением алгоритмов *Dark Target* (*DT*) и *Combined Dark Target and Deep Blue (DT/DB)*. Таким образом, были сформированы четыре набора данных: $AOD_{MODIS(T)DT}$, $AOD_{MODIS(T)DT/DB}$, $AOD_{MODIS(A)DT}$ и $AOD_{MODIS(A)DT/DB}$.

Рис. 1. Исследуемая область и участок, выделенный
для сопоставления наземных и спутниковых данных

Среднемесячные значения $AOD_{AERONET}$ отвечали требованиям Уровня 2.0 (*Level* 2.0) [7] с погрешностью измерений ±0,01 [5]. Динамика среднемесячных значений $AOD_{MODIS(T)DT}$ и $AOD_{MODIS(A)DT}$ и $AOD_{AERONET}$ в 2009–2015 гг. показана на рис. 2.

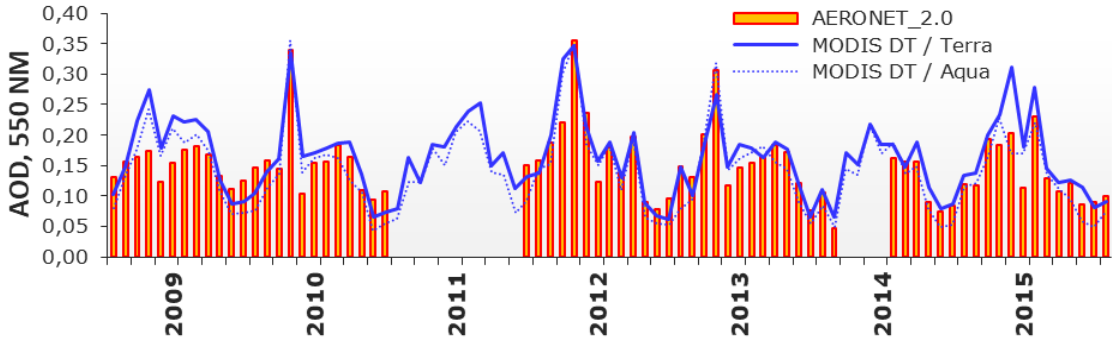


Рис. 2. Динамика среднемесячных значений AODMODIS(T)DT, AODMODIS(A)DT
и AODAERONET (Level 2.0), измеренных в 2009–2015 гг.

Оценка точности спутниковых измерений *AOD.* Анализ соответствия спутниковой информации и результатов наземных измерений проводился путем сравнения средних за месяц значений *AOD*, полученных приборами *MODIS* (*Terra* и *Aqua*) и *CIMEL* (*AERONET*) после приведения значений *AOD* к общей длине волны. Оценка методической погрешности спутниковых измерений *AOD* производилась в соответствии с известным выражением [2], представляющим сумму абсолютной (0,05) и относительной (15 %) ошибки. Дополнительно были также вычислены среднеквадратичная ошибка (*RMSE*) и средняя абсолютная ошибка (*MAE*) между результатами спутниковых измерений и наблюдениями *AERONET* в 2009–2015 гг. [8]. Сравнение результатов спутниковых наземных измерений *AOD* в видимой области спектра (λ = 550 нм) показало, что различие между двумя приборами *MODIS* (*Terra* и *Aqua*) было не значительным и может считаться вполне приемлемым для практического использования (Таблица). Практически все значения (94.7–100 %) рассматриваемых наборов среднемесячных данных *MODIS* лежат в пределах величины $\pm(0{,}05 + 0{,}15*AOD_{AERONET})$, а коэффициенты взаимной корреляции между данными *MODIS* и *AERONET* составляли R=0.85–0.90 (R^2 = 0,73–0,80). При средних значениях 0,150 ± 0,056 и 0,162 ± 0,066 наземных и спутниковых данных (n = 70), соответственно, абсолютная погрешность $AOD_{MODIS(T)DT}$ составила 0,034, а среднеквадратичное отклонение 0,002.

Таблица

Средние значения *AOD*, параметры линейных уравнений ($y = a + b \cdot x$),
коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R^2), *RMSE* и средняя абсолютная ошибка (*MAE*)
между значениями AOD_{MODIS} и $AOD_{AERONET}$ в 2009–2015 гг.

MODIS /*Time Series*/	*AOD*	*EE*	*Linear regression parameter*				*RMSE*	*MAE*
	Mean±SD	%	*a*	*b*	*R*	R^2		
EOS Terra (MOD08_M3 v6)								
Dark Target (DT)	0,162±0,066	94,7	0,01	1,04	0,87	0,76	0,002	0,034
Combined DT+DB	0,162±0,066	94,7	0,01	1,01	0,85	0,73	0,002	0,034
EOS Aqua (MYD08_M3 v6)								
Dark Target (DT)	0,140±0,070	100	–0,03	1,11	0,90	0,80	0,001	0,027
Combined DT+DB	0,138±0,066	100	–0,02	1,03	0,88	0,77	0,001	0,026

Данные $MODIS_{(A)DT}$ показали несколько более высокую корреляцию (R = 0,90) с измерениями *AERONET*, соответственно, их можно считать более предпочтительными. Диапазон изменений многолетних среднемесячных значений *MODIS AOD* ($MODIS_{(T)DT}$, $MODIS_{(A)DT}$, $MODIS_{(T)DT/DB}$ и $MODIS_{(A)DT/DB}$) находился в пределах 0,06–1,3, 0,20–1,64, 0,05–1,07 и 0,06–1,53, соответственно, что указывает на некоторую переоценку $AOD_{MODIS(T)}$ и недооценку $AOD_{MODIS(A)}$ относительно значений $AOD_{AERONET}$ (0,18–1,36).

Таким образом, использование комбинированного алгоритма *(DT/DB)* не приводит к улучшению корреляции. В тоже время, очевидно, что спутниковые измерения *AOD* показали хорошие результаты, предоставляя достаточно точные значения, что позволяет проводить анализ трендовых составляющих многолетних временных рядов.

Анализ структурных составляющих временных рядов *MODIS AOD.* Анализ временного ряда среднемесячных $AOD_{MODIS(T)DT}$ охватывает период с 2001 по 2016 г. В пределах этого интервала времени производилась оценка линейного тренда аэрозольной оптической толщи. Поскольку исходный **ряд** $AOD_{MODIS(T)DT}$ содержит явно выраженную периодически повторяющуюся сезонную компоненту, была определена усредненная кривая *AOD* (рис. 3), которая характеризовалась максимумом в апреле (0,239 ± 0,056) и минимумом в декабре (0,072 ± 0,024).

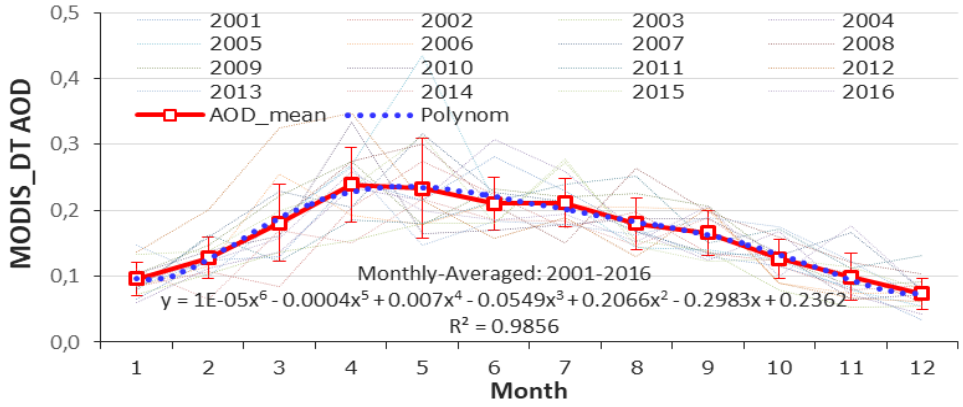


Рис. 3. Многолетние значения и среднее распределение AODMODIS(T)DT (2001–2016 гг.)

Для более корректной оценки тренда **была выполнена корректировка годовых циклов путем** вычитания (аддитивная модель) полиномиальной кривой. Модифицированные временные ряды $AOD_{MODIS(T)DT}$, включающие нерегулярные компоненты, послужили для определения тренда. В целом скорректированный временной ряд $AOD_{MODIS(T)DT}$ (рисунок 4) характеризовался положительным трендом (+3,30 % в год) в период с 2001 по 2008 гг., который в 2008–2016 гг. сменился отрицательной динамикой (–1,37 % в год). Такая особенность поведения *AOD* определялась активной эмиссией пыли в 2007–2008 гг. [3] в пустынях Китая и Монголии. Отрицательный тренд оптической толщи в 2008–2016 гг. связан с уменьшением в атмосфере относительного вклада крупных частиц пылевого аэрозоля [4]. Общая небольшая положительная тенденция с 2001 по 2016 г. составляла +0,56 % в год.

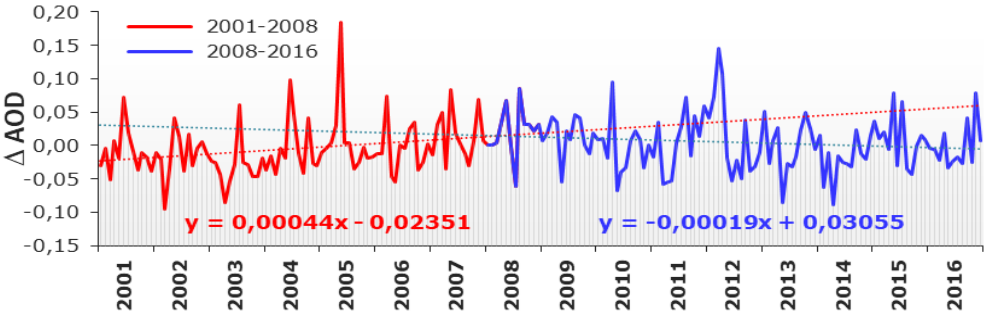


Рис. 4. Модифицированный временной ряд среднемесячных значений AODMODIS(T)DT. Оценки линейных трендов в периоды 2001–2008 и 2008–2016 гг.

Заключение. Шестнадцатилетний ряд (2001–2016 гг.) аэрозольной оптической толщи, сформированный по данным спутниковых наблюдений (*MODIS*) был проанализирован с целью исследования тенденций временной изменчивости аэрозольной нагрузки атмосферы. Сравнение с результатами наземных измерений (*AERONET*) показала хорошее согласие с коэффициентами корреляции R = 0,85–0,90. При этом не менее 95 % AOD_{MODIS} находилось в пределах методической погрешности спутникового метода. Временные серии среднемесячных значений $AOD_{MODIS(T)DT}$ с 2001 по 2008 гг. показали положительную динамику аэрозольной нагрузки атмосферы (+3,30 % в год) и отрицательную тенденцию (–1,37 % в год) в период 2008–2016 гг. Общее увеличение $AOD_{MODIS(T)DT}$ за период исследования с 2001 по 2016 г. составляло ~9 %.

Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC за обеспечение свободного доступа к данным.

Список литературы

1. Свердлик Л.Г. Аэрозольное воздействие на перенос радиации и дистанционное лазерное зондирование оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля. Вестник КРСУ. 2005. Т. 5, № 7. С. 105.

2. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean / R.C. Levy, S. Mattoo, L.A. Munchak [et al.] // Atmos. Meas. Tech. 2013. № 6. P. 2989–3034.

3. Свердлик Л.Г. Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над Северным Тянь-Шанем // Наука, новые технологии и инновации. 2016. № 3. С. 3–9.

4. Свердлик Л.Г. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля. Наука, новые технологии и инновации. 2014. № 4. С. 26–31.

5. Свердлик Л.Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET). Наука, новые технологии и инновации. 2013. № 3. С. 3–7.

6. URL: http://giovanni.gsfc.nasa.gov/.

7. URL: http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/.

8. Intercomparison of MODIS, MISR, OMI, and CALIPSO aerosol optical depth retrievals for four locations on the Indo-Gangetic plains and validation against AERONET data / H. Bibi, K. Alam, F. Chishtie [et al.] // Atmospheric Environment. 2015. № 111. P. 113–126.

УДК 528.88

Б.В. Содномов, А.А. Аюржанаев, Б.З. Цыдыпов, Е.Ж. Гармаев

Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия
e-mail: sodnomov@binm.ru

АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ВНУТРИГОДОВОЙ ДИНАМИКИ NDVI ДЛЯ ОЦЕНКИ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

С фундаментальной и прикладной точек зрения сроки наступления фенологических явлений имеют большое значение для анализа последствий изменения климата. Выбраны полигоны с различными типами лесной растительности. Для аппроксимации сезонного хода NDVI использованы двойная логистическая функция и полином четвертой степени. Выявлено различие фенологических параметров для разных типов лесов, для них получены значения начала и конца вегетации, скорости роста и падения NDVI.

Ключевые слова: лесная растительность, NDVI, вегетационный период, фенология, критерий Стьюдента, двойная логистическая функция.

Использование данных дистанционного зондирования Земли является важным элементом мониторинга состояния растительного покрова. Накопленные к настоящему времени данные спутниковой информации позволяют оценивать не только текущее состояние растительности, но и проследить ее динамику за значительный период.

Обеспокоенность вызывает состояние лесного фонда Республики Бурятии, в которой общая площадь земель, занятых лесами, равна 290 тыс. км^2 (84,7 % от общей земельной площади республики). Климатические изменения в Байкальском регионе отражаются в затянувшемся периоде засухи, который привел к катастрофическим лесным пожарам в 2015 г.

© Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., 2018

Одним из индикаторов влияния изменения климата на растительность является смещение фенологических событий, для оценки которых используют как наземные сети наблюдения, так и методы дистанционного зондирования Земли. Способы определения фенологических параметров с помощью спутниковой информации заключаются в использовании различных аналитических функций для аппроксимации сезонного хода вегетационных индексов (ВИ). Существуют различные подходы для определения начала и конца вегетационного периода. Например: 1) по достижении ВИ экспериментально выявленного порогового значения; 2) поиск точек с максимальным ускорением роста или спада по нулям функции второй производной [1].

Целью работы является определение фенологических параметров различных типов лесной растительности Байкальского региона на основе анализа внутригодовой динамики NDVI.

В работе использованы данные MODIS с 2000 по 2017 г. – 16-дневные композиты NDVI (23 композита в году) с разрешением 250 м, продукт MOD13Q1. Значения NDVI вне фазы вегетационного периода приняты равными 0. Для исследования выбраны полигоны с различными типами лесной растительности (табл. 1). С использованием *t*-критерия Стьюдента внутри каждого полигона выбраны пиксели с равными средними значениями NDVI за весь период наблюдений, которые участвовали в дальнейшем анализе.

Для аппроксимации сезонного хода NDVI использованы двойная логистическая функция (ДЛФ) и полином четвертой степени. ДЛФ впервые была предложена в [2] и часто применяется при анализе внутригодовой динамики ВИ [3–5].

Таблица 1

Полигоны исследования

Название полигона	Координаты	Тип леса	Количество пикселей	Площадь полигона, км^2
Степнодворецкое лесничество 1	N 52°06'49.05" E 106°20'55.94"	Светлохвойный	6×7	2,4
Хамар-Дабан	N 51°34'17.24" E 105°23'31.70"	Темнохвойный	15×15	10,7
Верхняя Березовка	N 51°53'37.27" E 107°38'17.85"	Сосновый подрост	2×3	0,2
Степнодворецкое лесничество 2	N 52°05'22.20" E 106°20'40.80"	Смешанный	6×6	1,3
Шергино	N 52°11'10.43" E 106°57'01.32"	Лиственный	5×14	2,8

Функция имеет шесть коэффициентов, которые обозначают ключевые фенологические параметры, определяемые посредством ВИ: минимальное (зимнее) и максимальное годовые значения (*wNDVI* и *mNDVI*, соответственно), дата (*S*) и скорость (*mS*) максимального роста (номинальное начало вегетационного сезона), дата (*A*) и скорость (*mA*) максимального падения (номинальный конец вегетационного сезона):

$$NDVI(t) = wNDVI + (mNDVI - wNDVI) \times$$
$$\times \left(\frac{1}{1 + \exp\left(-mS \times (t - S)\right)} + \frac{1}{1 + \exp\left(mS \times (t - A)\right)} - 1 \right).$$

Первая и вторая производные полинома четвертой степени имеют три значимых точки экстремума, каждая из которых приурочена к изменениям фенологического состояния растительности: достижение максимального значения, а также даты начала роста NDVI весной и падения осенью. Функция представляется следующей формулой:

$$NDVI(t) = a(1) \cdot t^4 + a(2) \cdot t^3 + a(3) \cdot t^2 + a(4) \cdot t + a(5).$$

Пример аппроксимации внутригодовой динамики NDVI полиномом четвертой степени и ДЛФ представлен на рисунке.

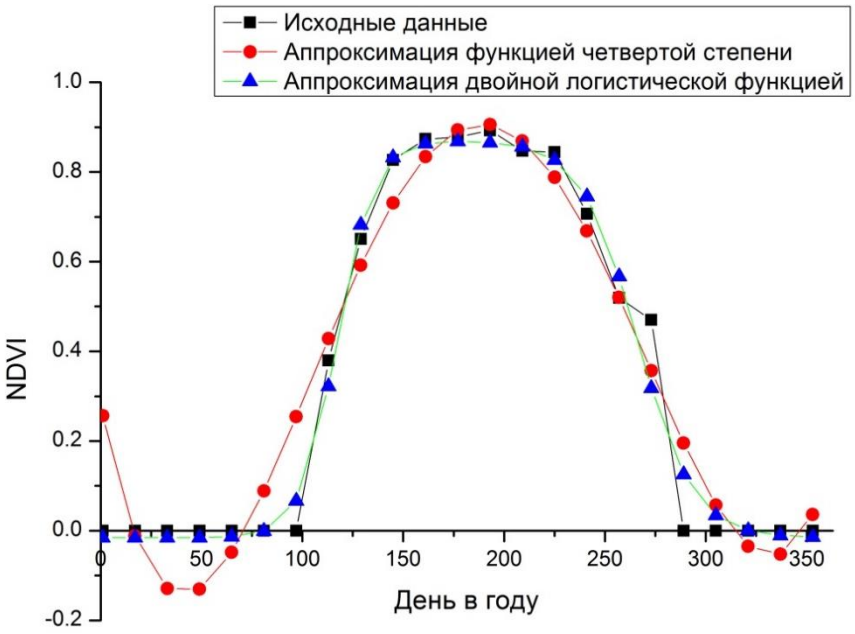


Рисунок. Аппроксимация внутригодовой динамики NDVI

Анализ остатков выявил, что наилучшее приближение к исходным данным обеспечивает ДЛФ. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только коэффициенты для ДЛФ. В табл. 2 приведены фенологические параметры для тестовых полигонов.

Таблица 2

Фенологические параметры для тестовых полигонов

Параметр	Степнодворецкое лесничество 1 (светлохвойный лес)	Хамар-Дабан (темнохвойный лес)	Верхняя Березовка (сосновый подрост)	Степнодворецкое лесничество 2 (смешанный лес)	Шергино (лиственный лес)
День максимального роста NDVI	93	104	106	99	121
Скорость максимального роста NDVI	0,26	0,19	0,13	0,15	0,06
Максимальное годовое значение NDVI	0,73	0,82	0,60	0,77	0,88
День максимального падения NDVI	296	293	285	292	274
Скорость максимального падения NDVI	0,36	0,31	0,20	0,23	0,06

Средние по участку значения фенологических параметров сравнивались между полигонами по *t*-критерию. Выявлено различие фенологических параметров для различных типов лесов. Параметры для лиственного леса существенно отличаются от остальных полигонов: максимальное годовое значение и день максимального роста NDVI являются наибольшими, день и скорость максимального падения NDVI – минимальными. При этом, согласно t-критерию, все коэффициенты для лиственного леса отличимы от фенологии остальных полигонов. Наименьшая дата максимального роста и, соответственно, наиболее раннее начало вегетации относятся к светлохвойному лесу. Для него также отмечается наибольшая скорость падения и роста NDVI. День максимального падения NDVI для светлохвойного, темнохвойного и смешанного леса совпадает. Дни начала вегетации для соснового подроста и темнохвойного леса совпадают.

Средние значения скоростей максимального падения и роста NDVI признаны равными для соснового подроста и смешанного леса.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке научных проектов РФФИ № 17-05-01059 и в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН.

Список литературы

1. Фенологические флуктуации степных сообществ Забайкалья / А.А. Аюржанаев, Б.В. Содномов, Ж.Б. Алымбаева [и др.] // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV междунар. науч. конф. (Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. С. 187–190.

2. Fischer A.A simple model for the temporal variations of NDVI at regional scale over agricultural countries. Validation with ground radiometric measurements // International Journal of Remote Sensing. 1994. № 15. P. 1421–1446. DOI: 10.1080/01431169408954175.

3. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI / P.S.A. Beck, C. Atzberger, K.A. Hogda [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2006. № 100. P. 321–334. DOI:10.1016/j.rse.2005.10.021.

4. Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region / L. Busetto, R. Colombo, M. Migliavacca [et al.] // Global Change Biology. 2010. № 16. P. 2504–2517.

5. Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa / B. Butt, W.D. Turner, A. Singh, L. Brottem // Remote Sensing of Environment. 2011. № 115. P. 3367–3376.

УДК 528.8.04, 528.88, 502.4

С.Р. Тадырова, Е.Н. Кулик

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: tadyrova1995@mail.ru, e.n.kulik@ssga.ru

РОЛЬ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

Рассмотрена роль космического мониторинга при комплексной оценке особо охраняемых природных территорий Республики Алтай, а также воздействие антропогенных факторов на окружающую среду.

Ключевые слова: космический мониторинг, особо охраняемые природные территории, Республика Алтай, дистанционное зондирование, растительность, животный мир.

Космический мониторинг дает возможность эффективно обнаруживать источники и вид изменений окружающей среды, отслеживать интенсивность процессов и амплитуды экологических сдвигов, исследовать взаимодействие техногенных систем.

Республика Алтай – западный край мощного пояса гор юга Сибири, поднятый в виде огромного свода на высоту местами более 4 000 м над уровнем моря. Среди форм рельефа, развитых в различных высотных поясах, значительное место занимают

© Тадырова С.Р., Кулик Е.Н., 2018

карстовые формы, особенно пещеры, интересные с палеонтологической и археологической точек зрения, как объекты туризма. Экосистемы некоторых пещер весьма уязвимы, поэтому некоторые из них уже объявлены государственными памятниками природы.

Основная водная артерия Горного Алтая – река Катунь. В нее впадает более 600 притоков, несущих ледниковые и снеговые воды с разных хребтов. К крупным рекам относятся также Бия, Ануй, Песчаная, Чарыш, Башкаус, Чуя, Аргут, Чулышман, протекающие в северном и северо-западном направлениях и вместе с притоками образующие разветвленную гидрографическую сеть.

На территории Горного Алтая насчитывается около 7 тысяч озер, что позволяет называть его «страной голубых озер». Их общая площадь превышает 600 км^2. Преобладают малые озера, которые придают неповторимую живописность горным ландшафтам. Самый крупный водоем – Телецкое озеро, расположенное на высоте 434 м над уровнем моря, среди высоких горных хребтов северо-востока республики. Телецкое озеро – «маленький Байкал» – одно из глубочайших озер России, вмещающее 40 км^3 чистой пресной воды. Максимальная глубина его – 325 м.

Животный мир Республики Алтай отличается необычным богатством и разнообразием. На Алтае сохранился целый комплекс видов животных, редких и исчезающих в других регионах.

Главным богатством Республики Алтай является лес, который покрывает большинство ее площади и состоит в основном из хвойных пород. На распространение лесов по административным районам Республики Алтай оказывают влияние особенности климата, рельефа и почв.

Экологические наблюдения мониторинга в Республике Алтай проводятся многими организациями различной ведомственной принадлежности и местонахождения. Мониторинг – это не только наблюдение за действием или явлением, но и оценка, прогноз распространения и развития, а помимо этого – исследование системы мер по устранению опасных последствий. В республике проводятся такие мониторинги, как:

- традиционный мониторинг сельскохозяйственных земель (ФГУ Станция агрохимической службы «Горно-Алтайская»);
- санитарно-гигиенический мониторинг (ТУ Роспотребнадзора по Республике Алтай);
- государственный мониторинг геологической среды (ТЦ «Алтайгеомониторинг»);
- мониторинг животного мира (Комитет по охране, использованию и воспроизводству объектов животного мира Республики Алтай);
- лесной мониторинг (лесничества Министерства лесного хозяйства Республики Алтай);
- другие виды ведомственного мониторинга.

Кроме перечисленного, с 2011 г. проводились различные виды специализированного и локального мониторинга, в частности:

- государственный мониторинг поверхностных водных объектов (Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды);
- эколого-гигиенический мониторинг окружающей среды в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей (Институт водных и экологических проблем СО РАН с участием автономного учреждения Республики Алтай «Алтайский региональный институт экологии»);
- мониторинг окружающей среды в районе ОАО «Рудник «Веселый», Телецкого озера (Автономное учреждение Республики Алтай «Алтайский региональный институт экологии»);
- мониторинг стоков промышленных предприятий (ТУ Роспотребнадзора по Республике Алтай) и пр.

Для оценки состояния особых территорий целесообразно привлекать материалы дистанционного зондирования, полученные в результате съемки с летательных воздушных и космических аппаратов, судов и подводных лодок, наземных станций. Получаемые документы могут отличаться по масштабу, разрешению, геометрическими, спектральными и иными свойствами – это зависит от вида и высоты съемки, применяемой аппаратуры, а также от природных особенностей местности, атмосферных условий и т.п.

Основные качества дистанционных изображений, в особенности важные при составлении карт – это их высокая детальность, одновременный охват обширных пространств, вероятность получения повторных снимков и исследования труднодоступных территорий. Аэро- и космические снимки используются для составления и обновления общегеографических, топографических и тематических карт, картографирования малоизученных районов.

К основным достоинствам аэрокосмических материалов и цифровых данных, полученных в ходе дистанционного зондирования относят большую обзорность и быстроту получения. Регистрация информации о территории производится в один момент времени и в одинаковых физических условиях. Главное преимущество – это фиксирование состояния объектов в различные моменты времени. Эффективное слежение и наблюдение за состоянием окружающей среды по материалам дистанционного зондирования и геопространственным данным называют аэрокосмическим мониторингом.

Оперативное картографирование становится средством контролирования за формированием явлений и процессов и гарантирует обеспечение информационной поддержки при формировании управленческих выводов.

Заключение. Географические исследования особо охраняемых природных территорийв современных условиях должны опираться на данные дистанционного зондирования Земли. В последнее время космическая съемка заняла прочное место в системе средств, применяемых при проведении мониторинга окружающей среды и особо охраняемых природных объектов в частности. Давно и неоднократно было доказано, что использование оперативной глобальной космической информации позволяет успешно осуществлять мониторинг как быстро протекающих (пожары, наводнения и т.п.), так и протекающих достаточно медленно процессов (зарастание вырубок и гарей, пересыхание водоемов и т.п.), охватывающих большие территории.

Список литературы

1. Мир заповедной культуры Алтая: учебное пособие для 8-9 классов основной ступени общеобразовательной школы / Э.П. Дворников, И.А. Жерносенко, Д.И. Мамыев, Л.Н. Мукаева. Горно-Алтайск, Барнаул: АRТИКА, 2009. 214 с.

2. Донцов А.А., Волков Н.В., Лагутин А.А. Региональная геоинформационная система оперативного космического мониторинга // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия «Техника и технологии». Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. № 8. Вып. 6. С. 763–768.

3. Оперативный мониторинг структурных изменений изображений объектов на космических снимках земной поверхности / И.Н. Кандоба, Е.А. Бровко, Ф.А. Корнилов, Д.С. Перевалов // Программные продукты и системы. М., 2015. № 1 (109). С. 79–86.

4. Михайлов В.В., Умывакин В.М., Швец А.В. Мониторинг качества окружающей среды на основе интегральной оценки экологической опасности территорий природно-хозяйственных геообъектов // Материалы XV междунар. науч.-метод. Конф. «Информатика: проблемы, методология, технологии», Воронеж, 12–13 февраля 2015 г. Воронеж: Воронежский ГУ, 2015. С. 51–56.

5. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Аэросъемка, фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие. М.: МГУПС (МИИТ), 2015. 83 с.

6. Савиных В.П., Цветков В.Я. Особенности интеграции геоинформационных технологий и технологий обработки данных дистанционного зондирования // Информационные технологии. 1999. № 10. С. 36–40.

7. Трясунова А.А. Особо охраняемые природные территории и их роль в устойчивом развитии региона (на примере ООПТ Республики Алтай) // Материалы II междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 100-летию единения России и Тувы: «Актуальные проблемы исследования этноэкологических и этнокультурных традиций народов Саяно-Алтая», Кызыл, 26–30 июня 2014 г. Кызыл: ФГБОУ ВПО «Тувинский государственный университет», 2014. С. 142–143.

УДК 551.51, 681.785.4

И.Д. Ткачев, Р.В. Васильев, С.В. Подлесный

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail: tid007@iszf.irk.ru, roman_vasilyev@iszf.irk.ru,
mikhalev@iszf.irk.ru, step8907@mail.ru

КОНТРОЛЬ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПЗС КАМЕРЫ

Проведено исследование статистических характеристик быстрых вариаций оптического фонового излучения ночной атмосферы. Предложен механизм разделения в статистических характеристиках регистрируемого сигнала эффектов от мерцания звезд и вариаций фонового оптического излучения ночной атмосферы. Разработан алгоритм для автоматического мониторинга погодных условий во время наблюдений.

Ключевые слова: ПЗС камера, атмосфера Земли, быстрые оптические события, алгоритм вырезания звезд, прозрачность атмосферы.

Введение. Информация о различных свойствах верхней атмосферы Земли, а также всех объектах астрофизических исследований может быть получена на основе оптических методов наблюдения. Среди многих технических решений для обнаружения слабого светового излучения верхней атмосферы существует четыре основных типа используемого оборудования: спектрографы, спектрометры, фотометры и интерферометры [1; 2]. Для изучения морфологии быстрых оптических событий, определения типа события (спутник, метеор, молниевый разряд и т.д.) часто используются камеры на основе ПЗС матрицы. Небольшое время экспозиции ПЗС камеры (~500-1000мс) приводит к тому, что за одну ночь наблюдений накапливается ~30000 кадров. В тоже время, образующаяся облачность меняет прозрачность атмосферы, и регистрация быстрых оптических событий становится невозможной. Поэтому, для выделения «полезеных» временных отрезков в рядах получаемых данных, необходимы алгоритмы и методы, позволяющие вести контроль прозрачности атмосферы.

Методы и алгоритмы

Алгоритм устранения влияния мерцаний звезд. Начало данной работы положило исследование быстрых оптических событий, описанное в [3]. Там представлены алгоритмы регистрации и фильтрации таких событий. Рассматривается вопрос о верификации полученных данных. Для этого проводится оценка степени влияния случайных вариаций интенсивности на регистрацию вспышек с помощью моделирования экспериментальных данных нормальным шумом. В результате проведенного моделирования было определено, что вариации интегральной интенсивности не могут быть описаны нормальным законом распре-

© Ткачев И.Д., Васильев Р.В., Подлесный С.В., 2018

деления вследствие влияния мерцания звезд в кадре [4; 5]. Поэтому был разработан алгоритм вырезания звезд. В виде схемы, он представлен на рис. 1.

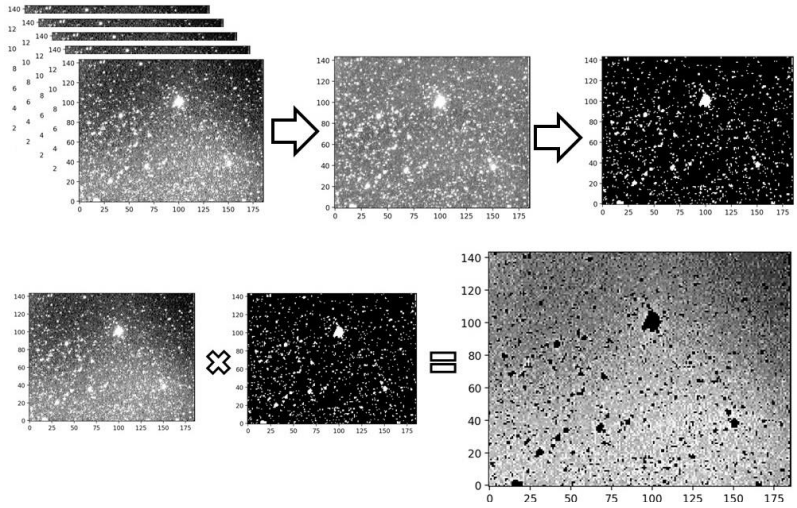


Рис. 1. Схема алгоритма вырезания звезд

Алгоритм работает следующим образом:

1. Выбирается интервал времени (15–20 с). Производится суммирование кадров в этом промежутке. Количество кадров подбирается так, чтобы звезды не успели сместиться за этот промежуток времени.

2. К суммарному кадру применяется медианный фильтр с таким ядром, чтобы шум на картинке стал равномерным.

3. Суммарный кадр делится на кадр, к которому использован медианный фильтр.

4. Из получившегося разностного кадра делается маска.

5. Маска умножается на серединный кадр из выбранного интервала времени.

На рис. 2 приведен пример временного ряда данных содержащего вариации, обусловленные мерцанием звезд и без них. Видно, что после обработки новым алгоритмом, распределение разностной интенсивности становится близким к нормальному, что и ожидалось увидеть. В дальнейшем планируется развивать этот алгоритм для первоначальной обработки данных, и построения временных рядов интегральной интенсивности ПЗС-фотометра, а после выделять вспышки потенциально интересные для исследования из [3].

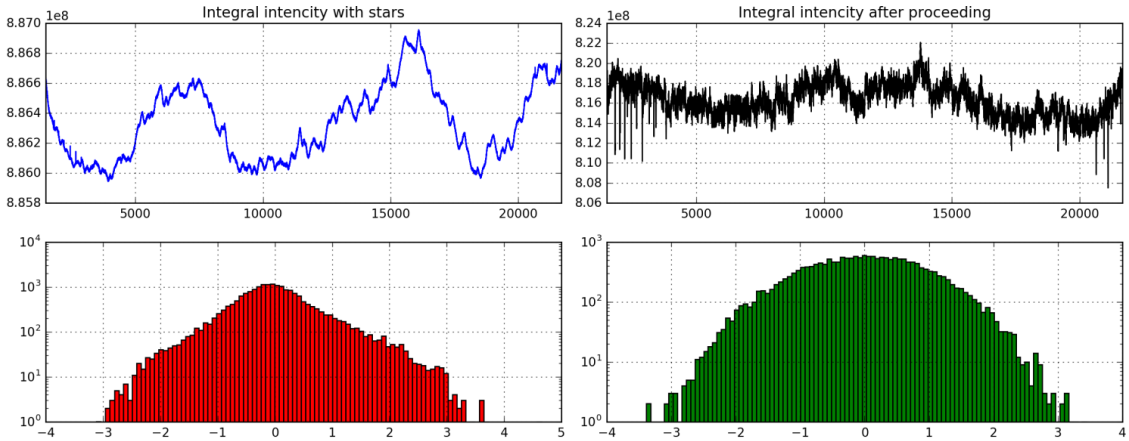


Рис. 2. Результат работы алгоритма вырезания звезд. Верхняя панель – интегральная интенсивность со звездами (слева), без звезд (справа). Нижняя панель – распределение коэффициента K [3] со звездами (слева), без звезд (справа)

Контроль условий наблюдений. Одним из вариантов решения проблемы может быть применение нейросетей для выделения разных типов объектов (спутников, облаков, лунной засветки и т.д.) в кадрах фотометра. Однако на большом массиве данных

(при экспозиции в 1с ~ 30 000 кадров для зимней ночи) для этого потребуются значительные вычислительные мощности, поэтому было проведено исследование вариаций некоторых статистических характеристик изображений для возможности контроля условий наблюдения. Рассматривая вариации количества удалённых пикселов Np в алгоритме устранения влияния мерцаний звезд при различных погодных условиях можно показать, что этот параметр довольно чувствителен к изменениям прозрачности и степени рассеяния света в атмосфере. На рис. 4–5 приведены примеры вариаций Np для дней с различными погодными условиями.

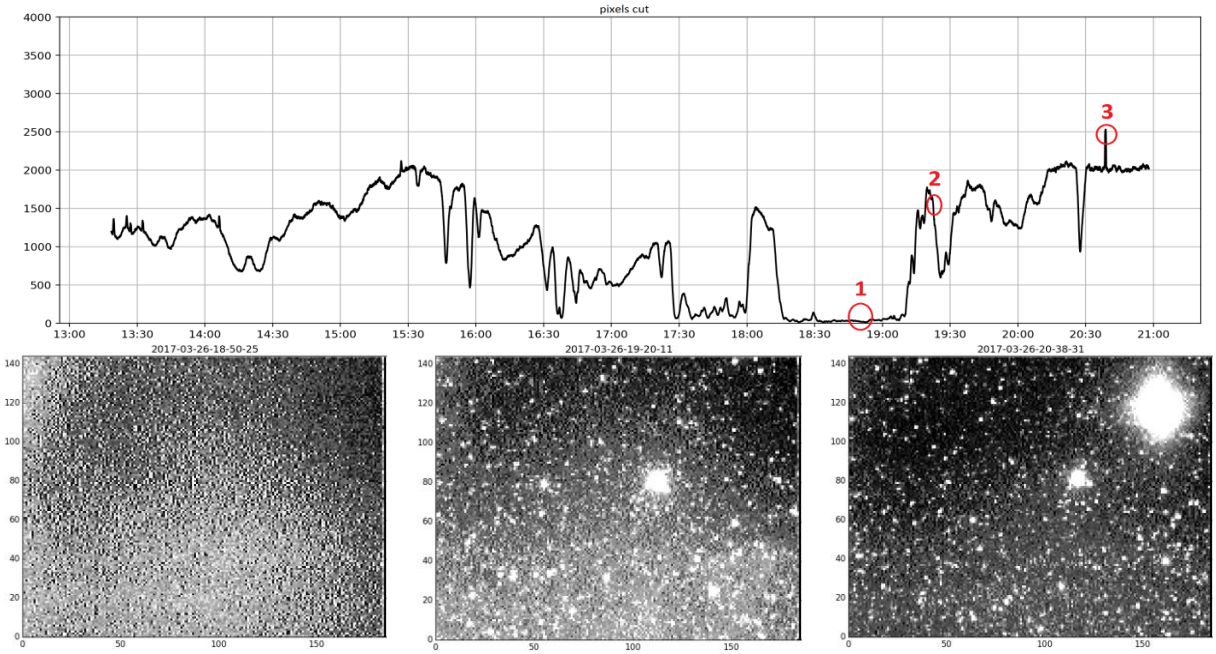


Рис. 3. Верхняя панель – изменение количества вырезанных пикселей; нижняя панель – изображения с ПЗС фотометра (для момента времени 1 (облачность) – слева, для момента времени 2 (небольшая дымка) – по центру), момент времени 3 (вспыхивающий спутник) – справа. Данные для 26.03.2017. Время UT

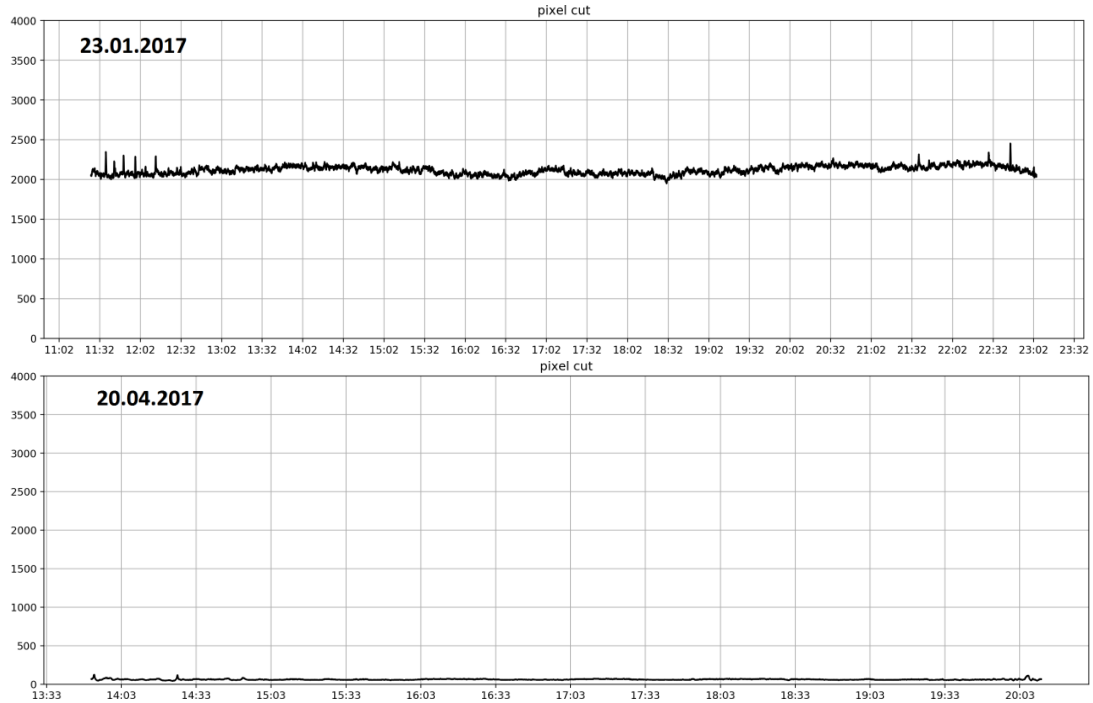


Рис. 4. Изменения количества вырезанных пикселей: верхняя панель – «чистая» ночь (нет луны и облаков); нижняя панель – сплошная облачность

Заключение. Анализируя полученные результаты можно отметить, что в чистую, безоблачную ночь вариации Np небольшие и остаются примерно на одном и том же уровне. Изменение прозрачности атмосферы (появление облачности, тумана) ведут к уменьшению Np. В ночь со сплошной облачностью Np не испытывает большую дисперсию как и для чистой ночи, но находится значительно ниже по величине чем в безоблачную ночь. Данный факт в дальнейших исследованиях будет служить критерием для автоматического отбора интервалов времени при поиске вспышек и анализе их характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00492). Результаты получены с ипользованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» http://ckp-rf.ru/ckp/3056/.

Список литературы

1. Хвостиков И.А. Свечение ночного неба. М. – Л.: Академия наук СССР, 1937. 168 с.
2. Будник А.П., Лунев В.П. Свечение ночного неба. Обнинск: Гос. науч. центр Российской Федерации – Физико-энергетический ин-т им. А.И. Лейпунского, 2008. 61.с
3. Recording optical flashes in the night atmosphere from CCD photometer / I.D. Tkachev [et al.] // Proceedings of 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. Irkutsk, 2017. DOI:10.1117/12.2288293.
4. Atmospheric intensity scintillation of stars. I. statistical distributions and temporal properties / D. Dravins [et al.] // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1997. Т. 109, № 732. С. 173.
5. Atmospheric intensity scintillation of stars. II. Dependence on optical wavelength / D. Dravins [et al.] // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1997. Т. 109, № 736. С. 725.

УДК 528.8

О.А. Томшин, В.С. Соловьев

Институт космофизических исследований и аэрономии имени Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, e-mail: tomshinoa@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО ХОДА ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Представлены результаты исследований сезонного хода природных пожаров в азиатской части России на территориях с различными типами растительности по данным дистанционного зондирования 2001–2017 гг. Показано, что усредненный сезонный ход пожаров в смешанных лесах, расположенных преимущественно южнее криолитозоны, начинается в марте и заканчивается к ноябрю с максимумом в мае. Лесопожарная активность в зоне вечной мерзлоты имеет более короткий сезонный ход – незначительный рост начинается с апреля (на южных широтах криолитозоны возникают первые очаги пожаров), резкий рост с июня до максимума в июле, к августу активность пожаров быстро спадает и плавно завершается к октябрю. Такая динамика лесных пожаров обусловлена климатическими особенностями регионов, расположенных вне (южнее) и в зоне вечной мерзлоты. На территориях с сельскохозяйственными землями характерен сезонный ход с двумя максимумами пожарной активности – весной и осенью, что вероятно обусловлено временным характером антропогенной деятельности на этих территориях.

Ключевые слова: лесные пожары, растительный покров, дистанционное зондирование.

© Томшин О.А., Соловьев В.С., 2018

Введение. Лесные пожары являются неотъемлемой частью природных процессов, выполняя экологические функции естественного обновления лесов и поддерживая баланс биоразнообразия растительного покрова. Однако в условиях усиливающегося техногенного давления на окружающую среду воздействие пожаров на лесные экосистемы и природу в целом носит негативный характер. Выгорание обширных лесных массивов ведет к радикальному изменению экосистем пострадавшего региона – преобразуется видовое разнообразие биоценоза, меняется локальный круговорот углерода и азотистых соединений, изменяется состав почвы, водный режим и пр.

В результате лесных пожаров в атмосферу выбрасывается огромное количество твердых аэрозольных частиц, окислов серы, углерода, азота и др. Особенно критичны последствия пожаров в бореальных лесах Сибири, расположенных в зоне распространения вечной мерзлоты, так как ее разрушение приводит к дополнительной инжекции в атмосферу метана и окислов углерода, содержащихся в толще вечномерзлых пород. Исследованиям крупномасштабных лесных пожаров и их влияния на аэрозольные характеристики и газовый состав атмосферы посвящен ряд публикаций (см. [1–5] и ссылки в них).

Цель работы – исследование особенностей сезонного хода природных пожаров в азиатской части России на территориях с различными типами растительности по данным дистанционного зондирования.

Данные и область исследований. Данные об очагах пожаров получены с радиометра MODIS/Terra (продукт MOD14A1 v6) за период 2001–2017 гг. Уровень пожарной активности на исследуемой области оценивался количеством «хотспотов» – аномально горячих точек (пикселей), обнаруженных на космоснимках. Данные прибора MODIS получены из открытых ресурсов университета Мэрилэнда (URL: http://modis-fire.umd.edu/pages/ActiveFire.php). В работе использованы хотспоты с высоким уровнем достоверности детектирования [6].

Для определения границ типов растительного покрова была использована карта (рис. 1), построенная по данным MODIS за 2010 г. (продукт MCD12Q1) [7]. Согласно рис. 1, в азиатской части России можно выделить 9 основных типов растительного покрова: хвойные листопадные леса, лесотундра и кустарники (Deciduous Needle leaf Forest, Woody Savannas, Open Shrublands), расположенные преимущественно в зоне многолетнемерзлых пород; хвойные вечнозеленые и смешанные леса, а также водно-болотные комплексы (Evergreen Needle leaf Forest, Mixed Forests, Permanent Wetland) расположены в западной части Сибири; земли сельскохозяйственного назначения, луга и степи (Croplands, Cropland/Natural Vegetation Mosaic, Grasslands) расположены вдоль южной границы России.

Обсуждение результатов. Рассматриваемые типы растительного покрова были разделены на две группы: природные – леса, лесотундра, кустарники и болотные комплексы, и земли сельскохозяйственного назначения, включая луга. Для каждого типа растительного покрова были построены графики вариаций медианных месячных значений количества хотспотов на 100 тыс. га за период 2001–2017 гг. (рис. 2).

Пожары в смешанных лесах имеют более продолжительный пожароопасный сезон с ранним началом (апрель) и максимумом в мае (~1,5 хотспотов на 100 тыс. га) за счет более благоприятных для возникновения и развития пожаров метеорологических условий. Последние очаги пожаров в смешанных лесах наблюдаются вплоть до ноября.

Наиболее подвержены горению хвойные листопадные леса, значительная часть которых расположена на территории Якутии в зоне вечномерзлых пород. Для них характерен непродолжительный пожароопасный сезон с максимумом в июле (~1,9 хотспотов на 100 тыс. га) вследствие высоких летних температур воздуха и низким уровнем осадков, обусловленных резко-континентальным климатом. Сезонная динамика пожаров в зоне лесотундры имеет схожий вид с пожарами в хвойных листопадных лесах.

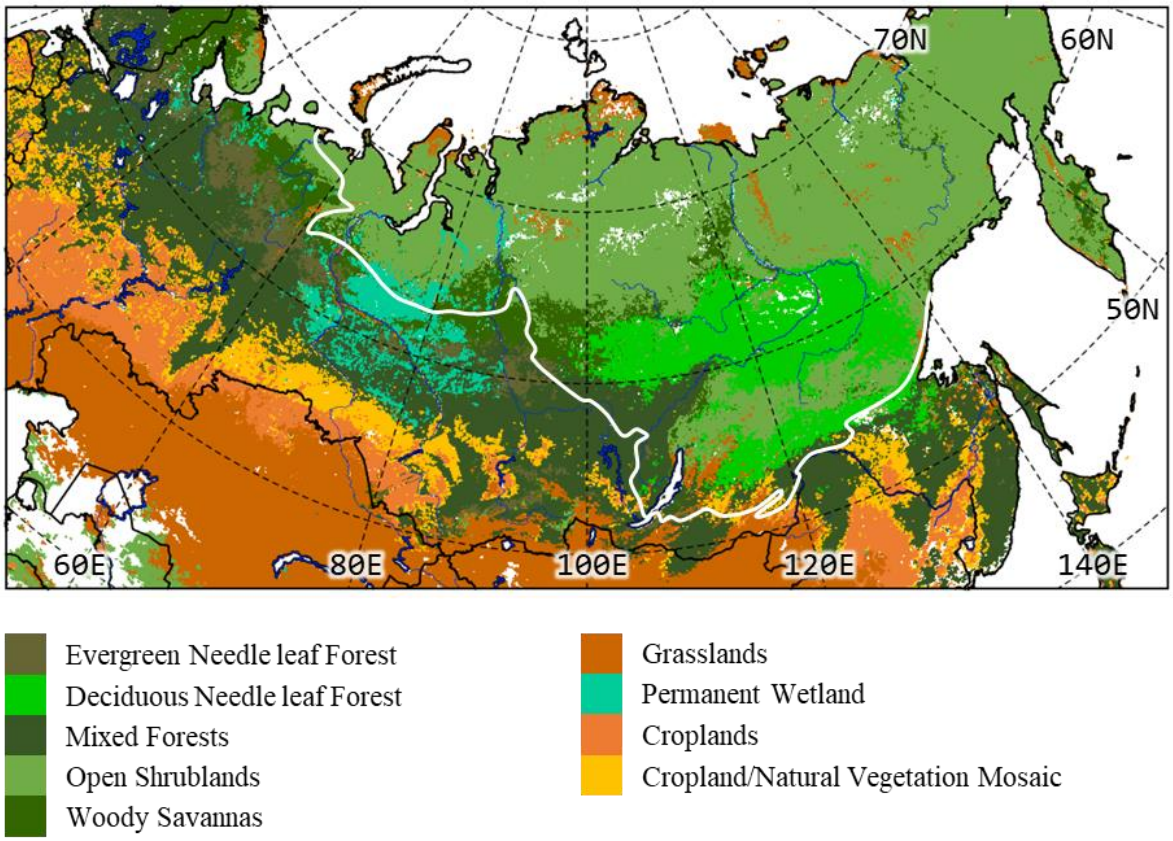
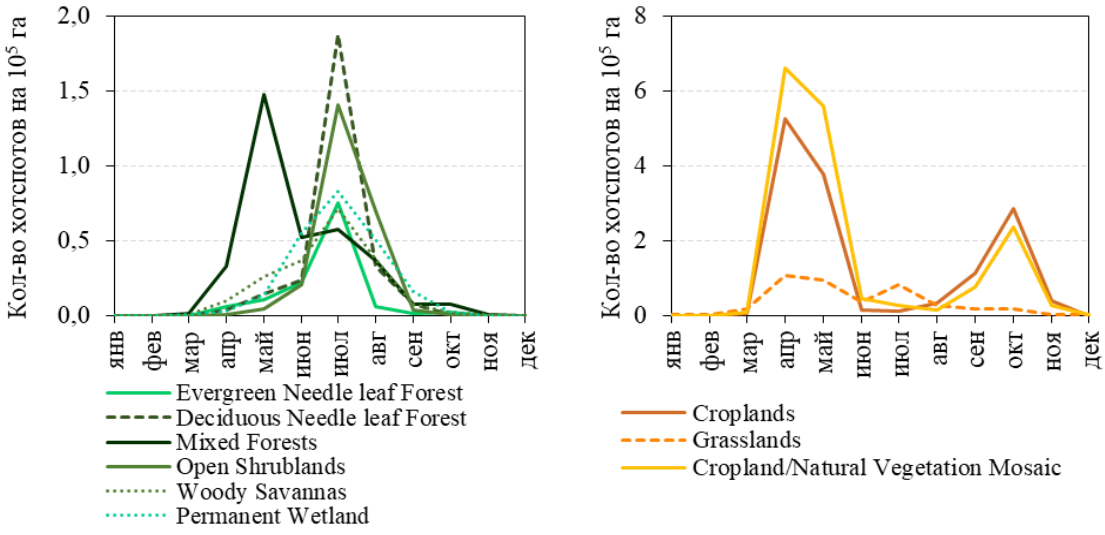


Рис. 1. Карта растительного покрова, построенная по данным MODIS (2010 г.).
Белой линией отмечена граница многолетнемерзлых пород



а *б*

Рис. 2. Сезонный ход медианных месячных значений количества хотспотов, приведенных к 100 тыс. га: *а* – в лесных, преимущественно лесных, смешанных и болотных типов растительного покрова; *б* – в землях сельхоз назначения и луговых типах растительного покрова

Вариации хотспотов на культивируемых территориях представлены на рис. 2б. Из рисунка видно, что сезонный ход имеет два периода активизации – первый приходится на апрель-май (до ~6,5 хотспотов на 100 тыс. га), в июне – августе количество хотспо-

тов минимально, второй период активизации приходится на сентябрь – ноябрь с максимумом в октябре (~2,8 хотспотов на 100 тыс. га). Такая динамика сезонного хода хотспотов обусловлена временным характером антропогенной деятельности на этих территориях и не связана с естественными природными процессами.

Заключение. Анализ полученных результатов показал, что сезонный ход лесных пожаров на территории азиатской части России начинается в апреле и заканчивается в ноябре. Однако динамика пожаров в лесах расположенных вне и в зоне вечной мерзлоты имеет заметные временные и количественные различия.

Сезонный ход пожаров в смешанных лесах более продолжителен (март – ноябрь) за счет раннего начала пожароопасного периода, с максимумом (~1,5 хотспотов на 100 тыс. га), приходящимся на май, что обусловлено более благоприятными климатическими условиями.

Наиболее сильно подвержены горению хвойные листопадные леса, расположенные в зоне вечной мерзлоты. Для них характерен непродолжительный пожароопасный сезон с максимумом в июле (~1,9 хотспотов на 100 тыс. га), обусловленным высокими летними температурами воздуха и низким уровнем осадков вследствие резко-континентального климата.

На территориях с сельскохозяйственными землями и лугами сезонный ход хотспотов имеет два максимума – весной (апрель – май) и осенью (сентябрь – ноябрь), что очевидно обусловлено временным характером антропогенной деятельности на этих территориях.

Работа выполнена при поддержке грантом главы Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов.

Список литературы

1. Влияние природных пожаров в России 1998-2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепащенко, Е.А. Ваганов [и др.] // Докл. РАН. 2011. Т. 441, № 4. С. 544-548.

2. Соловьев В.С., Козлов В.И., Муллаяров В.А. Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии / отв. ред. С.И. Соловьев. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. 108 с.

3. Томшин О.А., Протопопов А.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций атмосферного аэрозоля и угарного газа в области лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 145-150.

4. Tomshin O.A., Solovyev V.S. The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35, № 15. P. 5742–5749.

5. Томшин О.А., Соловьев В.С. Особенности лесопожарной активности в бореальных лесах мерзлотного региона Восточной Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 1. С. 261-271. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-261-271.

6. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS / L. Giglio, J. Descloitres, C.O. Justice, Y. Kaufman // Remote Sensing of Environment. 2003. № 87. P. 273–282.

7. Channan S., Collins K., Emanuel W.R. Global mosaics of the standard MODIS land cover type data. University of Maryland and the Pacific Northwest National Laboratory, College Park, Maryland, USA. 2014.

УДК 630*182.25:528.9

С.К. Фарбер, Н.С. Кузьмик, И.М. Данилин

Институт леса имени В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН,
Красноярск, Россия
e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, natalia_5791@mail.ru, danilin@ksc.krasn.ru

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАЗНООБРАЗИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО МАТЕРИАЛАМ ЛЕСОУСТРОЙСТВА

Рассмотрены возможности использования материалов лесоустройства для картографирования растительного разнообразия. На аэрокосмических снимках отображаются лесные сообщества, дешифрирование которых уже произведено в процессе выполнения лесоустроительных работ. При картографических построениях материалы лесоустройства позволяют избежать дублирования полевых и камеральных работ. Картографирование растительности наполняется новым содержанием и отвечает требованиям организации и ведения различных видов природопользования на лесных территориях.

Ключевые слова: картографирование, растительность, лесоустройство, данные ЦМР, SRTM, природопользование, лесные территории.

Введение. Лесной ландшафт можно определить как генетически единую геосистему, однородную по зональным и азональным признакам и заключающую в себя специфический набор сопряженных локальных геосистем [1]. Четкого понимания, что есть ландшафт, до сих пор нет [2]. Термин «ландшафт» можно применить не только к любым таксономическим единицам, но и в общем смысле, подобно понятиям «почва», «климат». Н. А. Солнцев [3] и др. понимают под ландшафтом единицу определенного таксономического ранга. Вместе с тем, в ландшафтоведении не выработано единого мнения относительно низшей иерархической ступени – предела дифференциации поверхности Земли. Г.Д. Рихтер [4], Н.А. Гвоздецкий, А.Г. Исаченко [4] и др. исследователи считают, что ландшафт – это район. Н. А. Солнцев [6] определяет ландшафт, дробящийся далее на морфологические части до фации. В.И. Прокаев [7], Е.Н. Калашников, Д.М. Киреев [8], В.Б. Сочава [9] характеризуют ландшафт как элементарный геомер (часть фации). Д.Л. Арманд [10] утверждает, что низшей границы ландшафтного районирования не существует. Э. Нееф [11] считает, что те понятия и определения ландшафта, которые предусматривают для него заданную характерную величину, не могут рассматриваться как объективные. Имеется принципиальное различие в понятии «комплексность» ландшафтного районирования. Н.А. Солнцев [3] и др. признают, что можно учитывать комплекс признаков. Д.Л. Арманд [10] считает, что по комплексу признаков районировать нельзя. Отсюда следуют принципиально отличающиеся подходы к вопросам районирования лесной территории. В первом случае выстраивается каркас строго соподчиненных иерархических единиц, во втором – районирование индивидуально, в соответствии с целями решаемых задач. Современное ландшафтоведение занимается прикладными задачами, которые выполняются в рамках представлений разных ландшафтных школ. Существенных теоретических обобщений в последние десятилетия не наблюдается. Использование новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли сути ландшафтного подхода не меняет.

Неопределенность понятия и смыслового содержания ландшафтных построений, а также отсутствие общепринятой методики ландшафтного контурного дешифрирования, предопределяет несовпадение результатов картографирования. Разработчикам

© Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Данилин И.М., 2018

ландшафтных карт в этой ситуации остается только принимать позицию той или иной научной школы, выбор в любом случае будет субъективен. Авторы принимают теоретические воззрения Д.Л. Арманда [10], который считает, что ландшафт есть синоним природного территориального комплекса (ПТК): «это участок территории или акватории, условно выделенный вертикальными границами по принципу относительной однородности и горизонтальными – по принципу исчезновения влияния того фактора, на основании которого данный комплекс выделен». Для особо охраняемых лесных природных территорий ПТК – это иерархический набор природных экосистем.

С появлением материалов аэрокосмических съемок при составлении ландшафтных карт появилась возможность значительного сокращения объемов наземных исследований. Д. М. Киреев [12] формулирует принципы ландшафтного картографирования, основанные на дешифрировании фотографических изображений, В.Б. Сочава [13; 14] – построения иерархической структуры геомеров, В.А. Первунин [15] – геоботанического картографирования на ландшафтной основе. Интерпретация материалов аэрокосмических съемок в сочетании с наземными исследованиями позволила установить, что рельеф и геологический состав поверхностных отложений, являются решающими лесорастительными факторами [16]. Дальнейшее развитие ландшафтного картографирования в значительной степени связано с широким использованием цифровых средств дистанционного зондирования Земли, построением цифровых моделей рельефа (ЦМР) и ГИС [17].

В настоящее время программными средствами ГИС анализируются данные ЦМР и мультиспектральных космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения. Следует признать достаточную для картографирования ландшафтной структуры точность оценок по ЦМР показателей рельефа. Что же касается характеристик растительного покрова, лесных и нелесных сообществ то их дешифрирование методами контролируемой и неконтролируемой классификации пикселей космических снимков зачастую сопровождается недопустимыми ошибками [18]. При этом существует альтернатива – данные лесоустройства. На сегодняшний день – это наиболее полные и точные сведения о характеристиках лесной растительности на землях различных категорий.

Целью данной работы является демонстрация последовательности картографирования разнообразия растительности с использованием лесоустроительных данных. Работа выполнена на примере территории заповедника «Азас» в Республике Тува.

Материалы и методы исследований. Таксация лесов в заповеднике «Азас» выполнена в 2015 г. по третьему разряду лесоустройства дешифровочным методом при нормативном количестве наземных глазомерно-измерительных описаний. Исходная информация доступна в бумажном варианте и в виде векторного слоя таксационных выделов. Необходимые оценки местоположения на карте полигонов фаций, урочищ и ландшафтов, а также выявление и анализ их характеристик возможно производить средствами ГИС. Атрибутивная таблица слоя таксационных выделов содержит более 200 полей. Далеко не все эти данные могут быть использованы для характеристики ландшафтных таксонов. Их смысловое содержание и величина полигонов будет напрямую зависеть от варианта комбинации данных. Выбор же определяется целями картографирования растительности. Принимается следующая иерархическая структура: ландшафт – урочище-фация.

В качестве фаций рассматриваются смежные таксационные выдела. Критерии объединения: для насаждений и редин – это преобладание в составе пород деревьев и равенство класса бонитета; для не покрытых лесом земель – это тождественность наименований. В таксационных описаниях выделов не предусматривалось определение коренной породы, поэтому погибшие насаждения (гари) и производные лиственные насаждения, рассматриваются в качестве отдельных фаций.

В качестве урочищ также рассматриваются смежные таксационные выделы. Критерии объединения для насаждений и редин – преобладающая порода древостоя и равенство класса бонитета. Не покрытые лесом земли как отдельные урочища не выделяются.

В качестве ландшафтов рассматриваются высотно-поясные комплексы (ВПК): высокогорные, горно-таежные, лесостепные и подтаежные. Степные, луговые, кустарниковые и болотные сообщества в заповеднике встречаются фрагментарно, что не позволяет выделять их в виде отдельных ландшафтов. В схеме типов леса и нелесных сообществ приведены верхние и нижние пределы абсолютных высот ВПК. Эти величины при оконтуривании ландшафтов используются как ориентировочные, с их последующей корректировкой по данным лесоустройства.

Смысловое содержание таксационных выделов отвечает задачам организации и ведения лесного хозяйства. Смысловое содержание фаций, урочищ и ландшафтов отвечает, в частности, требованиям организации и ведения охотничьего хозяйства на лесных территориях [19].

Исходные материалы:

- данные массовой таксации заповедника «Азас» в формате файлов ГИС ArcMap (11 739 описаний таксационных выделов);
- ЦМР, представленная данными SRTM;
- схема типов леса и нелесных сообществ.

Последовательность картографирования:

- пространственный анализ ЦМР, с получением растра местоположений по входам абсолютная высота экспозиция уклон (поле ВЭУ);
- создание в атрибутивной таблице таксационных выделов полей ВЭУ, ФАЦИИ, УРОЧИЩА, ЛАНДШАФТЫ;
- слияние смежных одноименных фаций, урочищ и ландшафтов с образованием отдельных векторных слоев.

Результат выполнения этапов – ландшафтная карта заповедника. Легенда карты должна отвечать целям картографирования, в нашем случае легенда включает характеристику рельефа, описание типов леса и нелесных сообществ, основные таксационные показатели.

Результаты. Заповедник «Азас» расположен в пределах трапеции SRTM 56-02. Для индексации местоположений приняты входы:

- абсолютные высоты, градация 100 м;
- склоны северной экспозиции (0–90, 270–360°);
- склоны южной экспозиции (90–270°);
- плоские местоположения с уклонами (поймы водотоков и водоразделы);
- склоны средней крутизны с уклонами от 3 до 20°;
- крутые склоны с уклонами более 20°.

Первому высотному поясу отвечают высоты до 1 000 м, второму от 1 001 до 1 100 м и т.д. Северная экспозиция – 1, южная – 2. Уклоны до 3-х градусов обозначаются индексом 1, до 20° – 2, более 20° – 3. Две градации экспозиции и три градации уклонов образуют шесть типов местоположений. Впереди поставлен индекс высотного пояса, далее следуют индексы экспозиции и уклона. Например, выражение 2-1-2 – отвечает абсолютным высотам от 1 001 до 1 100 м, склонам северной экспозиции крутизной от 3 до 20°.

Результатом анализа ЦМР является получение растровых поверхностей абсолютных высот, экспозиций и уклонов местности. Посредством их комбинирования создается общая растровая поверхность Combine. Атрибутивная таблица Combine дополняется полем ВЭУ (высота, экспозиция, уклон) со значениями индексов местоположений. Поле ВЭУ должно присутствовать также и в атрибутивной таблице слоя таксационных

выделов. Для этого произведена конвертация растра Combine в векторный слой с последующим его пространственным соединением со слоем таксационных выделов. Поле ВЭУ при выполнении этой операции сохраняется в атрибутивной таблице в качестве дополнительного.

Для насаждений и редин заполнение поля ФАЦИИ произведено посредством сцепления условных обозначений первых 3 пород деревьев формулы состава. Например, насаждение 2-го класса бонитета с формулой породного состава 7Б1Ос1Л1С запишется как БОсЛ2. Для непокрытых лесом земель фация отождествляется с категорией земель таксационного выдела. Заполнение поля УРОЧИЩА произведено в соответствии с характеристикой фаций, посредством указания преобладающей породы древостоя и класса бонитета. Заполнение поля ЛАНДШАФТЫ произведено на основе поля ВЭУ, в соответствии с схемой типов лесов и нелесных сообществ заповедника. К высокогорным ландшафтам отнесены таксационные выдела расположенные на абсолютных высотах более 1 800 м, к горно-таежным – от 1 100 до 1 800 м, к степным, лесостепным и подтаежным – до 1 100 м.

Полигоны одноименных фаций, урочищ и ландшафтов объединены с образованием отдельных векторных слоев. Ландшафтная карта на основе материалов лесоустройства сформирована посредством наложения слоев фаций урочищ и ландшафтов в ГИС проекте. Содержание карты при необходимости может редактироваться, так как связи фаций урочищ и ландшафтов с исходным слоем таксационных выделов сохранены.

Заключение. Традиционное ландшафтное картографирование предполагает совместное рассмотрение тематических слоев. Основные из них «Геологическое строение», «Геоморфологическое районирование», «Растительность», «Почвы» [20], при этом контурное дешифрирование выполняется с использованием аэрокосмических снимков и заключается в выявлении ландшафтной структуры территории. Аналитическое дешифрирование, т.е. наполнение ландшафтных структур (полигонов) тематическим содержанием производится посредством интерполяции известных данных (материалы ключевых участков, фондовые и литературные).

В основе рассматриваемой методики картографирования разнообразия растительности лежит максимально полное использование лесоустроительных материалов. В сравнении с традиционным ландшафтным картографированием, за счет использования векторного слоя таксационных выделов и атрибутивной таблицы, включающей подробную таксационную характеристику выделов, получаем:

- значительное сокращение наземных работ (цикл лесоустроительных работ предусматривает закладку пробных площадей и производство ходовой таксации);
- максимально подробное контурное и аналитическое дешифрирование таксационных выделов, выполненное по аэрокосмическим снимкам;
- возможность формирования различных вариантов смыслового содержания ландшафтных таксонов, соответствующих задачам картографирования;
- возможность использования программных средств ГИС для редактирования, поскольку ландшафтная карта сохраняет связь с полигонами и атрибутивной таблицей таксационных выделов.

Дополнительные характеристики, которые могут понадобиться для решения определенных научно-практических задач, выявляются из других источников. Важна сама возможность формирования новых информационных векторных слоев (или полей). Так, характеристику почвенного покрова можно взять, например, из схемы типов леса и нелесных сообществ, использовать существующую или разработать новую почвенную карту. Таким образом, картографирование разнообразия растительности на основе лесоустроительных материалов позволяет анализировать и обобщать не только лесотаксационные данные, но также в полной мере использовать, накопленную к настоящему времени информацию о системной ландшафтной организации территории.

Список литературы

1. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М., 1991. 366 с.

2. Сукачёв В.Н. Избранные труды в трех томах / под ред. Е.М. Лавренко. Л.: Наука. Т. 1: Основы лесной типологии и биогеоценологии. 1972. 419 с.

3. Солнцев Н.А. История физико-географического районирования европейской части СССР // Физико-географическое районирование СССР. М., 1962. С. 6–54.

4. Рихтер Г.Д. Основные факторы и закономерности территориальной дифференциации природы СССР и физико-географическое районирование. Т. VIII. М.: Земледелие, 1969. 36 с.

5. Гвоздецкий Н.А., Исаченко А.Г. К проблеме физико-географического районирования. Изд-во ВГО, 1962. С. 462.

6. Солнцев Н.А. О морфологии природного географического ландшафта // Вопр. географии. 1949. Вып. 16. С. 61–86.

7. Прокаев В.И. Основы методики физико-географического районирования. Л., 1967. 119 с.

8. Калашников Е.Н., Киреев Д.М. Основы ландшафтно-статистического метода лесоинвентаризации. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 144 с.

9. Сочава В.Б. Учение о геосистемах. Современный этап комплексной физической географии. М.: Изд-во АН СССР, 1972. С. 20.

10. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. М.: Мысль, 1975. 288 с.

11. Нееф Э. Теоретические основы ландшафтоведения. М: Прогресс. 1974. 220 с.

12. Киреев Д.М. Методы изучения лесов по аэроснимкам. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 221. с.

13. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 318 с.

14. Сочава В.Б. Географические аспекты сибирской тайги. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 256 с.

15. Первунин В.А. Принципы картографирования структуры растительного покрова таежных геокомплексов // Ландшафтные методы лесного картографирования. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, 1987. С. 62–72.

16. Седых В.Н. Аэрокосмический мониторинг лесного покрова. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 239 с.

17. Калашников Е.Н. Комплексное картографирование лесных ландшафтов: автореф. дис. ... д-ра биол. Наук. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2002. 49 с.

18. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Брюханов Н.В. Погрешности дешифрирования лесов Приангарья методом классификации пикселей спутникового снимка // Сиб. лесн. журн. 2016. № 4. С. 56–67.

19. Шишикин А.С., Фарбер С.К. Инновационная технология охотустройства // Экосистемы Центральной Азии: исследования, сохранение, рациональное использование: материалы XIII Убсунурск. Междунар. симп., Кызыл, 4–7 июля 2016 г. Кызыл, 2016. С. 241–244.

20. Ермошин В.В., Ганзей К.С. Ландшафтное картографирование Российской части бассейна реки Амур // Вестн. ДВО РАН. 2012. № 3. С. 13–20.

УДК 528.854, 630*181

Е.В. Федотова

[1]Институт леса имени В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
elfed@ksc.krasn.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ПОСЛЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЕГО СИБИРСКИМ ШЕЛКОПРЯДОМ

Проведена оценка актуального состояния растительного покрова на территориях, где в разные годы (1885, 1955, 1995) леса были повреждены в результате вспышки массового размножения сибирского шелкопряда. Темнохвойная тайга восстанавливается через смену пород.

Ключевые слова: сибирский шелкопряд, сукцессия, Восточный Саян, Кеть-Чулымское междуречье, Нижнее Приангарье.

Сибирский шелкопряд является одним из наиболее опасных вредителей тайги, поскольку в периоды вспышек массового размножения он заселяет сотни тысяч гектаров лесов и повреждает их вплоть до гибели [1]. Этот вредитель является постоянно действующим фактором в хвойных древостоях Сибири, которые восстанавливаются после его нападения медленно и плохо. Наибольший ущерб шелкопряд причиняет лесам с преобладанием пихты сибирский и кедра (сосны кедровой сибирской), менее устойчивым к повреждениям и не регенерирующим хвою после ее объедания гусеницами.

Восстановление лесного покрова после поражения сибирским шелкопрядом является важной темой для изучения, и это обусловлена тем, что леса имеют огромное экологическое и экономическое значение. Имеющиеся работы в этом направлении довольно противоречивы. Так, Н.Ф. Реймерс [2] проводил наблюдения в шелкопрядниках на территории Иркутской области и Бурятии и пришел к выводу об успешном возобновлении кедра (в случае отсутствия повторных пожаров). По наблюдениям в Томской области, В.А. Дудин (1958) пришел к выводу о том, что восстановление леса на шелкопрядниках идет через смену пород. Этот вывод подкрепляют материалы более поздних исследований в лесах Томской области И.Н. Павлова (2004) и А.А. Агеева (2006). Таким образом, либо этот процесс имеет региональные особенности, либо многообразие факторов, влияющих на восстановление кедра в шелкопрядниках, приводит к различным результатам.

С биологической точки зрения процесс восстановления лесного покрова называется сукцессией. Сукцессия (преемственность, наследование) — это постепенная, необратимая, направленная смена одних биоценозов (исторически сложившаяся совокупность животных, растений, грибов и микроорганизмов, населяющих относительно однородное жизненное пространство, и связанных между собой окружающей их средой.) другими на одной и той же территории под влиянием природных факторов или воздействия человека [3]. Значительный интерес представляет анализ современного состояния растительного покрова на территориях, где вспышка численности сибирского шелкопряда проходила в разное время достаточно давно, что позволяет оценить ход восстановительной сукцессии.

© Федотова Е.В., 2018

На рис. 1 представлен процесс восстановления лесного покрова после вспышки численности сибирского шелкопряда. Около 10 лет проходит до появления кустарников и лиственного леса, и чаще всего через смену пород более чем через 100 лет на этой территории снова появляется темнохвойный лес.

Рис. 1. Смена растительности в таежной экосистеме после повреждения древостоя сибирским шелкопрядом

В настоящей работе рассматриваются три участка (рис. 2):

- кедровые лесах Восточного Саяна (Иркутская область); вспышка проходила в 80-х гг. XIX в. в долинах рек Малая и Большая Белая (В.В. Поварницын [4]);
- темнохвойные леса Кеть-Чулымского междуречья; вспышка 1952–1957 гг. [1];
- темнохвойные леса Нижнего Приангарья; вспышка 1993–1996 гг.

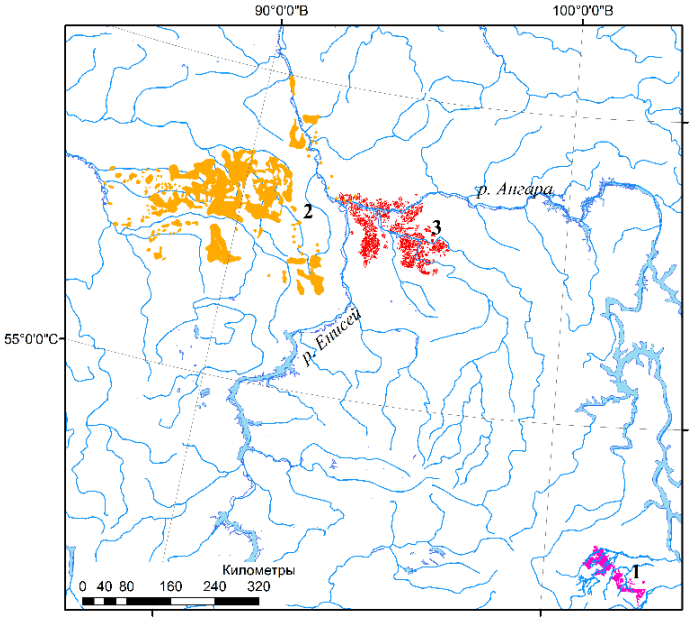


Рис. 2. Исследуемые территории: *1* – долина реки Большая Белая; *2* – Кеть-Чулымское междуречье; *3* – Нижнее Приангарье

Самая давняя из рассматриваемых вспышка массового размножения сибирского шелкопряда произошла в **Восточном Саяне** в долине реки Белая. Согласно [4] начало больших повреждений кедровой тайги в этом районе относится к 1885 г. Общая площадь поврежденных лесов исчисляется в несколько сот тысяч гектаров. Кедровники в исследуемом районе занимают сплошную полосу, тянущуюся на несколько десятков километров по направлению к гольцам, имеют сплошной характер на высотах от 700 до 1 700 м над уровнем моря. В 1931 г. территория поврежденных лесов представляла со-

бой засохшие кедровые насаждения, гари, покрытые в долинах рек мелкой березой и необлесившиеся гари.

Исходные данные для анализа современного состояния включали:

- карту повреждений кедровников, составленную в 1931 г.;
- современные снимки среднего пространственного разрешения Landsat;
- карту растительного покрова РФ, разработанную и обновляемая в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН);
- цифровую модель рельефа (ЦМР).

По состоянию на 1978 г. по результатам классификации снимков Landsat темнохвойные леса занимали 48 % территории. В таблице представлено процентное содержание разных типов поверхности на территории полностью усохших кедровых лесов при использовании карты растительности РФ. Только 58 % занято темнохвойными лесами. Остальная территория занята сосновыми, лиственными и смешанными лесами. Сосновые леса занимают южные и юго-западные склоны.

Вспышка в Кеть-Чулымском междуречье. Данная территория представляет низменность, высоты не более 200–210 м над уровнем моря. Территория занята темнохвойной и сосновой тайгой, повсеместно встречаются вторичные березово-осиновые насаждения. Часть территории занята болотами.

В результате вспышки, проходившей в 1952–1957 гг., повреждено около 2,5 га тайги, усохло около 1,5 млн га темнохвойных лесов, причем в погибших древостоях [1] по данным к 1966 г. в большинстве случаев отсутствует удовлетворительное возобновление не только хвойных, но и лиственных пород.

Исходные данные:

- снимки Landsat;
- цифровая модель рельефа,
- карта растительности РФ.

На территории в 2,5 млн га поврежденных лесов в настоящее время темнохвойные леса составляют 7 %, сосновые и лиственные леса – 50 %, смешанные преимущественно лиственные леса – 7 %, смешанные леса – 8 %, смешанные с преимуществом хвойных – 18 % (таблица). Темнохвойные леса восстанавливаются через смену пород, и в первую очередь на участках, наиболее близко расположенных к неповрежденным темнохвойным древостоям.

Таблица

Типы подстилающей поверхности на территориях вспышек численности сибирского шелкопряда

Год вспышки	Темнохвойные	Лиственный и светлохвойный	Травяные сообщества	Преимущественно лиственные	Смешанные	Преимущественно хвойные	Голые почвы
1885	58	16	–	5	5	2	1
1953–1957	7	50	–	7	8	18	–
1994–1997	15	14	32,5	27	–	9	1,7

Вспышка в Нижнем Приангарье проходила в 1993–1997 гг. Лес покрывал 90 % территории, основной породный состав леса: пихта, кедр, ель, сосна, лиственница и береза. Поврежденные сибирским шелкопрядом участки представлены мозаично расположенными очагами. Погибшие древостои занимают общую площадь 230 тыс. га.

Исходные данные:

- снимки Landsat;
- карта поврежденных лесов с выделением трех уровней повреждениям;
- цифровая модель рельефа;
- карта растительности РФ.

В настоящее время на данной территории 15% составляют темнохвойные леса, оставшиеся в основном на участках со слабым уровнем повреждения. Лиственные, сосновые и лиственничные леса составляют 14 %. Необлесившиеся территории – голые почвы (в основном на гарях) и травяные сообщества занимают 1,7 и 32,5% соответственно. Преимущественно лиственные и смешанные леса вместе – 27 %; преимущественно хвойные – 9 % территории.

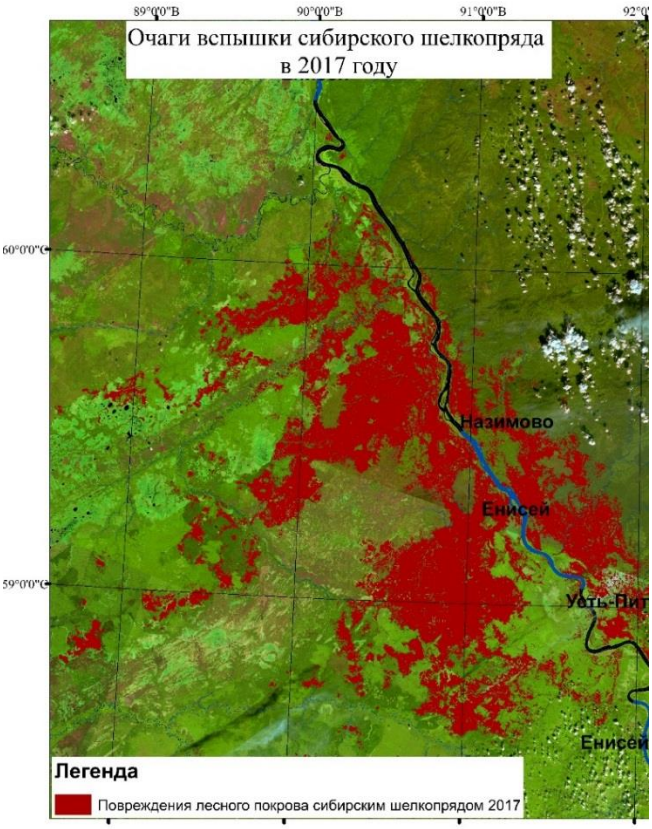


Рис. 3. Погибшие леса в результате вспышки Сибирского шелкопряда в 2014–2017 гг.

Изучение хода восстановительной сукцессии с применением ГИС-технологий может быть использовано при прогнозировании восстановления тайги на территории действующей вспышки сибирского шелкопряда на территории Енисейского района Красноярского края и прилегающих территориях (рис. 3). Площадь погибших лесов составляет примерно 732 тыс. га. Леса погибли на больших территориях, часто ограниченных древостоями, не являющимися кормовой базой для сибирского шелкопряда. Только на востоке имеются оставшиеся неповрежденными темнохвойные леса, и на западе – на Енисейском кряже. В соответствии с проведенным анализом восстановление темнохвойной тайги можно ожидать через 100–120 лет.

Выражаю благодарность доктору биологических наук, профессору В.В. Кузьмичеву за предоставленный материал по Восточному Саяну. Выражаю благодарность студентам ИКИТ, в разное время получившим результаты, использованные в статье: А. Карпушкину, Э. Баранмаа, Г. Матвеевичеву, Д. Сережкину.

Список литературы

1. Формирование лесов на шелкопрядниках и вырубках в верховьях р. Большая Кеть (Красноярский край) / В.В. Кузьмичев, В.П. Черкашин, М.А. Корец, И.А. Михайлова // Лесоведение. 2001. № 4. С. 8–14.

2. Реймерс Н.Ф. Уничтожение сибирского шелкопряда зверями и птицами, населяющими кедровые леса, и восстановление шелкопрядников и гарей // Тр. по лесному хозяйству Сибири. Вып. 4. Новосибирск, 1958. С. 255–261.

3. Экологическая сукцессия // Grandars. URL: http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/sukcessiya.html.

4. Поварницын В.А. Ангарская лесная экспедиция 1931 г. Ч. 2: Леса и лесовозобновление в бассейне реки Б.Белой в Восточных Саянах // Тр. Совета по изучению производительных сил, Серия Сибирская. Вып. 7. Л.,1934.

УДК 904:332.334.4; 902.26

М.Р. Шаяхметов[1], В.Е. Приходько[2],
В.В. Горбунов[3], А.А. Тишкин[3]

[1]Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина,
Омск, Россия, e-mail: schayakhmetov.marat@yandex.ru
[2]Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН, Пущино, Россия, e-mail: kpve00@mail.ru
[3]Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,
e-mail: gorbunov@hist.asu.r, tishkin210@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СРЕДНЕВЕКОВОЙ СРОСТКИНСКОЙ КУЛЬТУРЫ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Использование ГИС-технологий, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и тематических карт (ландшафтной почвенной, полезных ископаемых) показало, что памятники средневековой сросткинской культуры Алтайского края располагались на черноземах в пределах Западно-Сибирского подтаежно-лесостепного района. Поселения локализировались на относительно выровненных площадках с небольшими перепадами высот, вблизи крупных рек: Обь, Катунь, Алей – и широких долин при слиянии рек; ряд поселений были в ~30–70 км от месторождений полезных ископаемых (медь, золото, цинк, железо).

Ключевые слова: археология, пространственная локализация поселений и курганов.

Введение. ГИС-технологии и дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) используются при исследовании археологических памятников. Проанализированы возможности дистанционного зондирования Земли из космоса для археологических исследований у нас в стране и за рубежом и дана методика проведения изучения [1–8]. С использованием методов компьютерного дешифрирования аэрокосмоснимков реконструирована схема внутренней застройки средневекового Маяцкого городища (VIII в.), выявлена динамика его развития [9]. Применение этих методов при изучении палеолитических стоянок Горного Алтая показало, что большое значение для их локализации имели наличие пологих площадок, расстояние до ближайшей реки (менее 400 м для 77 % изученных памятников) и точки слияния водотоков (менее 2 км, 88 %), близость к источникам каменного сырья, освещенность территории [10]. Выявлены закономерности приуроченности 1 015 памятников культурного наследия Сургутского Приобья к различной географической обстановке для ряда хронопериодов: 76 памятников эпохи неолита, 136 – бронзы, 391 – раннего железного века, 300 – Средневековья и 112 – Нового времени [11].

С применением ГИС технологий проведено разграничение ареалов проживания абашевских и синташтинских сообществ, показана их приуроченность к разным экологическим нишам (лесостепной и степной) [12]. С помощью методов ГИС и ДЗЗ выявлены пространственная структура сохранившихся античных агроландшафтов и контуры древних полей земледелия, идентифицировано их расположение около каждого поселения на территории Крыма, особенно информативным оказалось использование разновременных и разносезонных космоснимков [13].

В ряде работ отражены результаты дистанционных исследований для древних поселений [14] и дешифрирования культурного ландшафта – террас Кисловодской долины предгорий Северного Кавказа, где люди жили с древних времен [15].

© Шаяхметов М.Р., Приходько В.Е., Горбунов В.В., Тишкин А.А., 2018

Целью нашей работы было выявление пространственной локализации памятников культурного наследия сросткинской культуры Алтайского края.

Методика. Использовали снимки космических аппаратов (КА) США Landsat-7 и Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м в пикселе. Они позволяет анализировать объекты в видимом, красном и инфракрасном диапазонах от 0,45 до 0,9 нм спектра солнечной радиации. Компьютерную обработку космоснимков проводили методом синтезирования с помощью программных комплексов ENVI 5.2, ErdasEmagine, Multispec, QGis. При этом сочетали съемки в диапазоне спектра солнечной радиации от 0,4 до 0,9 нм и цветовые каналы в системе RGB (RED – GREEN – BLUE). При сочетании диапазона и канала (в данной работе применяли синтез каналов NIR – RED – GREEN) получали цветное синтезированное изображение, помогающее установить объективные различия изучаемых объектов. Анализ мультиспектральных космоснимков в программном комплексе ENVI проводили в несколько этапов. 1. Геопривязка изображения исходного материала методом нахождения опорных точек на исходном географически привязанном и обрабатываемом изображениях. 2. Классификация мультиспектральных снимков для выявления неоднородности и объединения кластеров изучаемых объектов. Этот этап включает в себя алгоритмы объединения одинаковых значений пикселей на изображении. В программном комплексе представлены два основных алгоритма классификации без обучения по спектральным характеристикам объектов: K-Means и ISODATA. В обоих способах требуется выбор количества кластеров, определяемых рядом заданных ограничивающих параметров: минимальное количество пикселов в классе, число итераций и порог сходимости классов.

В классификации без обучения применяются статистические методы, чтобы сгруппировать *n*-мерные данные в их естественные спектральные классы. K-Means использует кластерный анализ, при этом выбирается число кластеров, которые выделяются на исходных данных снимка КА Landsat-8. Затем алгоритм программы определяет местонахождение центров этих групп и многократно повторяет данную процедуру до тех пор, пока оптимальная и достаточно статистически объективная спектральная отделимость (*spectral separability*) не будет достигнута. Среди классификаций без обучения по спектральным признакам часто используют самоорганизующийся способ анализа данных кластеризации IsoData. Данный способ применяют для более точной, многошаговой обработки снимков. Основным параметром при обоих вариантах кластеризации, задаваемом перед вычислениями, является число кластеров *n*, которое необходимо получить в итоге.

Иногда при определенном распределении значений яркости на снимке такой стабилизации не происходит, поэтому одновременно используют другой ограничивающий параметр – максимальное число итераций. За оптимальное число принимали 5–7 кластеров в пределах исследуемого полигона. После анализа методом кластеризации и установления географического положения объектов культурного наследия, используя спектральный отклик (попиксельный анализ данных), составляли «мозаику» из изображений КА Landsat-7 и Landsat-8. Сопоставляли ее с данными следующих карт: лесорастительного районирования (М1 : 2 100 000), природных зон, почвенной (М1 : 1 000 000) и полезных ископаемых (1 : 2 500 000). Для выявления геоморфологических особенностей расположения поселений и некрополей Сросткинской культуры по оси *X* откладывали высоту над уровнем моря, по оси *Y* – расстояние, которые выставляются автоматически в зависимости от природных условий изучаемой объекта.

Использовали также метод анализа биомассы растений на основе индекса NDVI. Это безразмерный показатель отражательной способности изучаемого объекта, характеризующий активность вегетации растительности. Показатель NDVI рассчитывали по формуле: NDVI = NIR – RED / NIR + RED, где NIR – инфракрасный диапазон; RED – красный диапазон спектра солнечной радиации. Данный метод позволяет анализировать территорию

и выявить наличие объектов, не относящихся к природным. Индекс NDVI строительных объектов имеет значение 1, природных объектов – от 0,1 до 1,0. После выявления географического положения объектов культурного наследия, используя программное обеспечение ENVI или ErdasEmagine, Multispec, QGis, наносили их местонахождение на электронный картографический материал для последующего анализа.

Анализ картографического материала сросткинской культуры Алтая. Изучено местоположение 130 курганных некрополей и 21 поселение средневековой сросткинской культуры Алтайского края [16]. На основе 21 мультиспектрального снимка среднего разрешения КА Landsat-8 составлена общая «мозаика» на территорию Алтайского края. Для наиболее корректного сшивания данных использовали принцип триангуляции Делоне. На полученный синтезированный мультиспектральный снимок (синтез каналов *Nir – Red – Green*) наложили все памятники древностей с точной географической привязкой.

Для каждого археологического памятника построили геоморфологические профили с использованием ГИС, характеризующих мезорельеф. Установлено, что поселения располагались на относительно выровненных площадках с небольшими перепадами высот (2–7 м). Ойкумена большинства памятников древностей локализирована в Западно-Сибирском подтаежно-лесостепном районе лесостепной зоны. Девять курганных некрополей находились в Алтае-Саянском горнотаежном районе Южносибирской горной зоны. Большинство памятников расположено на черноземах, в ареале сосредоточено семь дерново-слабоподзолистых почв, два вида темно-серых лесных почв.

Большинство поселений находилось вблизи озер и в поймах больших рек Обь, Бия, Алей и при впадении в них более мелких рек. Благодаря тому, что здесь имеются широкие долины и не заливаемые водой останцы, ряд поселений располагается в 5–10 и 20–30 км от мест с залеганием полезных ископаемых, однако многие поселения локализуются вдали от таких мест.

Ранее также показано, что основные из 1 500 археологических комплексов Тоболо-Ишимского региона Западной Сибири находятся около крупных рек, особенно в широких долинах при их слиянии [17].

Заключение. На основании применения мультиспектральных космических снимков с разрешением 30 пикселей и ГИС технологий выявлено, что средневековая сросткинская культуры располагала собственной ойкуменой с акцентированным центром и относительно четкими рубежами, которые распространялись на плодородных черноземах в пределах Западно-Сибирского подтаежно-лесостепного района лесостепной зоны. Установлено, что поселения локализировались на относительно выровненных площадках с небольшими перепадами высот (3–10 м), вблизи озер и крупных рек, а также в широких долинах при их слиянии. Некоторые поселения находились от месторождений полезных ископаемых (медь, золото, цинк, железо) на растоянии ~30–70 км, большинство – на растоянии 100 и более км.

Работа выполнена в рамках Госзадания № АААА-А18-118013190175-5 «Развитие почв в условиях меняющегося климата и антропогенных воздействий» и проектов РФФИ 17-05-01151 (химические анализы) и РНФ 16-18-10033 «Формирование и эволюция систем жизнеобеспечения у кочевых социумов Алтая и сопредельных территорий в поздней древности и средневековье: комплексная реконструкция» (полевые работы, анализы).

Список литературы

1. Гарбузов Г. П. Археологические исследования и дистанционное зондирование Земли из космоса // Рос. археология. 2003. № 2. С. 45–55.

2. Сизов О.С., Кушнырь О.В. Анализ подходов к систематизации тематических задач, решаемых с помощью данных ДЗЗ // Исследование Земли из космоса. 2018. № 2.

3. Смекалов С.Л., Федоров Д.Л. Геоинформационные технологии в археологических исследованиях. СПб., 2004. 104 с.

4. Шаяхметов М.Р., Шойкин О.Д., Федяева Е.Ю. Изучение особенностей дешифрирования почвенного покрова степной зоны Западной Сибири на основе материалов дистанционного зондирования земли // Омск. науч. вестн. 2015. № 1 (138). С. 191–194.

5. Шмидт И.В. Охранная археология в Германии. Часть вторая – тезисы о сложении новой культуры научного исследования и становлении археологической ГИС Саксонии // Вестн. Омск. ун-та. Серия «Исторические науки». 2017. № 4 (16). С. 235–241.

6. Parcak S. Satellite Remote Sensing for Archaeology: Handbook / Teylor & Francis Group London and New York. 2009. 286 P.

7. Lasaponara R., Masini N. (Eds.) Satellite Remote Sensing. A New Tool for Archaeology. 2012. URL: http://www.springer.com/gp/book/9789048188000.

8. Neubauer W. GIS in archaeology – the interface between prospection and excavation // Archaeological Prospection. 2014. № 11(3). P. 159–166.

9. Афанасьев Г.Е., Зотько М.Р., Коробов Д.С. Первые шаги «космической археологии» в России (к дешифровке Маяцкого селища) // Росс. археология. 1999. № 2. С. 106–123.

10.ГИС-моделирование условий обитания, благоприятных для проживания древнего человека в горах Алтая / И.Д. Зольников, А.В. Постнов, В.А. Лямина [и др.] // Археология, этнография и антропология Евразии. 2013. № 3 (55). С. 40–47.

11.Зайцева Е.А. Методика камерального зонирования территории в системе охраны объектов археологии Ханты-Мансийского автономного округа Югры (некоторые итоги и перспективы) // Урал. ист. вестн. Екатеринбург, 2010. № 2 (27). С. 120–124.

12.Епимахов А.В., Чуев Н.И. Абашевские и синташтинские памятники: предварительные результаты пространственного анализа // Вестн. археологии, антропологии и этнографии. 2011. № 2 (15). С. 47–56.

13.Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А., Буряк Ж.А. Геоархеологические исследования исторических ландшафтов Крыма. Воронеж: Издат. дом ВГУ, 2017. 432.

14. A 3D digital workflow for archaeological intra – site research using GIS / M. Katsianis, S. Tsipidis, K. Kotsakis, A. Kousoulakou // J. of Archaeological Science. 2008. 3 35. P. 655–667.

15. Reinhold S., Korobov D.C. The Kislovodsk basin in the North Caucasian piedmonts – archaeology and GIS studies in a mountain cultural landscape // Preistoria Alpina. 2007. Vol. 42. P. 181–207.

16. Тишкин А.А., Горбунов В.В., Горбунова Т.Г. Алтай в эпоху средневековья: Иллюстрированный исторический атлас: учеб. пособие / под общ. ред. А.А. Тишкина. Барнаул: ООО «Печатная компания АРТИКА», 2011. 136 с.

17. Зах В.А. Динамика заселения территории лесного Тоболо-Ишимья в голоцене // Вестн. археологии, антропологии и этнографии. 2013. № 4 (23). С. 4–12.

УДК 528.8.04, 528.88

А.С. Ященко[1], Ю.И. Ященко[2], С.В. Кривальцевич3

[1]Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия
[2] Омский государственный аграрный университет, Омск, Россия
[3]АО «ОНИИП», Омск, Россия
e-mail: x_rays1@mail.ru

ТЕМАТИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СЕЛЬХОЗУГОДИЙ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ SENTINEL-1

Приведены результаты исследования возможности использования радиолокационных данных Sentinel-1 для тематического картирования сельхозугодий на территории юга Омской области. В процессе анализа использовались данные, полученные в разные моменты вегетативного периода. Проведена оценка перспектив использования данных Sentinel-1 для мониторинга влажности поверхностного слоя почв.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, тематическая картография, радиолокация.

Введение. Результаты оперативного мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды востребованы во многих отраслях деятельности человека. Одними из основных инструментов, служащих для получения информации в рамках программ экологического мониторинга, являются космические аппараты (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В последние десятилетия инициирован ряд программ глобальных мониторинга состояния тех или иных климатообразующих факторов. Так, во втором десятилетии XXI в. Европейское космическое агентство (ESA) и Еврокомиссия (EU) инициировали программу глобального мониторинга суши, Мирового океана и атмосферы Copernicus [1].

Согласно плану развертывания спутниковой группировки, в рамках программы Copernicus в 2014 г. был успешно запущен первый КА серии (Sentinel-1A). На борту КА установлен радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), работающий на частоте 5,4 ГГц (С-диапазон) в режимах поляризаций VV+VH или HH+HV. На данный момент на орбите функционируют два спутника этого типа – Sentinel-1A/B. Наилучшее пространственное разрешение радиолокационных снимков поверхности составляет 5 м [2]. При сопоставимом с оптическими сенсорами пространственном разрешении радиолокаторы позволяют получать снимки поверхности при наличии облачности и в любое время суток. Это дает возможность широко использовать данные спутниковых РСА для тематического картирования поверхности Земли. Геоинформационные продукты (ГИС), созданные с привлечением тематических карт, находят применение в сфере кадастровых услуг, надзорном мониторинге состояния растительности [3], создании и техническом сопровождении ГИС, обработке спутниковых микроволновых радиометрических данных низкого разрешения. На момент написания статьи в открытом доступе представлен обширный глобальный архив данных РСА (Sentinel-1) и оптических снимков (Sentinel-2). Также кураторы программы Copernicus предоставляют информацию об основных физических принципах работы РСА [4], бесплатное программное обеспечение SNAP для обработки данных [5] и краткое руководство по его использованию [6]. Подобный подход способствовал росту числа публикаций посвященных применению данных РСА для нужд мониторинга сельскохозяйственно й растительности [7], мониторинга морских льдов [8] и др. Однако авторам не известно об исследованиях возможности применения данных Sentinel-1 для картирования сельхозугодий на территории Западной Сибири.

© Ященко А.С., Ященко Ю.И., Кривальцевич С.В., 2018

Процедура обработки и полученные результаты. В процессе выполнения работ использовались радиолокационные снимки поверхности, полученные спутником Sentinel-1 в режиме Interferometric Wide Swath (интерферометрический широкозахватный режим или IW). Данный режим сочетает относительно высокое пространственное разрешение снимка (5×20 м) и широкую полосу захвата (около 250 км) [2]. Диапазон углов падения излучения в пределах снимка не остается постоянным и меняется в пределах от 29 до 46°. Тестовые участки поверхности, для которых проводился анализ данных, находились на юге Омской области в окрестностях озера Эбейты. Данные для выбранных тестовых участков поверхности предоставляются с периодичностью 1 раз в 10–13 дней. С учетом наложения полос съемки РСА для двух ближайших пролетов периодичность может уменьшаться до 1-го раза в 5–7 дней. Для указанной территории были доступны снимки, полученные в режиме VV+VH. Обработка снимков проводилась в среде SNAP; свободно распространяемом ESA программном обеспечении [5]. Предварительная обработка снимков заключалась в калибровке, удалении тепловых шумов, спекл-фильтрации и геометрической коррекции. Спекл-фильтрация снимков РСА не позволяет в полной мере избавиться от их зашумленности (рис. 1). По этой причине нами проводилась элементарная статистическая обработка данных об удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) в пределах тестовых полей заключающаяся в определении среднего значения и стандартного отклонения.

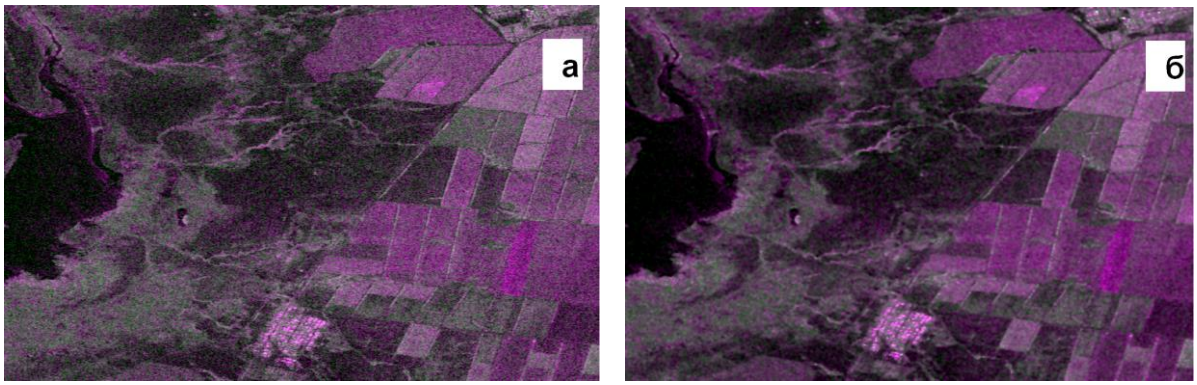
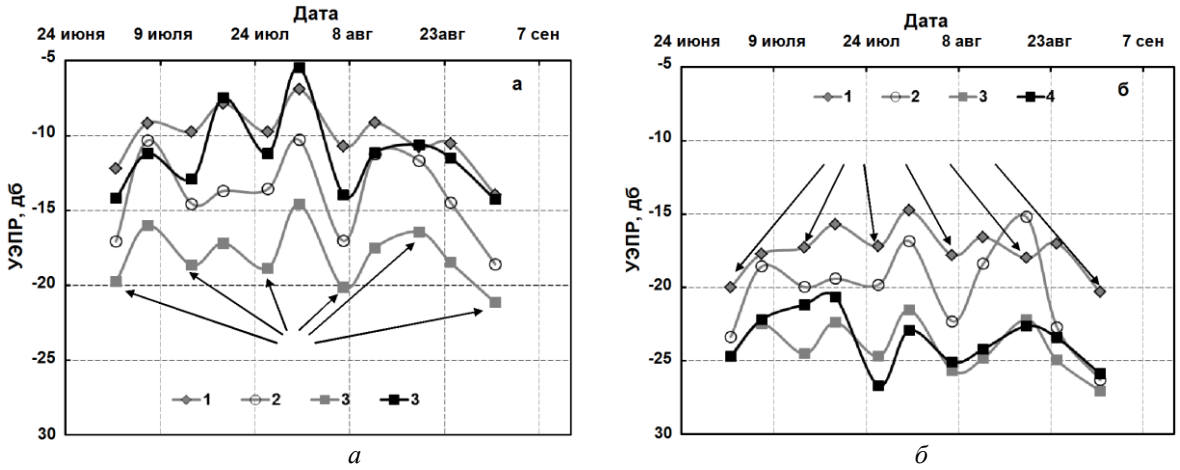


Рис. 1. Композитное изображение, построенное по данным Sentinel-1: красный и синий каналы – режим VV; зеленый – режим VH; до спекл-фильтрации (*а*); после спекл-фильтрации Lee Sigma (*б*). Фото от 07.07.2017

Естественные природные объекты отличаются сложной формой и часто имеют случайно неоднородную геометрию поверхности. Получить строгое аналитическое решение задачи отражения электромагнитных волн от подобных структур невозможно даже при известных радиофизических характеристиках материала, составляющего эти структуры. По этой причине модели, используемые при дистанционном тематическом картировании поверхности по радиолокационным данным, в большинстве своем носят эмпирический характер. Формально модель представляет собой базу данных, в которой каждому типу поверхности соответствует диапазон характерных значений УЭПР. По мере накопления экспериментальных данных диапазон значений УЭПР, соответствующий тому или иному типу поверхности, может изменяться.

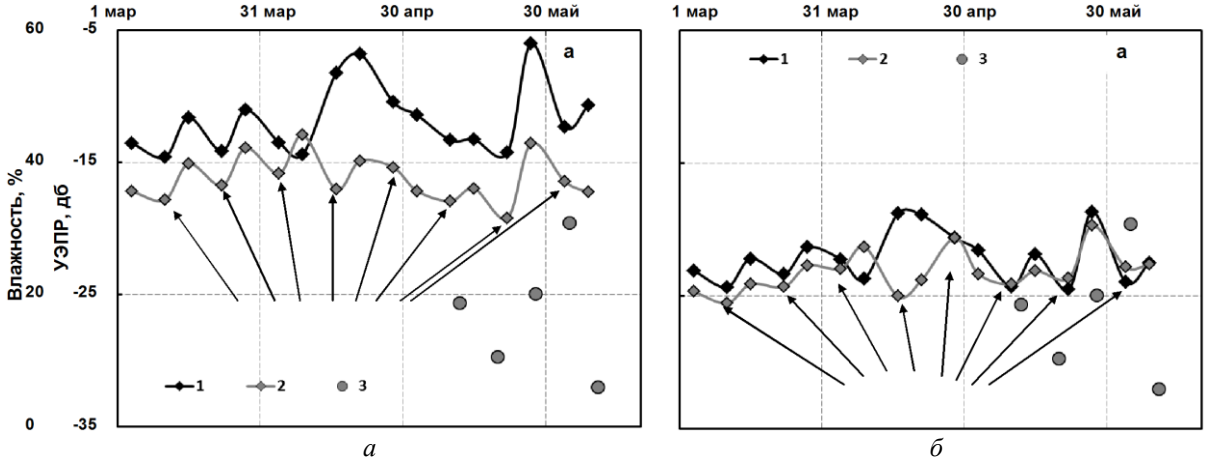
Для оценки возможности идентификации типичных растительных сельскохозяйственных культур, произрастающих на юге Омской области, по данным РСА, анализировались временные ряды УЭПР для следующих видов растительности: многолетние кормовые (костер), хлебные зерновые (пшеница) и подсолнечника. Также анализировались данные для полей находящихся под паром. Временной период захватывал моменты колошения, созревания и уборки зерновых. Ряды данных УЭПР приведены

на рис. 2. Как можно видеть из приведенных данных, для идентификации указанных выше типов растительности необходимо использовать данные полученные на двух поляризационных режимах: VV и VH. Значения УЭПР, полученные в одном поляризационном режиме, могут иметь близкие значения для существенно отличающих типов поверхности. Так, УЭПР подсолнечника и поля под паром в режиме VV близки по значениям, а в режиме VH заметно отличаются. В некоторые моменты времени значения УЭПР имеют аномально высокие значения: 31 июля в режиме VV для всех участков и 19 августа в режиме VH для пшеницы. Это в равной степени можно объяснить как неустранимым влиянием спекл-шума, так и наличием плотной облачности сопровождающейся выпадением осадков. Указанный эффект существенно затрудняет идентификацию вида сельхозугодий по данным одномоментных измерений. По этой причине надежная идентификация вида сельхозугодий возможно только при анализе временных рядов данных УЭПР.



а *б*

Рис. 2. Временные ряды УЭПР полученные режимах VV (*а*) и VH (*б*) в 2017 г.
Стрелками обозначены даты, в которые угол зондирования составлял 41°; в остальные дни – 32°:
1 – подсолнечник; *2* – пшеница; *3* – костер; *4* – поле под паром



а *б*

Рис. 3. Временные ряды УЭПР полученные режимах VV (*а*) и VH (*б*) в 2018 г.
Стрелками обозначены даты, в которые угол зондирования составлял 41°; в остальные дни – 32°.
1 – пашня; *2* – костер; *3* – данные контактных измерений влажности в слое 0–3 см

Заключение. С запуском аппарата Sentinel-1, осуществляющего съемку с высоким пространственным разрешением, появилась возможность широко использовать снимки РСА для тематического картирования поверхности с высоким пространственным разрешением и высокой оперативностью. Выяснено, что данные Sentinel-1 вполне пригодны для картирования сельскохозяйственных культур, заметно отличающихся стеблевой структу-

рой. В начале вегетативного периода данные Sentinel позволяют раздельно идентифицировать вспаханные и засеянные многолетними кормовыми культурами (костром) поля. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых и совершенствовании имеющихся алгоритмов автоматической классификации типов поверхности, в частности – для нужд программ глобального картирования влажных почв SMAP и SMOS.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ, проект № 5.9513.2017/8.9.

Список литературы

1. COPERNICUS observing the Earth. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus.

2. SENTINEL-1 SAR User Guide Introduction. URL: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar.

3. A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data / W. Wagner, G. Lemoine, M. Borgeaud, H. Rott // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1999. Vol. 37, № 2. P. 938–948.

4. ESA PolSARpro Polarimetry tutorial. URL https://earth.esa.int/web/polsarpro/polarimetry-tutorial.

5. Science Toolbox Exploitation Platform SNAP. URL http://step.esa.int/main/download/.

6. ESA Sentinel 1 Online Tutorials /tutorials. URL: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1/tutorials.

7. Мышляков С.Г. Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства // Геоматика. 2016. № 2. С. 16–24.

8. Митник Л.М., Хазанова Е.С. Динамика ледяного покрова в морях Восточно-Сибирском и Лаптевых по данным спутникового микроволнового зондирования во второй половине октября 2014 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 2. С. 100–113.

СПИСОК АВТОРОВ

Авласко П.В. 44
Алейникова А.М. 242
Алексанин А.И. 63
Алексеенко И.В. 361
Алфимов Д.Е. 44
Алымбаева Ж.Б. 246
Анисимов М.В. 260
Антонов А.В. 46
Арбузов С.А. 101
Архипкин О.П. 3
Асмарян Ш.Г. 220
Астанин Д.М. 33
Аюржанаев А.А. 246, 404
Балашов И.В. 56
Балтухаев А.К. 109
Баторов А.С. 66
Беликова М.Ю. 69
Белов С.Ю. 73
Беляева Т.А. 77
Беляков А.А. 81
Бобров П.П. 77
Борде Б.И. 37
Ботвич И.Ю. 250, 254
Братанов А.Н. 256
Брежнев Р.В. 40
Бронов С.А. 44
Бураков Д.А. 296
Бурцев М.А. 57
Буслов И.А. 46
Бучнев А.А. 7
Быков А.А. 280
Бышев В.И. 260
Валеев А.Г. 264
Варламова Е.В. 268
Василенко Е.В. 85
Васильев Р.В. 207, 410
Верхотурова М.В. 188
Вечерков В.В. 302
Волкова М.А. 357
Вырвинский А.Г. 91
Гаврилюк Е.А. 87
Газимов Т.Ф. 274
Гармаев Е.Ж. 246, 404
Гаченко А.С. 49
Герасимова О.С. 277, 280
Гиниятуллина О.Л. 277, 280, 283
Глебова А.В. 69
Головастова Е.С. 302
Голюков А.С. 287
Голятина М.А. 289
Горбунов В.В. 426
Горбунова Ю.В. 294
Гордеев А.Е. 46
Гордеев И.Н. 396
Готюр И.А. 95
Грищенко Д.В. 130
Грищенко М.Ю. 98
Гук А.П. 12, 101, 105
Дагуров П.Н. 109
Дамов М.В. 156
Данилин И.М. 417
Демьяненко Т.Н. 66, 294
Дергунов А.В. 298
Дмитриев А.В. 109
Дмитриев Е.В. 16
Добронец Б.С. 113
Добрынин С.И. 109
Доррер Г.А. 46
Дунаева А.В. 134
Дунаева Е.А. 302
Евстратова Л.Г. 12
Емельянов Д.В. 116
Ермолаева Д.А. 120
Жарникова М.А. 246
Жохова Д.А. 306
Жукова В.А. 310
Жукова Е.Ю. 314
Замятин А.В. 203
Захарова Н.Б. 318
Зеньков И.В. 369, 373, 380, 388
Зоркина Т.М. 250
Зотин А.Г. 156
Зотов А.Э. 318
Иванов С.В. 53
Им С.Т. 124
Имашев С.А. 21
Кадочников А.А. 25
Караваев Д.М. 95
Каранин А.В. 69
Каранина С.Ю. 69
Картозия А.А. 322
Картушинский А.В. 326
Кашкин В.Б. 298, 329, 361
Кашницкий А.В. 57
Кизеев А.Н. 334
Кикин П.М. 130
Ким П.А. 7, 128
Кобец Д.А. 57
Ковалев В.А. 283
Козодеров В.В. 16
Колесников А.А. 130
Комиссарова Е.В. 130
Коновалов В.Г. 338
Константинова А.М. 56
Корнилов Ф.А. 134
Костоусов В.Б. 134
Костылев М.А. 173
Кошикова Т.С. 342
Краснощеков К.В. 329
Кривальцевич С.В. 430

Крошка Е.С. 77, 194
Кубицкий Д.С. 231
Кужевская И.В. 306, 357
Кузьмик Н.С. 417
Кулешов Ю.В. 95
Кулик Е.Н. 407
Кушнырь О.В. 53
Лапчик М.П. 153
Лебедев Л.И. 138
Леонтьев Н.А. 59
Лещенко С.Л. 149
Ли В.Г. 124
Литвинцев К.Ю. 166
Лупян Е.А. 57
Маглинец Ю.А. 134
Мальцев Е.А. 134
Маргарян В.Г. 346
Матузко А.К. 353
Миков Л.С. 146
Мельников П.В. 211
Минаев В.В. 49
Морозов М.А. 63
Мотакова Д.Д. 242
Мурадян В.С. 220
Никитин Р.М. 44
Никулин Н.А. 44
Нейман В.Г. 260
Непомнящий О.В. 149
Нефедов Б.Н. 373, 380, 388
Нечепуренко О.Е. 357
Носков М.В. 153
Овсепян А.А. 220
Одинцов Р.В. 361
Павличенко Е.А. 25
Пахирка А.И. 156
Перевалова А.А. 40
Перфильев Д.А. 159
Пестунов И.А. 211
Петров И.А. 287
Письман Т.И. 254
Плотников Д.Е. 87
Плотникова А.С. 87
Подлесный С.В. 410
Подопригора В.Г. 163, 216
Полевщикова Ю.А. 165
Пономарев Е.И. 169, 216, 365
Пономарев О.И. 169
Пономарева Т.В. 365
Попов Д.В. 149
Попов С.Е. 173
Попова О.А. 113
Попович В.В. 302
Приходько В.Е. 426
Прошин А.А. 57
Пятаев А.С. 184
Пятаева А.В. 188, 227
Пяткин В.П. 7
Пяткин Ф.В. 7
Рагулина М.И. 153
Раевич А.П. 191
Раевич К.В. 369, 373, 380, 388
Репин А.В. 194
Родионова О.В. 194
Романов А.А. 298, 361
Ромасько В.Ю. 25, 396
Рублева Т.В. 298, 329, 361
Рудаков В.А. 338
Русин Е.В. 7
Рылов С.А. 198
Сагатдинова Г.Н. 3
Саринова А.Ж. 203
Сарычев Е.Ю. 98
Саункин А.В. 207
Сафонова А.Н. 16
Свердлик Л.Г. 21, 400
Светлаков В.Р. 231
Сидорова А.Н. 260
Силкин К.Ю. 334
Симонов К.В. 329
Синявский Ю.Н. 211
Скляров В.Е. 260
Содномов Б.В. 246, 404
Соколов А.А. 16
Соловьев В.С. 258, 413
Сорокин А.В. 163, 216
Стародубцев А.И. 91
Сукач И.А. 59
Счастливцев Е.Л. 271, 283
Тадырова С.Р. 407
Тарасова Л.Л. 85
Татарников А.В. 207
Тепаносян Г.О. 220
Тишкин А.А. 426
Ткачев И.Д. 410
Томшин О.А. 413
Токарев А.В. 25
Тутатчиков В.С. 153
Фарбер С.К. 417
Федоров Р.К. 49
Федотова Е.В. 422
Фереферов Е.С. 49
Фомин Е.В. 63
Хамедов В.А. 224
Хмельнов А.Е. 49
Царук В.Б. 227
Цибульский Г.М. 143
Цыдыпов Б.З. 246
Цычуева Н.Ю. 231, 404
Чимитдоржиев Т.Н. 109
Чупрова В.В. 294
Чурсин В.В. 306
Шаяхметов М.Р. 426
Швецов Е.Г. 169
Шевырногов А.П. 254
Шляхова М.М. 105
Щукин Г.Г. 95
Якимов Н.Д. 169
Якубайлик О.Э. 25
Ямских Г.Ю. 256
Яровой С.В. 46
Ященко А.С. 430
Ященко Ю.И. 430
Alcaraz-Segura D. 235
Rubtsov A. 235
Safonova A. 235
Tabik S. 235
Wenjian Ni 29

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ **3**

Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н.
Совместный анализ радарных и оптических дистанционных зондирований Земли при выделении водных поверхностей 3

Бучнев А.А., Ким П.А., Пяткин В.П., Пяткин Ф.В., Русин Е.В.
Фреймворк сети облачных web-сервисов для программного комплекса обработки данных дистанционного зондирования 7

Гук А.П., Евстратова Л.Г.
Исследование критериев оценки эффективности статистических непараметрических методов для дешифрирования лесных массивов 12

Дмитриев Е.В., Козодеров В.В., Соколов А.А., Сафонова А.Н.
Определение таксационных параметров лесных территорий на основе космических изображений высокого разрешения 16

Свердлик Л.Г., Имашев С.А.
Комплексный анализ данных мониторинга физико-химических параметров проб подземных вод и вариаций температуры атмосферы 21

Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Павличенко Е.А., Ромасько В.Ю., Токарев А.В.
Аппаратно-программный комплекс приема, оперативной обработки и визуализации спутниковых данных ФИЦ КНЦ СО РАН 25

Wenjian Ni
Briding Scale Gaps Between Field Sampling and Regional Mapping of Forest Aboveground Biomass 29

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ 33

Астанин Д.М.
Дистанционное зондирование Земли на примере концепции глобального информационного обеспечения туристско-рекреационной деятельности 33

Борде Б.И.
Автоматизация проектирования информационной модели кампуса 37

Брежнев Р.В., Перевалова А.А.
Технология графического построения процессов обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли 40

Бронов С.А., Никулин Н.А., Авласко П.В., Никитин Р.М., Алфимов Д.Е.
Принципы управления исполнительными электроприводами в космических аппаратах для дистанционного зондирования Земли 44

Буслов И.А., Доррер Г.А., Яровой С.В., Гордеев А.Е., Антонов А.В.
Программно-аппаратный комплекс для контроля пожарной обстановки в природной среде на базе беспилотных воздушных судов 46

Гаченко А.С., Хмельнов А.Е., Федоров Р.К., Фереферов Е.С., Минаев В.В.
Разработка ГИС-мониторинга антропогенного воздействия на прибрежную акваторию озера Байкал 49

Иванов С.В., Кушнырь О.В.
Решение задачи обеспечения результатами дистанционного зондирования из космоса региональных потребителей. Основные результаты и перспективы 53

Константинова А.М., Балашов И.В.
Инструменты анализа быстроразвивающихся природных процессов на основе спутниковых данных дистанционного зондирования Земли....56

Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Кобец Д.А.
Анализ развития способов создания информационных систем дистанционного мониторинга....57

Леонтьев Н.А., Сукач И.А.
Разработка ракеты-носителя на электрической тяге....59

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ....63

Алексанин А.И., Морозов М.А., Фомин Е.В.
Точность автоматического совмещения изображений высокого пространственного разрешения....63

Баторов А.С., Демьяненко Т.Н.
Создание крупномасштабной цифровой модели рельефа и ее использование для почвенного картографирования....66

Беликова М.Ю., Каранина С.Ю., Каранин А.В., Глебова А.В.
Кластеризация молниевых разрядов WWLLN на основе алгоритма FRiS-Tax....69

Белов С.Ю.
Некоторые результаты регистрации квадратурных компонент сигналов с помощью наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн на тестовом полигоне Московского государственного университета....73

Беляева Т.А., Бобров П.П., Крошка Е.С.
Влияние релаксационных процессов на комплексную диэлектрическую проницаемость почв при положительных и отрицательных температурах....77

Беляков А.А.
Аналитический мониторинг динамики метеорологических показателей, влияющих на продуктивность сельскохозяйственных культур....81

Василенко Е.В., Тарасова Л.Л.
Технология спутникового мониторинга агрометеорологических условий уборки зерновых культур в Сибирском федеральном округе....85

Гаврилюк Е.А., Плотникова А.С., Плотников Д.Е.
Картографирование наземных экосистем Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей на основе восстановленных мультивременных спутниковых данных Landsat....87

Вырвинский А.Г., Стародубцев А.И.
Анализ реализации и модификация входных данных модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур....91

Готюр И.А., Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г.
Совершенствование методов калибровки и валидации данных микроволновых зондировщиков....95

Грищенко М.Ю., Сарычев Е.Ю.
Автоматизированное дешифрирование изменения городской застройки Москвы по снимкам со спутников серии Landsat....98

Гук А.П., Арбузов С.А.
Распознавание отдельных деревьев по многоспектральным аэрокосмическим снимкам леса....101

Гук А.П., Шляхова М.М.
Исследование статистических свойств многоспектральных космических снимков леса 105

Дагуров П.Н., Балтухаев А.К., Дмитриев А.В., Добрынин С.И., Чимитдоржиев Т.Н.
Интерферометрическая модель радарного зондирования снежного покрова 109

Добронец Б.С., Попова О.А.
Численный анализ для задач дистанционного зондирования Земли со случайными входными данными 113

Емельянов Д.В.
Применение методов лабораторной спектрометрии и данных дистанционного зондирования для определения содержания гумуса в почвах 116

Ермолаева Д.А.
Автоматическое обнаружение и извлечение линейных структур на основе данных дистанционного зондирования 120

Им С.Т., Ли В.Г.
ГИС-анализ северной границы вечнозеленых хвойных лесов Средней Сибири 124

Ким П.А.
О формализации модели естественной кластеризации 128

Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В., Грищенко Д.В.
Анализ и обработка данных дистанционного зондирования Земли методами машинного обучения 130

Костоусов В.Б., Дунаева А.В., Корнилов Ф.А.
Построение цифровой модели местности на основе мультиспектральной стереосъемки 134

Лебедев Л.И.
Распознавание и классификация объектов гиперспектрального изображения 138

Мальцев Е.А., Маглинец Ю.А., Цибульский Г.М.
Объективная оценка качества изображения на основе расчета геометрической концентрации 143

Миков Л.С.
Точечная оценка деформаций земной поверхности с помощью метода устойчивых отражателей 146

Непомнящий О.В., Попов Д.В., Лещенко С.Л.
Моделирование трассы лидара при проведении замеров предельно малых концентраций углеводородов в приземном слое 149

Носков М.В., Тутатчиков В.С., Лапчик М.П., Рагулина М.И.
Применение параллельного аналога алгоритма Кули – Тьюки двумерного быстрого преобразования Фурье для цифровой обработки снимков дистанционного зондирования Земли 153

Пахирка А.И., Зотин А.Г., Дамов М.В.
Формирование детализированной карты местности на основе аэрофотоснимков 156

Перфильев Д.А.
Сегментация объекта на цифровом изображении 159

Подопригора В.Г., Сорокин А.В.
Статистика электрофизических параметров лесного покрова, взаимодействующего со спутниковыми сигналами L-диапазона 163

Полевщикова Ю.А.
Методика моделирования состояния лесных насаждений в Среднем Поволжье с применением спутниковых снимков 165

Пономарев Е.И., Литвинцев К.Ю., Швецов Е.Г., Пономарев О.И., Якимов Н.Д.
Адаптированные методы оценки пожарных эмиссий на основе данных дистанционного зондирования 169

Попов С.Е., Костылев М.А.
Программный комплекс мониторинга смещений земной поверхности на базе массово-параллельной обработки радарных данных 173

Пятаев А.С.
Определение категорий состояний сосны на основе нечеткой логики по визуальным данным 184

Пятаева А.В., Верхотурова М.В.
Детектирование лиц с использованием метода Виолы – Джонса 188

Раевич А.П.
Построение рекомендательных систем с использованием метода анализа формальных понятий 191

Репин А.В., Родионова О.В., Крошка Е.С.
Диэлектрическая релаксация в глинах в широком диапазоне частот при отрицательных и положительных температурах 194

Рылов С.А.
Частичное обучение в рамках иерархической кластеризации для интерактивного анализа аэрокосмических изображений 198

Саринова А.Ж., Замятин А.В.
Алгоритмы сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений на основе дискретных преобразований 203

Саункин А.В., Васильев Р.В., Татарников А.В.
Программный комплекс для мониторинга и работы с параметрами верхней атмосферы, определяемой спутниковыми методами 207

Синявский Ю.Н., Мельников П.В., Пестунов И.А.
Наращивание обучающей выборки с помощью процедуры «среднего сдвига» в задачах классификации спутниковых изображений 211

Сорокин А.В., Подопригора В.Г., Пономарёв Е.И.
Влияние градиентов электрофизических характеристик древостоя на радиосигналы СВЧ-диапазона 216

Тепаносян Г.О., Мурадян В.С., Овсепян А.А., Асмарян Ш.Г.
Оценка эрозионного риска почв с использованием модели CORINE 220

Хамедов В.А.
Использование ИК-диапазона для обнаружения лесных участков с порубочными остатками 224

Царук В.Б., Пятаева А.В.
Компенсация артефактов атмосферных осадков на видеоизображениях 227

Цычуева Н.Ю., Светлаков В.Р., Кубицкий Д.С.
Методы космического мониторинга процессов опустынивания Южного Казахстана 231

Safonova A., Rubtsov A., Tabik S., Alcaraz-Segura D.
Application of Convolutional Neural Networks in Detection of Forest Damage Caused by the *Polygraphus Proximus* Beetle 235

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ 242

Алейникова А.М., Мотакова Д.Д.
Оценка селеопасности верховья долины реки Баксан 242

Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж.
Использование цветных и спектральных вегетационных индексов для оценки продуктивности степи 246

Ботвич И.Ю., Зоркина Т.М.
Спутниковый мониторинг восстановления залежных земель Республики Хакасии 250

Ботвич И.Ю., Письман Т.И., А.П. Шевырногов
Спутниковый мониторинг лесной растительности заповедника Столбы 254

Братанов А.Н., Ямских Г.Ю.
Изучение геоморфологических особенностей долины реки Коды методом дешифрирования 256

Бышев В.И., Нейман В.Г., Сидорова А.Н., Скляров В.Е., Анисимов М.В.
О мультидекадной изменчивости современного климата и перспективах ее мониторинга 260

Валеев А.Г.
Применение ЦМР для анализа морфометрии водосборного бассейна озера Алаколь 264

Варламова Е.В., Соловьев В.С.
Изменения фенологических сроков растительного покрова лесотундры Якутии (1982–2017) 268

Газимов Т.Ф.
Диагноз зон турбулентности с применением спутниковой информации 274

Герасимова О.С., Счастливцев Е.Л., Гиниятуллина О.Л.
Учет и оценка территорий хранения отходов угледобывающих предприятий по данным дистанционного зондирования 277

Гиниятуллина О.Л., Быков А.А.
Оценка пылевых выбросов угледобывающих районов по данным дистанционного зондирования 280

Гиниятуллина О.Л., Счастливцев Е.Л., Ковалев В.А.
Опыт применения дистанционного зондирования Земли в задачах геоэкологического мониторинга угледобывающего района 283

Голюков А.С., Петров И.А.
Использование дендрохронологического анализа и возможностей геоинформационной системы для оценки влияния условий увлажнения на прирост древостоев 287

Голятина М.А.
Исследование степных озер Забайкальского края с помощью космического мониторинга 289

Горбунова Ю.В., Демьяненко Т.Н., Чупрова В.В.
Использование данных дистанционного зондирования Земли для агроэкологической оценки структур почвенного покрова и оптимизации земледелия в лесостепной зоне Красноярского Края 294

Дергунов А.В., Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Романов А.А.
Антарктическая озоновая дыра как естественный геофизический объект 298

Дунаева Е.А., Головастова Е.С., Вечерков В.В., Попович В.В.
Совместное использование беспилотных летательных аппаратов и дистанционного зондирования Земли для оценки биопродуктивности посевов 302

Жохова Д.А., Кужевская И.В., В.В. Чурсин
Особенности вертикального и горизонтального градиентов температуры воздуха в дни местного циклогенеза 306

Жукова В.А.
Мезомасштабные облачные системы над Западной Сибирью 310

Жукова Е.Ю.
Оценка состояния растительности залежей на тестовых участках в Хакасии по данным Landsat-8 314

Захарова Н.Б., Зотов А.Э.
Обработка данных дистанционного зондирования о температуре поверхности Балтийского моря 318

Картозия А.А.
Морфостратиграфическое исследование термокарстовой котловины в южной части острова Курунгнах (дельта реки Лены) с применением ГИС-анализа дистанционного зондирования Земли, полученного с беспилотного летательного аппарата 322

Картушинский А.В.
Структурные особенности формирования градиентных полей поверхности водных экосистем 326

Кашкин В.Б., Краснощеков К.В., Рублева Т.В., Симонов К.В.
Анализ спутниковых измерений космической системы GRACE над сейсмоактивными районами сильнейших землетрясений 329

Кизеев А.Н., Силкин К.Ю.
Мониторинг промышленных объектов и их воздействия на окружающую природную среду (на примере Кольской атомной электростанции, Мурманская область) 334

Коновалов В.Г., Рудаков В.А.
Вопросы дистанционного мониторинга параметров континентального оледенения России 338

Кошикова Т.С.
Использование данных спутникового зондирования для оценки неустойчивости атмосферы 342

Маргарян В.Г.
Современное экологическое состояние Араратского артезианского бассейна и задачи его охраны 346

Матузко А.К.
Комплексное применение данных дистанционного зондирования Земли для определения тепловых аномалий 353

Нечепуренко О.Е., Волкова М.А., Кужевская И.В.
Оценка пространственной структуры зон обледенения с использованием данных спутникового зондирования 357

Одинцов Р.В., Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Романов А.А., Алексеенко И.В.
Возмущения в тропосфере над скоплениями коровых землетрясений Центральной Азии по спутниковым измерениям 361

Пономарев Е.И., Пономарева Т.В.
Мониторинг эффектов послепожарных тепловых аномалий в криолитозоне Средней Сибири 365

Раевич К.В., Зеньков И.В.
Исследование парка горных и транспортных машин на основе информационных ресурсов спутниковой съемки 369

Раевич К.В., Зеньков И.В., Нефедов Б.Н.
Информационное обеспечение для выполнения дистанционного мониторинга детектирования нарушенных земель угольными разрезами 373

Раевич К.В., Зеньков И.В., Нефедов Б.Н.
Применение космических технологий при оценке земель угольных разрезов 380

Раевич К.В., Зеньков И.В., Нефедов Б.Н.
Результаты исследования экосистемы угольных разрезов с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли 388

Ромасько В.Ю., Гордеев И.Н., Бураков Д.А.
Оценка снегозапасов по данным прибора AMSR-2 396

Свердлик Л.Г.
Многолетняя изменчивость аэрозольной оптической толщи над северным Тянь-Шанем по данным наземных и спутниковых измерений 400

Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж.
Аналитическая аппроксимация внутригодовой динамики NDVI для оценки фенологических параметров лесной растительности 404

Тадырова С.Р., Кулик Е.Н.
Роль космического мониторинга при комплексной оценке особо охраняемых природных территорий Республики Алтай 407

Ткачев И.Д., Васильев Р.В., Подлесный С.В.
Контроль прозрачности атмосферы Земли с помощью статистических методов обработки данных ПЗС камеры 410

Томшин О.А., Соловьев В.С.
Особенности сезонного хода природных пожаров в азиатской части России 413

Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Данилин И.М.
Картографирование разнообразия растительности по материалам лесоустройства 417

Федотова Е.В.
Восстановление лесного покрова после повреждения его сибирским шелкопрядом 422

Шаяхметов М.Р., Приходько В.Е., Горбунов В.В., Тишкин А.А.
Применение данных ГИС-технологий и дистанционного зондирования Земли при изучении средневековой сросткинской культуры Алтайского края 426

Ященко А.С., Ященко Ю.И., Кривальцевич С.В.
Тематическое картографирование сельхозугодий по радиолокационным данным Sentinel-1 430

СПИСОК АВТОРОВ 434

Научное издание

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы V Международной научной конференции
Красноярск, 11–14 сентября 2018 г.

Научный редактор
Ваганов Евгений Александрович

Корректура и компьютерная верстка *А.А. Быковой*

Подписано в печать 29.08.2018. Печать плоская. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 25,8. Тираж 100 экз. Заказ № 5997

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; http://bik.sfu-kras.ru
e-mail: publishing_house@sfu-kras.ru