



РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

**Материалы VII Международной научной конференции
Красноярск, 29 сентября – 2 октября 2020 г.**

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

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Материалы VII Международной научной конференции
Красноярск, 29 сентября – 2 октября 2020 г.

Научный редактор
Е.А. Ваганов

Красноярск
СФУ
2020

УДК 528.8(063)
ББК 26.0с51я43
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, 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; *Ю.А. Маглинец*, кандидат технических наук, профессор, руководитель НУЛ «ИПКМ» ИКИТ СФУ

Р326 Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы VII Междунар. науч. конф. Красноярск, 29 сентября – 2 октября 2020 г. / науч. ред. Е.А. Ваганов ; отв. ред. Г.М. Цибульский. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. – 328 с.

ISBN 978-5-7638-4389-7

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(063)
ББК 26.0с51я43**

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

ISBN 978-5-7638-4389-7

© Сибирский федеральный университет, 2020

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 528.8.04, 528.88

**Е.В. Дмитриев¹, П.Г. Мельник²,
С.А. Донской³, С.А. Зотов⁴, А.А. Соколов⁵**

¹Кандидат физико-математических наук,

Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

²Кандидат сельскохозяйственных наук, Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский
университет), Москва, Россия

³Рослесинфорг, Институт лесоведения РАН, Москва, Россия

⁴Московский физико-технический институт (Национальный
исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

⁵Кандидат физико-математических наук, Лаборатория физики и химии атмосферы
Университета Литтораль Опалового берега, Дюнкерк, Франция

e-mail: yegor@mail.ru; melnik_petr@bk.ru; lesshii@bk.ru; zotov.sa@mipt.ru;

mailto:anton.sokolov@univ-littoral.fr

КЛАССИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Представлены результаты оценки эффективности статистической текстурной классификации панхроматических изображений сверхвысокого разрешения *WorldView-2* с целью определения структурных особенностей почвенно-растительного покрова, в частности лесных территорий. Приведено обоснование выбора параметров статистического алгоритма извлечения текстурных признаков. Проведено сравнение точности ансамблевого алгоритма классификации (МСК-МОВ), основанного на методе самокорректирующихся кодов и ряда стандартных алгоритмов (МБЦ, ОКБЦ). Показано преимущество ансамблевого подхода при решении данной задачи, метод МСК-МОВ демонстрирует значимо более высокую точность (97 и 88 %) при решении задач различной степени сложности для рассматриваемых тестовых территорий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, текстурный анализ, спутниковые изображения высокого и сверхвысокого разрешения, структура древостоев.

Создание и развитие методов мониторинга изменений структурных параметров почвенно-растительного покрова, а также ряда антропогенных объектов является важным научным направлением, имеющим множество приложений в народном хозяйстве. Основой данных методов являются многовременные мультиспектральные и панхроматические спутниковые изображения различного пространственного разрешения. При тематической обработке такого рода изображений совместно используются различные методы спектрального и текстурного анализа. С появлением космических систем дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения (размер пикселя менее 1 м) круг задач, решаемых на основе текстурного анализа, был существенно расширен [1; 2]. Также в ряде работ отмечается повышение роли

текстурного анализа при совместной спектрально-текстурной обработке аэрокосмических изображений [3].

Одной из важных проблем является установление структурных особенностей древостоев. Структура лесного полога в первую очередь определяется такими параметрами, как породный состав, лесотаксационная полнота, высота и диаметр отдельных деревьев. Указанные параметры связаны с такими важными характеристиками как запас древесины и биомасса фракций древостоя. В ряде работ строятся зависимости указанных параметров от различных спектральных и текстурных составляющих. Так, например, в работе [4] представлены результаты оценок структурных параметров древостоев тестовых участков на территории заповедника Ланд де Гасконь, расположенного в юго-западной части Франции. Предлагаемая авторами методика была протестирована на многоспектральных и панхроматических изображениях сосновых древостоев, сделанных в разные периоды времени с помощью спутниковых систем *Quickbird* и *Pléiades*. Полученные оценки показывают, что предлагаемая методика позволяет восстановить размеры крон и расстояние между деревьями с точностью в 1 м, высоту деревьев – с точностью 3 м и диаметр на уровне груди – 0,06 м.

В данной работе представлены результаты текстурной классификации различной степени сложности изображений тестовых участков, расположенных на территории Савватьевского лесничества (Тверская область) и Бронницкого лесничества (Московская область). В качестве спутниковой информации использовались мультиспектральные и панхроматические изображения *WorldView-2* с пространственным разрешением 1,85 и 0,46 м соответственно. Рассматривался статистический подход к измерению текстур, основанный на вычислении статистик матрицы совместной встречаемости уровней серого (*GLCM – Gray-Level Co-Occurrence Matrix*). Данный подход был впервые предложен в работе [5], и на сегодняшний день он является одним из наиболее популярных методов решения задач, связанных с дистанционными исследованиями структуры древостоев [1; 4].

Для извлечения текстурных признаков использовалась методика, описанная в работе [6], предназначенная для повышения эффективности совместной обработки мультиспектральных и панхроматических изображений *WorldView-2*. Панхроматическое изображение обрабатывается методом бегущего окна заданного размером, в котором вычисляется *GLCM* и вычисляются 19 различных статистик Харалика. Элементы *GLCM* представляют собой частоты встречаемости градиентов яркости по заданному направлению. Для обработки приграничных пикселей панхроматическое изображение расширяется на половинный размер окна. Для повышения скорости расчета центр окна пробегает только пиксели, координаты которых соответствуют центрам пикселей соответствующего многоспектрального изображения. По полученным ранее данным среди указанных статистик зависимость от направления смежности можно учитывать только для 2 из 19 статистик Харалика – контраст (*contrast*) и дисперсия разности (*diffrence variance*), которые, в свою очередь, являются близкими по построению, и использование одной из них для проведения классификации обычно влечет за собой исключение другой.

Для классификации текстурных признаков использовались различные алгоритмы. В данной работе мы приводим данные для нескольких методов [7]: метода ближайшего центроида (МБЦ), метода k ближайших соседей с оптимизированным поиском (ОКБС) и метода самокорректирующихся кодов [8], в котором в качестве базового классификатора используется метод опорных векторов с гауссовским ядром (МСК-МОВ) [9]. Метод МБЦ является самым быстрым и наиболее слабым из представленных классификаторов. ОКБС позволяет использовать достаточно

сложные дискриминантные поверхности, однако его недостатком является сложность в выборе числа ближайших соседей, от которого зависят устойчивость и точность метода. Особенностью используемого алгоритма ОКБС является оптимизация поиска за счет применения *kd*-деревьев [10]. МСК-МОВ является универсальным ансамблевым классификатором. Эффективность данного метода исследовалась в работе [11]. Поскольку ОКБС и МСК-МОВ обладают выраженным дисбалансом, то для установления равной априорной вероятности классов проводилось выравнивание числа обучающих реализаций для каждого из рассматриваемых классов.

В процессе решения задачи возникает проблема оптимизации признакового пространства. Для отбора наиболее информативных признаков наиболее часто применяется жадный алгоритм прямого отбора. Недостатком данного алгоритма является высокая чувствительность выбираемой оптимальной последовательности признаков к малым изменениям обучающего множества. В данной работе используется регуляризованный метод прямого отбора (РМПО) [12], который обладает лучшей устойчивостью по сравнению со стандартным алгоритмом, хотя при этом требует больше вычислительных затрат. Методика состоит в том, что на основе случайных возмущений обучающего множества генерируется ансамбль локально-оптимальных последовательностей признаков. Данные последовательности, как правило, различаются по составу и длине. Для получения уникального регуляризованного решения задачи из указанного ансамбля выбирается наиболее вероятная последовательность.

Приведем некоторые результаты расчетов. Первый из рассматриваемых тестовых участков (Константиновский) находится на территории Савватьевского лесничества в районе деревни Домниково. Участок содержит несколько крупных зон, соответствующих пяти типам объектов различной сложности, хорошо различающихся по текстуре: водная поверхность (Константиновский карьер), сосновый лес, зона застройки, лесопосадки и торфяное болото. *RGB*-изображение тестового участка и карта объектов приведены на рис. 1, *а* и рис. 1, *з* соответственно. Результат текстурной классификации существенно зависит от размера бегущего окна. Если размер окна выбран слишком малым, то результат текстурной классификации будет подвержен влиянию высокочастотных шумов, возникающих из-за второстепенных особенностей объектов. При слишком большом размере окна возрастает время расчетов и происходит чрезмерное сглаживание распознаваемых объектов.

Для решения задачи выбора размера бегущего окна по панхроматическому изображению участка Константиновский были рассчитаны статистики Харалика для различных размеров окна: от 7 до 217 пикселей. На основе РМПО для каждого из методов классификации были выбраны соответствующие наиболее информативные наборы признаков. При классификации данной группы объектов методом ОКБС были выбраны следующие признаки: автокорреляция, максимум вероятности, сумма квадратов и однородность. Зависимость точности классификации указанных объектов с помощью ОКБС от размера бегущего окна представлена на рис. 2. Минимальные ошибки соответствуют размеру окна в 91 пиксель. Учитывая естественный разброс значений полной вероятности ошибок (область обозначена серым цветом), мы можем заключить, что оптимальный размер окна для изображений данного пространственного разрешения лежит в диапазоне от 55 до 109 пикселей (выделено серым на рис. 2, *а*).

Изменения вероятностей ошибки пропуска цели и ложной тревоги (рис. 2, *б*, *в*) свидетельствуют, что правильный выбор окна важен для разделения зон леса, лесопосадки, застройки и торфоразработки. В выбранном диапазоне значений можно ожидать приемлемый результат для всех классов. Сравнивая результаты классифи-

кации при минимальном (55) и оптимальном (91) размерах окна (соответственно рис. 1, б, г и рис. 1, д, е), можно заключить, что наблюдаются лишь незначительные различия в точности распознавания рассматриваемых классов. Соответствующие значения полной вероятности ошибки (TE) составляют 0,051 (рис. 1, б) и 0,044 (рис. 1, д). При выборе минимального окна несколько увеличивается детализация результатов, однако при этом также растет и количество неверно классифицированных пикселей.

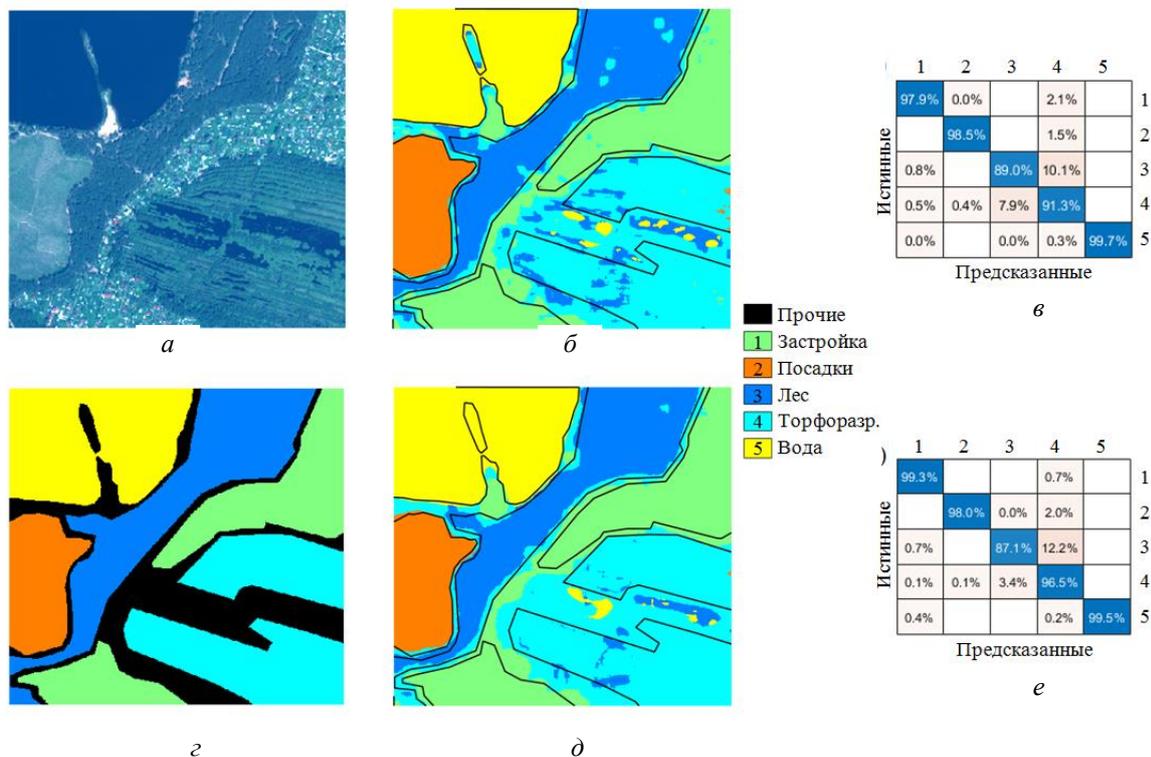


Рис. 1. Результаты текстурной классификации изображения тестового участка «Константиновский»: а – RGB-изображение; б – результат классификации методом ОКБС при размере окна 55; в – соответствующая (б) матрица ошибок; г – карта классов; д – результат классификации методом ОКБС при размере окна 91; е – соответствующая (д) матрица ошибок

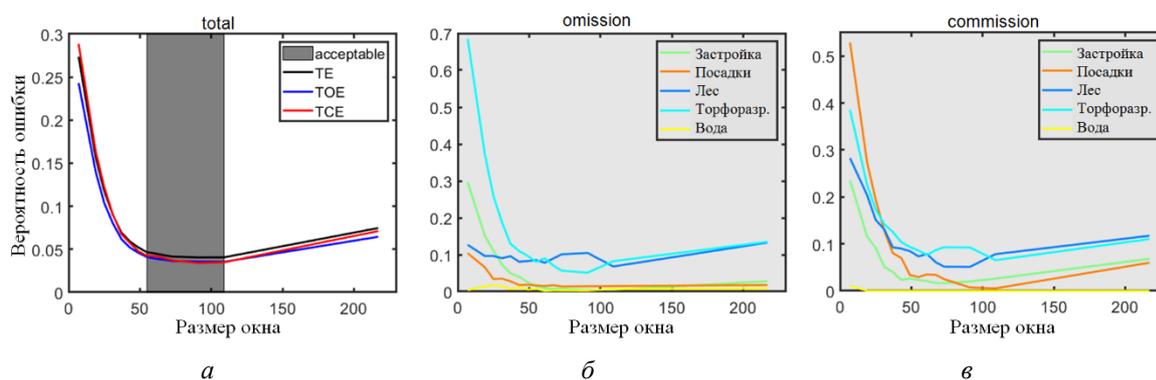


Рис. 2. Зависимости ошибок классификации от размеров бегущего окна: а – полная вероятность ошибки (TE), средние ошибки пропуска цели (ТОЕ) и ложной тревоги (ТСЕ); б – поклассовые ошибки пропуска цели; в – поклассовые ошибки ложной тревоги

Второй тестовый участок (ГПЛ Дементьева) расположен на территории Бронницкого лесничества в районе деревни Лубнинка и является частью территории географических посадок лесничего П.И. Дементьева. RGB-изображение данного участка и соответствующая карта классов представлены на рис. 3, а и рис. 3, в. Особен-

ностью Бронницкого лесничества является большое разнообразие насаждений. По разнообразию видов они охватывают основные лесообразующие породы России. С 1950-х гг. и по настоящее время в данном районе испытываются различные виды и экотипы лиственницы, которые здесь выращивают за пределами естественного ареала произрастания [13; 14]. Лесной полог тестового участка содержит семь визуально заметных текстурных классов (рис. 3, б): 1 – хвойные древостои (лиственница, сосна и ель) с плотным пологом и высокими значениями полноты; 2 и 3 – площади молодых посадок; 4 – березовый древостой с плотным пологом и полнотой 0,9; 5 – смешанный березовый древостой с полнотой 0,8; 6 – смешанный березовый древостой с выраженной кластерной структурой пород; 7 – приспевающие посадки лиственницы (полог с регулярной структурой). Результат классификации и соответствующая матрица ошибок приведены на рис. 3, в и рис. 3, г. В целом можно наблюдать приемлемый результат. Основные проблемы возникают при распознавании смешанного березового древостоя (5). Это связано с тем, что в реальности полог имеет различную плотность, и в дальнейшем для распознавания такого рода участков необходимо использовать многомасштабный подход.

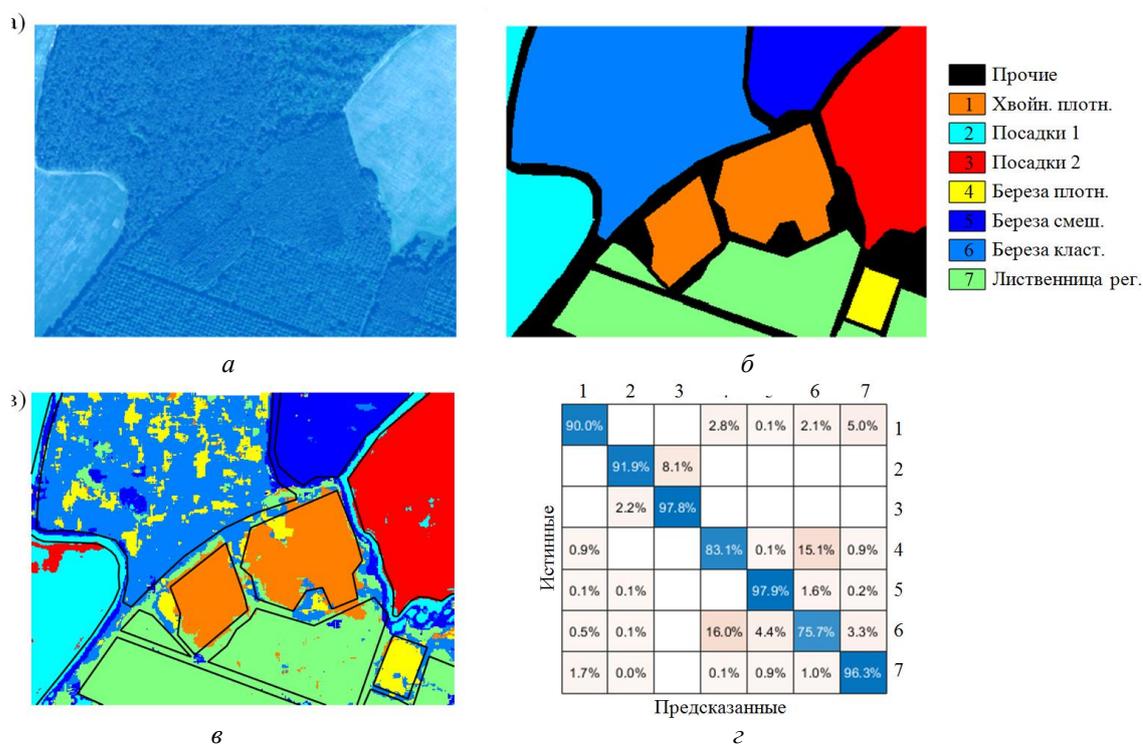


Рис. 3. Результаты текстурной классификации изображения тестового участка ГПЛ Дементьева: а – RGB-изображение; б – карта классов; в – результат классификации методом МСК-МОВ при размере окна 55; г – матрица ошибок

Таблица

Вероятности ошибок текстурной классификации изображений выбранных тестовых участков различными методами

Участок	Обозначение	МБЦ	ОКБС	МСК-МОВ
Константиновский	ТЕ	0,087	0,047	0,029
	ТОЕ	0,078	0,041	0,025
	ТСЕ	0,081	0,044	0,024
ГПЛ Дементьева	ТЕ	0,202	0,156	0,116
	ТОЕ	0,192	0,145	0,096
	ТСЕ	0,231	0,208	0,180

Полные вероятности ошибок классификации различными методами представлены в таблице. Несмотря на разницу в наборах распознаваемых классов, результат сравнения точности методов получится одинаковым для обоих участков. Наибольшую точность имеет ансамблевый подход МСК-МОВ. Несколько хуже показал себя метод ОКБС, однако соответствующие ошибки также находятся на приемлемом уровне. МБЦ имеет приемлемую точность для тестового участка Константиновский, однако для более сложного случая классификации лесных структур территории ГПЛ Дементьева данный подход является слабым.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00370 «Фундаментальные проблемы повышения информативности обработки данных оптоэлектронных авиакосмических устройств высокого пространственного и спектрального разрешения».

Список литературы

1. Ozdemir I., Karnieli A. Predicting forest structural parameters using the image texture derived from WorldView-2 multispectral imagery in a dryland forest, Israel // International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011. № 13 (5). P. 701–710.
2. Muller S.J., Van Niekerk A. Identification of WorldView-2 spectral and spatial factors in detecting salt accumulation in cultivated fields // Geoderma. 2016. № 273. P. 1–11.
3. Tree species classification in tropical forests using visible to shortwave infrared WorldView-3 images and texture analysis / M.P. Ferreira, F.H. Wagner, L.E. Aragão [et al.] // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. № 149. P. 119–131.
4. Automated retrieval of forest structure variables based on multi-scale texture analysis of VHR satellite imagery / B. Beguet, D. Guyon, S. Boukir, N. Chehata // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. № 96. P. 164–178.
5. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural features for image classification // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-3. 1973. № 6. P. 610–621.
6. Spectral-texture classification of high resolution satellite images for the state forest inventory in Russia / E.V. Dmitriev, A.A. Sokolov, V.V. Kozoderov [et al.] // Proc. SPIE 11149, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology XXI. 2019. 111491J.
7. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning: Data mining, inference and prediction // Springer Series in Statistics. 2nd ed. 2008. 745 p.
8. Dietterich T.G., Bakiri G. Solving multiclass learning problems via error-correcting output codes // J. Artificial Intelligence Research. 1995. № 2. P. 263–286.
9. Scholkopf B., Smola A.J. Learning with Kernels. MIT Press, Cambridge, MA. 2002. 38 p.
10. Freidman J.H., Bentley J.L., Finkel R.A. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time // ACM Transactions on Mathematical Software. 1977. № 3. P. 209–226.
11. Combining Classifiers in the problem of thematic processing of hyperspectral aerospace images / E.V. Dmitriev, V.V. Kozoderov, A.O. Dementyev, A.N. Safonova // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2018. Vol. 54, № 3. P. 213–221.
12. Дмитриев Е.В. Классификация лесного покрова Тверской области на основе гиперспектральных аэроизображений // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 22–32.
13. Дементьев П.И. Географические посадки лиственницы в Бронницком лесничестве // Лесное хозяйство. 1957. № 2. С. 53–60.
14. Тимофеев В.П. Основы лесовыращивания лиственницы // Опыт выращивания лесных культур лиственницы в РСФСР. М.: Лесн. пром-сть, 1976. С. 6–60.

E.V. Dmitriev¹, P.G. Melnik², S.A. Donskoi³,
S.A. Zotov⁴, A.A. Sokolov⁵

¹Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³Roslesinforg, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow reg., Russia

⁵Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université
du Littoral Cote d'Opale, Dunkerque, France

e-mail: yegor@mail.ru; melnik_petr@bk.ru; lesshii@bk.ru; zotov.sa@mipt.ru;
mailto:anton.sokolov@univ-littoral.fr

CLASSIFICATION OF THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE SOIL AND VEGETATION COVER BASED ON VERY-HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES

We present the results of assessing the effectiveness of the statistical texture classification of very-high resolution panchromatic satellite images WorldView-2 in order to retrieve the structural characteristics of the soil and vegetation cover and, in particular, forest areas. The substantiation of the choice of parameters of the statistical algorithm for extracting texture features is given. The comparison of the accuracy of the ensemble classification algorithm (ECOC-SVM), based on the method of error correcting output codes and some standard algorithms (MNC, OKNN). The advantage of the ensemble approach in solving this problem is shown; the ECOC-SVM method demonstrates significantly higher accuracy (97 and 88 %) when solving problems of varying degrees of complexity for the considered test.

Keywords: remote sensing, pattern recognition, texture analysis, high and very-high resolution satellite images, forest stand structure.

УДК 528.46+621.371

А.Н. Романов¹, И.В. Хвостов²

¹Доктор технических наук, ²Кандидат технических наук

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

e-mail: romanov_alt@mail.ru; ran@iwep.ru; khvostov.iwep@ya.ru

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В АРАЛО-КАСПИЙСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SMOS

Исследована сезонная и межгодовая динамика радиояркостных температур (T_B) подстилающей поверхности, измеренных со спутника *SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity)* на тестовых участках, расположенных в бассейне Аральского моря. Для водных объектов сезонные изменения T_B связаны с образованием льда на поверхности водоемов, сезонными изменениями температуры и солености воды. Для обводненных и высохших участков дна Аральского моря сезонные изменения T_B связаны с образованием сезонно-мерзлого слоя на поверхности почвы, уменьшением площади водной поверхности в результате усыхания водоёма. Разное поведение радиоизлучательных характеристик солончаков и водной поверх-

ности обуславливает специфику сезонной динамики радиоярких температур для каждого тестового участка.

Ключевые слова: Аральское море, Каспийское море, яркостная температура.

В аридных регионах Центральной Азии, испытывающих дефицит воды, первостепенное значение имеет мониторинг процессов опустынивания, активизировавшихся в 1960-х гг. в результате катастрофического усыхания Аральского моря (АМ) и продолжающихся по настоящее время [1; 2]. Площадь АМ сократилась с 68 тыс. км² в 1960-х гг. до менее чем 10 тыс. км² в 2015 г. Для оценки площадей водной поверхности АМ использовались данные спутникового зондирования [3]. В результате многолетнего усыхания АМ море распалось на Малое Аральское море (МАМ) (на севере) и Большое Аральское море (БАМ) (на юге), которое впоследствии распалось на западную (глубоководную) и восточную части. К 2014 г. восточная часть БАМ полностью высохла, оставив после себя обнаженное дно, на месте которого образовалась песчано-солончаковая пустыня Аралкум [4].

В данной работе приведен анализ сезонной и межгодовой динамики радиоярких температур подстилающей поверхности, измеренных со спутника *SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity)* на тестовых участках, расположенных в бассейне АМ. Для сравнения выбраны тестовые участки в северной части Каспийского моря (с сезонным образованием ледяного покрова на водной поверхности).

Микроволновое излучение подстилающей поверхности на частоте 1.41 ГГц, регистрируемое датчиками 2D-радиометра *MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis)* и откалиброванное в единицах радиоярких температур извлекалось из продуктов *SMOS* уровня обработки L1C версии v620 [5]. В исследовании приводятся значения T_B , измеренные при угле зондирования 42.5° на горизонтальной поляризации, при этом продольное и поперечное пространственное разрешение радиометра составляет 64 и 35 км соответственно. Данные L1C географически привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4N9 [6] с линейным размером ячеек ~16 км. Значения T_B в продукте L1C для любой ячейки определяются участком земной поверхности площадью ~1 800 км². В случае пространственно неоднородной подстилающей поверхности, включающей в себя ландшафты с резко различающимися излучательными характеристиками, измеренные значения T_B представляют собой суперпозицию T_B этих ландшафтов с учетом вклада их площадей в суммарную площадь излучающего участка.

На рис. 1 отмечены исследуемые ячейки геодезической сетки: 1 – северная часть Каспийского моря, 2 – западная часть БАМ, 3 – Малое Аральское море, 4 – солончак, образовавшийся при высыхании АМ.

На рис. 2 даны графики динамики T_B для тестовых участков. По оси абсцисс отложены значения юлианского дня JD_{2016} , отсчитываемого от начала периода наблюдения (01.01.2016).

Приведенная на рис. 2.1 сезонная динамика $T_B(JD)$ характерна для водоемов с сезонным ледяным покровом, образующимся на поверхности воды. С точностью до суток определяются временные границы четырех фаз ледового режима: 1 – открытая вода ($JD_1 \div JD_2$); 2 – образование ледяного покрова с толщиной льда d не превышающей величины его скин-слоя L ($JD_2 \div JD_3$); 3 – установившийся ледяной покров с толщиной льда $d \geq L$ ($JD_3 \div JD_4$); 4 – таяние ледяного покрова ($JD_4 \div JD_1$).

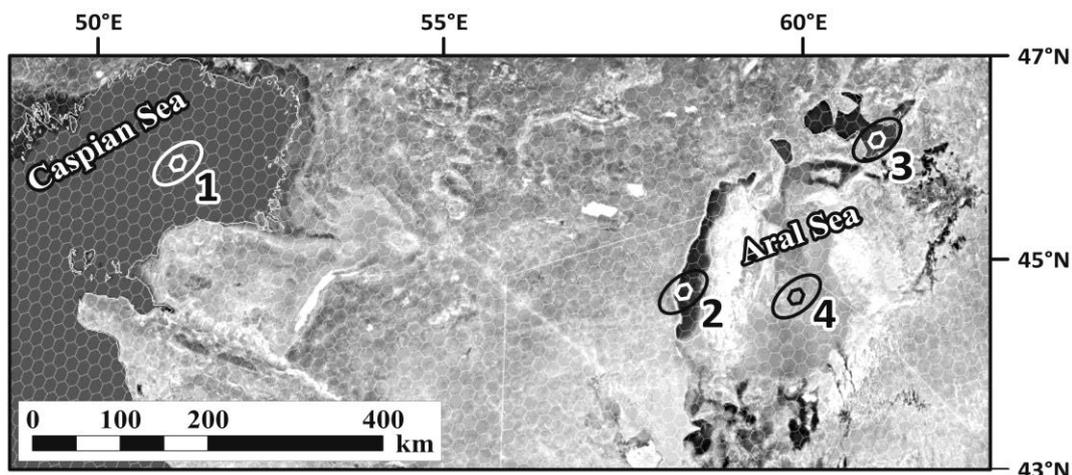


Рис. 1. Карта схема Арало-Каспийского региона с тестовыми ячейками DGG ISEA 4H9

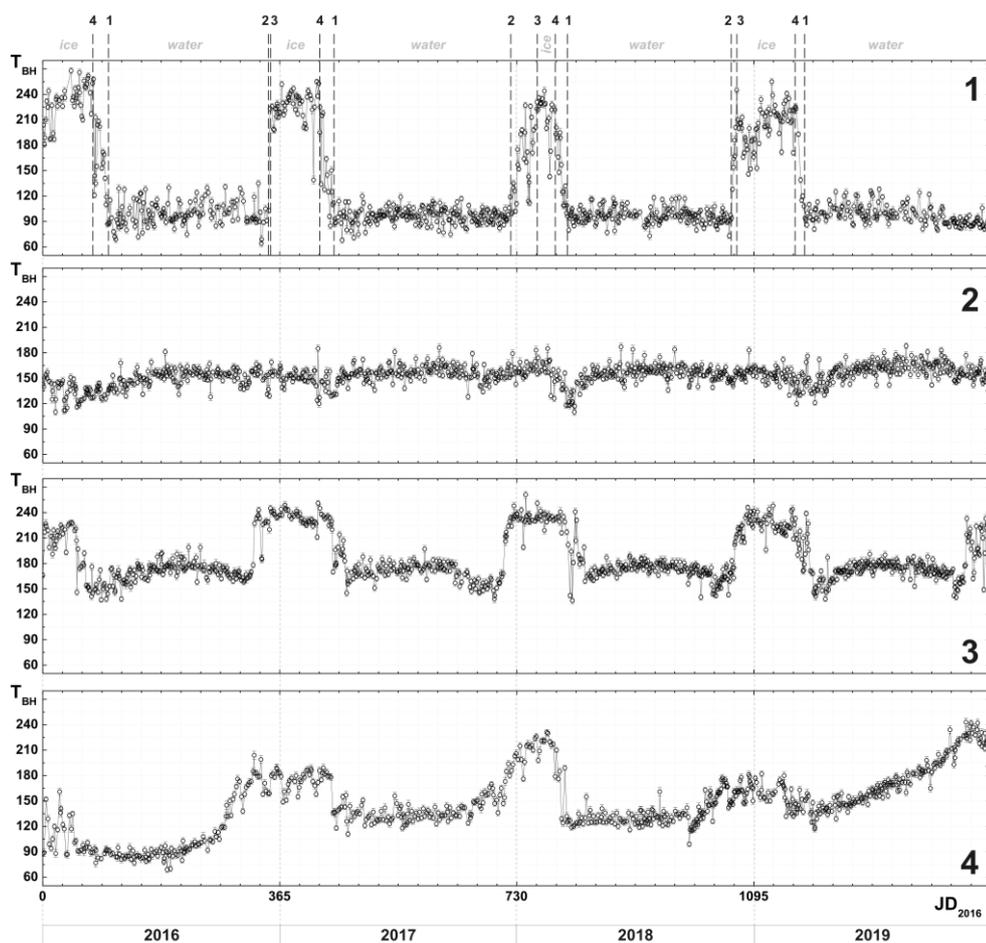


Рис. 2. Сезонная динамика радиояростных температур на тестовых участках

На рис. 2.2 приведена зависимость $T_B(JD)$ для глубоководной части БАМ. Наблюдаемые вариации $\Delta T_B \approx 10\text{--}15$ К связаны с сезонными изменениями температуры и солёности воды. Динамика $T_B(JD)$ для МАМ, представленная на рис. 2.3, свидетельствует о ежегодных процессах образования на поверхности воды ледяного покрова и его таяния.

На рис. 2.4 приведена $T_B(JD)$ для солончака, образовавшегося на месте высохшего дна Аральского моря. Изменение годовой динамики $T_B(JD)$ в 2012–2019 гг. указывает на происходящие гидрологические изменения. Численные значения

$T_B \approx 90\text{--}100$ К соответствуют открытой водной поверхности, возрастание T_B до 250 К может быть вызвано уменьшением площади водной поверхности. Сезонные изменения T_B от 200 до 270 К связаны с сезонными вариациями термодинамической температуры (t), подстилающей поверхности. Суточные вариации T_B , достигающие в холодный период 40 К, вызваны суточными колебаниями температуры вблизи 0 °С (днем $t > 0$ °С, ночью $t < 0$ °С) и объясняются процессами замерзания и оттаивания поверхностного слоя почвы.

Видно, что обводненные и высохшие участки дна Аральского моря характеризуются разными зависимостями $T_B(JD)$, изучение которых позволяет установить скорости гидрологических изменений и оценить их влияние на климат. Разное поведение радиоизлучательных характеристик солончаков и водной поверхности обуславливает специфику зависимостей $T_B(JD)$ для каждого тестового участка.

Экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-00753.

Список литературы

1. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966–2015 / H. Guo, A. Bao, T. Liu [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 624. P. 1523–1538.
2. Spatial survey of environmental indicators for Kazakhstan: An examination of current conditions and future needs / A. Russell, M. Ghalaieny, B. Gazdiyeva [et al.] // *International J. of Environmental Research*. 2018. Vol. 12, № 5. P. 735–748.
3. On the desiccation of the south aral sea observed from spaceborne missions / A. Singh, A. Behrangi, J.B. Fisher, J.T. Reager // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, № 5. DOI: 10.3390/rs10050793.
4. The Aralkum – a man-made desert / S.W. Breckle, W. Wucherer, L. Dimeyeva, N. Ogar (eds) // *Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. 2011. Vol. 218. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-21117-11.
5. Gutierrez A., Castro R., Vieira P. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0009. № 2.14. 2014. 80 p. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models.
6. Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic discrete global grid system // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. Vol. 30, № 2. P. 121–134.

A.N. Romanov, I.V. Khvostov

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS Barnaul, Russia
e-mail: romanov_alt@mail.ru; ran@iwep.ru; khvostov.iwep@ya.ru

REMOTE ESTIMATION OF HYDROLOGICAL-CLIMATIC CHANGES IN THE ARALO-CASPIAN LOWLANDS BASED ON THE SMOS SATELITE DATA

The seasonal and interannual dynamics of the brightness temperatures (T_B) of the underlying surface, obtained from the SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) satellite at test sites located in the Aral Sea basin, have been investigated. For water bodies, seasonal dynamics in T_B are associated with ice mode, seasonal changes in temperature and salinity. For the flooded areas and dried-up areas of the bottom of the Aral Sea, seasonal changes in T_B are associated with the formation of a seasonally frozen layer on the soil surface and a decrease in the areas of water bodies as a result of drying out. The different behavior of the radio-emitting characteristics of salt marshes and the water surface determines the specificity of the seasonal dynamics of brightness temperatures for each test site.

Keywords: Aral Sea, Caspian Sea, brightness temperature.

Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев

Кандидат физико-математических наук,
Научная станция РАН в Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

ЭФФЕКТЫ КОГЕРЕНТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ СИЛЬНЫМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ

Проанализированы данные спутниковых измерений температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы над эпицентральной областью сильного землетрясения магнитудой $M = 7.3$ в северном Тянь-Шане. Применение вейвлет-преобразования позволило выявить признаки аномального поведения, временной и спектральной когерентности вариаций температуры, предшествующие сейсмическому событию.

Ключевые слова: Тянь-Шань, землетрясение, спутниковые измерения, температура, аномалия, вейвлет-преобразование, спектр, когерентность.

Введение. Прогресс в развитии и совершенствовании спутниковых технологий, а также доступность большого количества специализированных сервисов и баз данных определил широкое использование результатов дистанционного зондирования применительно к изучению взаимодействия между различными геофизическими процессами, в частности сейсмическому мониторингу [1]. В исследованиях атмосферных эффектов, обусловленных воздействием сильных землетрясений, важной физической характеристикой, которая описывает динамику и состояние атмосферы, является температура. Задача выделения предсейсмических признаков аномального поведения во временных рядах температуры может решаться на основе использования соответствующих алгоритмов [2; 3] и методики вейвлет-анализа с учетом особенностей изменения амплитуды, фазы и спектра вариаций температуры на разделенных тропопаузой уровнях верхней тропосферы / нижней стратосферы (*Upper Troposphere / Lower Stratosphere, UTLS*). В настоящем исследовании изложены результаты выделения эффектов временной и спектральной когерентности в вариациях температуры *UTLS* над эпицентральной областью землетрясения магнитудой $M = 7.3$.

Данные сейсмических и температурных измерений. В Северном Тянь-Шане 19 августа 1992 г. в 02:04:37 (UTC) на глубине ~ 27 км произошло сильное землетрясение магнитудой $M = 7.3$ (42.142°N ; 73.575°E). Фрагмент карты афтершокового поля Суусамырского землетрясения приведен на рис. 1, *a*. В течение дня было зарегистрировано 20 афтершоков с магнитудами от 3.8 до 6.3. На рис. 1, *b* показана гистограмма распределения числа землетрясений, зарегистрированных сейсмологической сетью *KNET* в период 1991–1993 гг. Резкая активизация сейсмичности плавно убывала до фоновых значений в конце 1993 г. Температурные данные системы реанализа *MERRA-2* [4] основаны на спутниковых наблюдениях, прошедших обработку в глобальной модели, и представляют собой синтезированные значения температуры на стандартных изобарических уровнях от 450 до 70 hPa с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.625^\circ$. Дискретизация по времени составляла $\Delta t = 3h$, что обеспечило приемлемую детализацию процесса формирования аномалий.

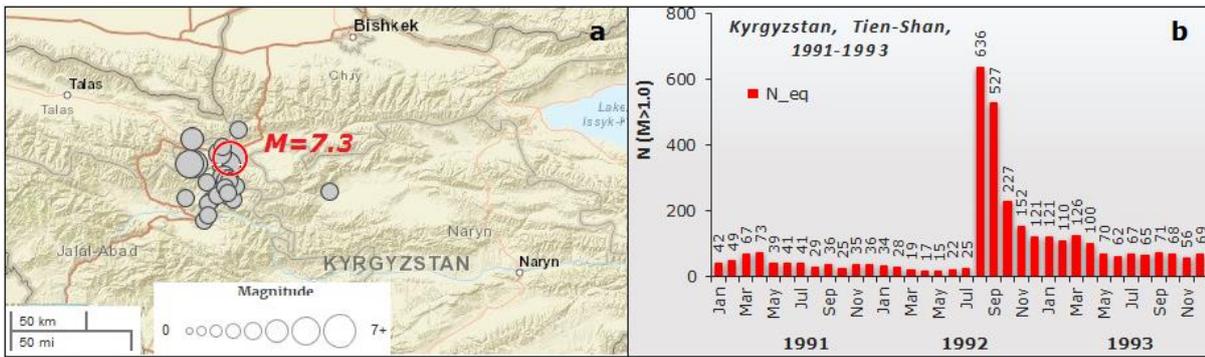


Рис. 1. Афтершоковое поле землетрясения $M = 7.3$ (Северный Тянь-Шань) 19.08.1992 (a) и распределение количества землетрясений за каждый месяц 1991–1993 гг. (b)

Выделение аномалий температуры. Годовой ход изменения температуры на изобарических уровнях от 300 до 100 hPa в 1992 г. (рис. 2, a) имел сложный характер и представлял собой сезонный тренд, модулированный различными короткопериодными составляющими.

Результаты диагностирования аномалий температуры в разделенных тропосферными слоями 300 и 100 hPa с применением алгоритма, описанного в [3], показали хорошо выраженный всплеск в значениях параметра $D_{\delta T} = 2.5$ за несколько суток до сейсмического события магнитудой $M = 7.3$ (рис. 2, b), что позволяет предполагать связь с периодом подготовки землетрясения.

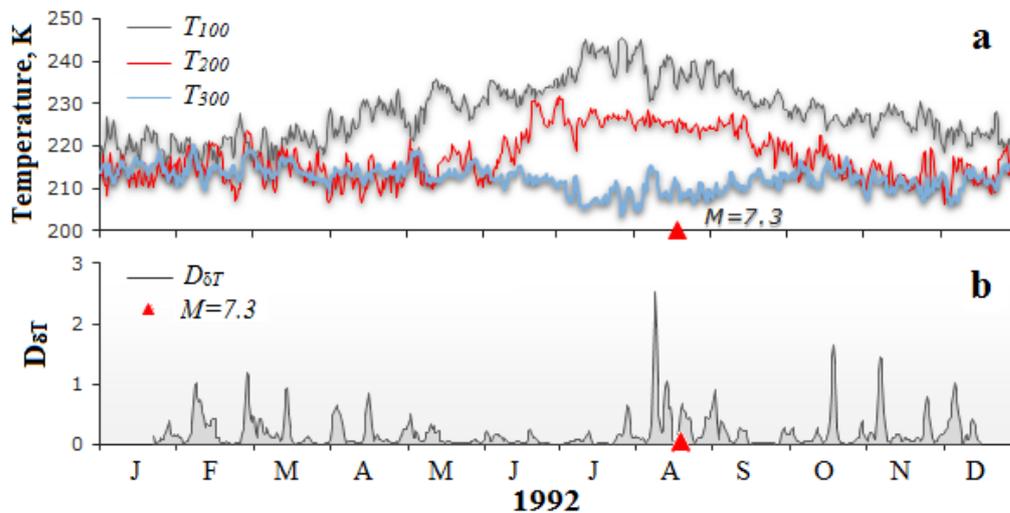


Рис. 2. Вариации температуры на изобарических уровнях 300, 200 и 100 hPa (a) и изменения интегрального параметра аномальных вариаций $D_{\delta T}$ (b) в 1992 г.

Оценки изменения спектральной меры когерентности вариаций температуры. Вейвлет-спектрограммы временных рядов температуры на уровнях 300 и 100 hPa (рис. 3), построенные для диапазона периодов от 0,125 до 64 суток, демонстрируют изменение их частотных свойств в течение всего исследуемого периода. Особенностью представленных спектрограмм являются хорошо выраженные интенсивные колебания в диапазоне периодов 6–12 суток в первые декады августа, при том что в динамике спектра вариаций в 1992 г. не отмечалось ни одного другого одновременно проявляющегося на обоих изобарических уровнях и столь же значительного возмущения температуры. Выделенная частотно-временная аномалия совпадает с полученными экспериментально оценками, используемыми в расчетах интегральных показателей [3].

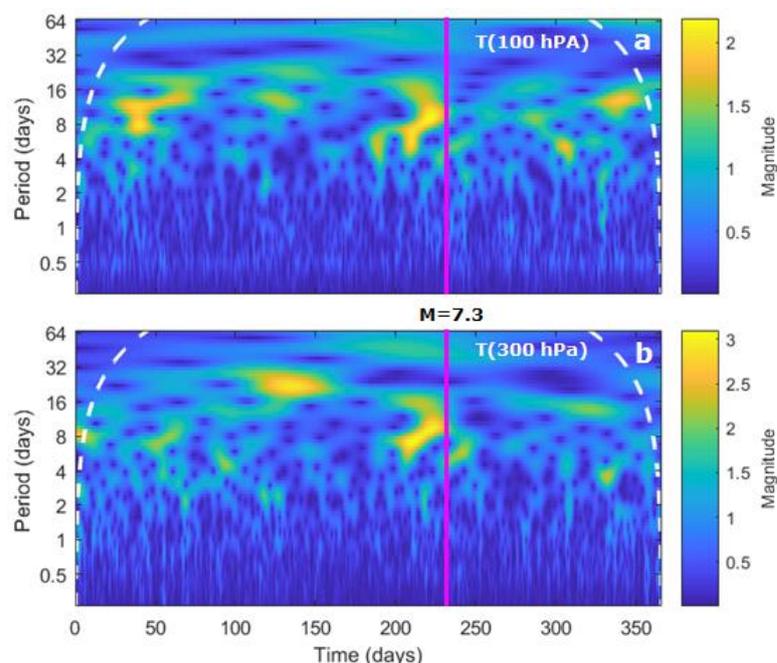


Рис. 3. Динамика спектров вариаций температуры на уровнях 100 и 300 hPa в 1992 г.

Для анализа согласованной изменчивости и статистической взаимосвязи между вариациями температуры в разделенных тропопаузой областях атмосферы над эпицентральной областью землетрясения производился расчет спектральной меры когерентности (рис. 4).

Представленная диаграмма изменения во времени квадрата когерентности между коэффициентами вейвлет-преобразования спектров вариаций температуры двух временных рядов на изобарических уровнях 300 и 100 hPa характеризует корреляции, которые существуют между отдельными спектральными компонентами. Эффект сильной когерентности вариаций проявлялся в диапазоне периодов 4–16 суток. Направление стрелок указывает на противофазный характер колебаний.

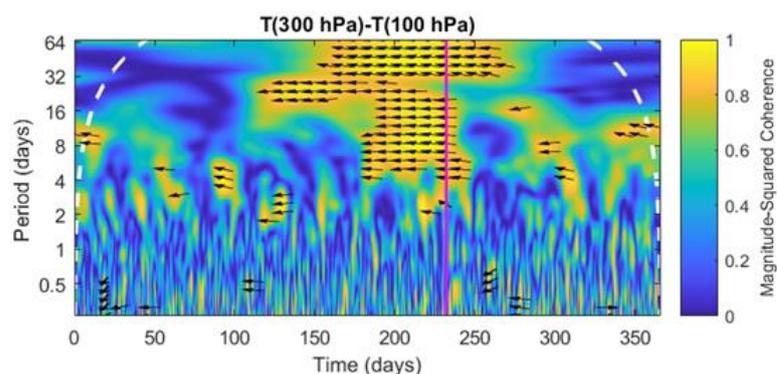


Рис. 4. Квадрат когерентности между коэффициентами вейвлет-преобразования спектров вариаций температуры двух временных рядов на изобарических уровнях 300 и 100 hPa в 1992 г. Вертикальная линия – момент землетрясения $M = 7.3$

Заключение. Результаты анализа данных спутникового дистанционного зондирования показали, что над эпицентральной областью сильного землетрясения магнитудой $M = 7.3$ наблюдались аномальные изменения температуры в области тропопаузы. Исследование динамики периодичностей выявило эффекты когерентного поведения температуры в области *UTLS* в интервале периодов от 6 до 12 суток, предваряющие активизацию сейсмического режима на территории Северного Тянь-Шаня.

Список литературы

1. Jiao Z-H., Zhao J., Shan X. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: A review // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018. Vol. 18. № 4. P. 1013–1036. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>.
2. Sverdlik L.G., Imashev S.A. Diagnosis of atmospheric temperature anomalies in seismically active regions of asia on the basis of satellite data // J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol. 2018. Vol. 11. № 8. P. 956–963. DOI: 10.17516/1999-494X-0117.
3. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3, № 1. С. 19–26. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026.
4. URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>.

L.G. Sverdlik, S.A. Imashev

Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyzstan
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

ATMOSPHERIC TEMPERATURE COHERENT VARIATIONS EFFECTS, PRECEDING STRONG EARTHQUAKES

We analyzed satellite measurements of temperature in the zone of troposphere and stratosphere separation above the epicentral area of a strong earthquake of $M = 7.3$ in the Northern Tien-Shan. Application of wavelet transform allowed to detect manifestations of abnormal behavior, temporal and spectral coherence of temperature variations, preceding a seismic event.

Keywords: Tien-Shan, earthquake, satellite measurement, temperature, anomaly, wavelet transform, spectrum, coherence.

**А.А. Соколов¹, Е.В. Дмитриев²,
И. Челиотис³, Э. Дельбар⁴, Э. Дьедонне¹,
П. Агустан¹, М. Фурмантен¹**

¹Кандидат физико-математических наук, Лаборатория физики и химии атмосферы
Университета Литтораль Опалового берега, Дюнкерк, Франция,

²Кандидат физико-математических наук,

Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

³Лаборатория физики и химии атмосферы

Университета Литтораль Опалового берега, Дюнкерк, Франция

⁴Профессор, PhD, HDR, Лаборатория физики и химии атмосферы

Университета Литтораль Опалового берега, Дюнкерк, Франция

e-mail: anton.sokolov@univ-littoral.fr; yegor@mail.ru;

ioannis.cheliotis@etu.univ-littoral.fr; herve.delbarre@univ-littoral.fr;

elsa.dieudonne@univ-littoral.fr; augustin@univ-littoral.fr;

fourment@univ-littoral.fr

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ МУЛЬТИКЛАССИФИКАТОРНОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ДОПЛЕРОВСКОГО ЛИДАРА

Представлены алгоритмы и результаты автоматизированной обработки данных лидарных измерений, проводимых в рамках измерительной кампании VEGILOT в Париже осенью 2014 г. с целью определения горизонтальных турбулентных режимов атмосферы на городских масштабах. На основе дистанционных и локальных измерений была построена база данных. Для обработки изображений, полученных в результате горизонтального сканирования с помощью доплеровского лидара, использовались методы текстурного анализа и классификации с помощью алгоритмов машинного обучения с учителем. Результаты параллельной классификации различными методами были объединены с помощью стратегии объединения «голосование большинством» (*Majority Voting*). Полученные оценки точности демонстрируют эффективность предлагаемого подхода для решения задачи дистанционного определения турбулентных структур в атмосфере.

Ключевые слова: распознавание образов, ансамблевые классификаторы, текстурный анализ, лидарные измерения, региональные атмосферные явления, турбулентные структуры.

Турбулентность атмосферы является ключевой метеорологической характеристикой, отвечающей за распространение загрязнений в воздухе и за формирование облачности. Оценка параметров турбулентности и классификация турбулентных режимов становятся возможными при наличии измерений радиальной скорости ветра с высоким временным и пространственным. Так, например, наземный Доплеровский лидар *Leosphere WLS100* позволяет дистанционно измерять профиль радиальной скорости ветра с временным разрешением порядка одного измерения в секунду с пространственным разрешением 50 м.

Используемая в настоящей работе база данных была сформирована на основе измерений, произведенных в ходе измерительной кампании VEGILOT [1] в Париже в сентябре – октябре 2014 г., направленной на исследование динамики атмосферы

и определение степени загрязнения городского воздуха. Одной из основных задач этой измерительной кампании является исследование турбулентных атмосферных режимов на основе лидарных данных.

На рис. 1 представлены типичные изображения горизонтальной радиальной турбулентности, полученные в ходе горизонтального лидарного сканирования радиальной скорости ветра (см. работы [2; 3]).

Были выделены четыре класса: термики (*thermals*), роллы (*rolls*), струи (*streaks*) и прочие (*others*). Класс «термики» связан с образованием ячеек интенсивной конвекции, «роллы» возникают при наличии сильного ветра и сонаправлены с ним, класс «струи» соответствуют струйным течениям в нижней атмосфере (см. [4]). Каждая из подобных турбулентных структур формируют облачность и может наблюдаться на спутниковых снимках.

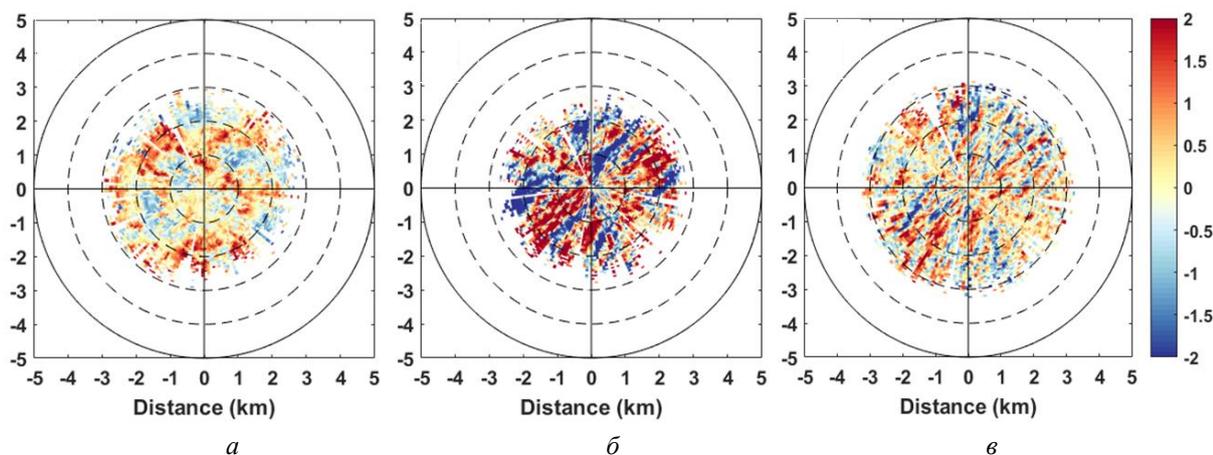


Рис. 1. Примеры изображений радиальных турбулентных структур:
a – термики, 16 сентября, 1252 UTC;
б – роллы, 13 октября, 1250 UTC; *в* – струи, 9 сентября, 2049 UTC

В ходе измерительной кампании было получено несколько тысяч таких изображений, и для их классификации было решено использовать следующие алгоритмы машинного обучения с учителем:

- метод парзеновского окна (*PRW*);
- метод *K*-ближайших соседей (*KNN*);
- метод опорных векторов (*ECOC SVM*);
- квадратичный дискриминантный анализ (*QDA*).

Для метода *KNN* были протестированы значения $K = 1$, $K = 3$ и $K = 5$.

Для построения обучающей выборки было использовано 150 реализаций, для которых эксперт, наряду с данными лидара, проводил классификацию с использованием спутниковых и локальных метеорологических данных.

Поскольку данным алгоритмам требуются числовые значения, характеризующие изображения, была применена методика текстурного анализа на основе признаков Харалика [5]. Для расчетов использовались следующие статистики:

- контраст;
- однородность;
- корреляция;
- энергия.

Каждая из этих характеристик была рассчитана при различных значениях расстояния и направления смежности. Для увеличения дискретности разбиения диапа-

зона возможных направлений смежности использовались соседи от первых до 30-х (см. [2; 5]). Таким образом было сгенерировано $30 \cdot 4 = 120$ функций угла. Для каждой из этих функций были рассчитаны следующие числовые характеристики:

- амплитуда (максимум – минимум);
- интеграл;
- симметрия.

К полученным $30 \cdot 4 \cdot 3 = 360$ характеристикам были добавлены три дополнительных параметра: время сканирования, скорость ветра, неоднородность скорости ветра (*cosine fit error*, [3]). Таким образом, для каждого изображения было построено 363 текстурных признака.

Поскольку размерность вектора признаков превышает количество реализаций в обучающем ансамбле, для избежания проклятия размерности, для каждого алгоритма классификации был использован пошаговый метод выбора наиболее информативных признаков (*stepwise forward selection*, см. [6]) по данным кросс-валидации. Для различных классификаторов оптимальное количество признаков [3; 6] варьируется от 2 до 20.

Различные классификаторы были объединены в суперклассификатор (далее SUP) с помощью стратегии «голосование большинством» (*majority voting*, [4]). В таблице приведены значения общей точности классификации (*total overall accuracy*, далее ТА), показывающая, на основании кросс-валидации, какой процент изображений был классифицирован правильно. Видно, что удается повысить точность за счет объединения классификаторов в суперклассификатор.

На рис. 2, а представлена матрица ошибок (*confusion matrix*) для классификатора SUP. Видно, что все типы турбулентности идентифицируются с хорошей точностью.

Обученные классификаторы были использованы для идентификации различных типов турбулентности в полной базе данных (*classification step*). Распределение по типам турбулентности показано на рис. 2, б. Как и ожидалось, струи наблюдаются в ночное время, а термики и роллы – в дневное (см. [3]).

Таблица

Общая точность классификации для различных методов

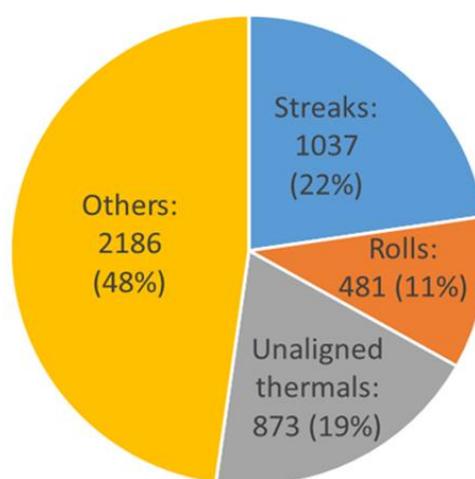
Метод	PRW	1NN	3NN	5NN	SVM	QDA	SUP
ТА, %	82,7	90	88,7	89,3	90,7	92	94,7

На основе результатов обработки большого набора лидарных данных мы можем заключить, что предложенная методика позволяет эффективно решать задачу классификации турбулентных режимов в атмосфере по данным лидарных измерений. Проведенное сравнение различных алгоритмов классификации показывает, что использование более сложных алгоритмов по сравнению с QDA не приводит к увеличению точности классификации, однако при этом значимых улучшений можно добиться при использовании предложенного в данной работе ансамблевого подхода SUP.

Данная методика позволила исследовать атмосферную турбулентность в Парижском регионе в осенний период.

Output Class	Others	58 38.7%	0 0.0%	0 0.0%	2 1.3%	96.7% 3.3%
	Streaks	0 0.0%	29 19.3%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	Rolls	0 0.0%	1 0.7%	29 19.3%	2 1.3%	90.6% 9.4%
	Thermals	2 1.3%	0 0.0%	1 0.7%	26 17.3%	89.7% 10.3%
		96.7% 3.3%	96.7% 3.3%	96.7% 3.3%	86.7% 13.3%	94.7% 5.3%
	Others	Streaks	Rolls	Thermals		
	Target Class					

a



Total: 4577 scans

b

Рис. 2. Матрица ошибок для классификатора SUP (a); распределение по классам в результате анализа всей БД лидарных измерений (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке Московского центра фундаментальной и прикладной математики (соглашение с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2019-1624).

Численные эксперименты, представленные в этой статье, проводились с использованием вычислительной платформы CALCULCO при поддержке SCoSI / ULCO (Service COmmun du Système d'Information de l'Université du Littoral Côte d'Opale, France).

Эта работа была выполнена в рамках исследовательских проектов CPER IReNE и CLIMIBIO.

Список литературы

1. Influence of vertical mixing and nighttime transport on surface ozone variability in the morning in Paris and the surrounding region / A. Klein, F. Ravetta, J.L. Thomas [et al.] // Atmos. Environ. 2019. № 197. P. 92–102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.009>.
2. Eberhard W.L., Cupp R.E., Healy K.R. Doppler lidar measurement of profiles of turbulence and momentum flux // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 1989. № 6 (5). P. 809–819. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1989\)](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1989)).
3. Detecting turbulent structures on single Doppler lidar large datasets: an automated classification method for horizontal scans / I. Cheliotis, E. Dieudonné, H. Delbarre [et al.] // Atmos. Meas. Tech. Discuss. URL: <https://doi.org/10.5194/amt-2020-82>, in review, 2020.
4. Ranawana, Romesh and Palade, Vasile. Multi-Classifer Systems: Review and a Roadmap for Developers. 1 Jan. 2006: 35 – 61.
5. Haralick R.M., Dinstein I., Shanmugam K. Textural features for image classification // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1973. SMC-3(6). P. 610–621. URL: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>.
6. Automated classification of regional meteorological events in a coastal area using in-situ measurements / A. Sokolov, E. Dmitriev, C. Gengembre, H. Delbarre // J. Atmos. Ocean. Technol. 2020. JTECH-D-19-0120.1. URL: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0120.1>.

A.A. Sokolov¹, E. V. Dmitriev², I. Cheliotis¹,
H. Delbarre¹, E. Dieudonné¹,
P. Augustin¹, M. Fourmentin¹

¹Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université
du Littoral Cote d'Opale, Dunkerque, France

²Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: anton.sokolov@univ-littoral.fr; yegor@mail.ru;
ioannis.cheliotis@etu.univ-littoral.fr; herve.delbarre@univ-littoral.fr;
elsa.dieudonne@univ-littoral.fr; augustin@univ-littoral.fr;
fourment@univ-littoral.fr

AUTOMATED MULTI-CLASSIFIER RECOGNITION OF ATMOSPHERIC TURBULENT STRUCTURES OBTAINED BY DOPPLER LIDAR

We present algorithms and results of automated processing of LiDAR measurements obtained during VEGILOT measuring campaign in Paris in autumn 2014 in order to study horizontal turbulent atmospheric regimes on urban scales. These remote and in-situ measurements were organized as a database. To process images obtained as a result of horizontal scanning using Doppler LiDAR, we proposed the method based on texture analysis and classification using supervised machine learning algorithms. The results of the parallel classification by various classifiers were combined using the majority voting strategy. The obtained estimates of accuracy demonstrate the efficiency of the proposed method for solving the problem of remote sensing of regional-scale turbulent patterns in the atmosphere.

Keywords: Pattern recognition, ensemble classifiers, texture analysis, LIDAR measurements, regional-scale atmospheric phenomena, turbulent structures.

УДК 528.85; 528.8(15); 520.6.05; 502.171; 556.182

А.Г. Терехов^{1,2}, Н.Н. Абаев^{2,3}

¹Кандидат технических наук, Институт информационных
и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан

²Научно-исследовательский центр, РГП «Казгидромет», Алматы, Казахстан

³Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан
e-mail: aterekhov1@yandex.ru; abayev_n@meteo.kz

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ УСЛОВИЙ МАЛОВОДЬЯ В КИТАЙСКОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА РЕКИ ИЛИ В СЕЗОНЕ 2020 ГОДА

Рассмотрены возможности спутникового мониторинга бассейна трансграничной реки Или (КНР – Казахстан). Недостаток гидрологической информации с территории КНР может восполняться с помощью спутникового мониторинга. Сезон 2020 г. характеризовался существенными отрицательными аномалиями водного эквивалента снежного покрова в зонах формирования стока реки (хребты Тянь-Шаня). Календарные даты начала сезонного пополнения доминирующих водохранилищ в китайском секторе бассейна были смещены на более

поздние сроки, что указывает на дефицит воды в основных притоках реки Или. Спутниковые оценки расхода воды в реке Или на границе КНР – Казахстан свидетельствуют об острой маловодности июня и первой половины июля – менее 30 % от климатической нормы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, бассейн трансграничной реки Или, снежный покров, сезонное пополнение водохранилищ, расход воды в реке.

Трансграничный бассейн реки Или площадью около 140 тыс. км², верховья которого относятся к КНР (Синьцзян-Уйгурский автономный район), а нижняя часть – к Казахстану, расположен в аридной зоне Центральной Азии. Река собирает воду в хребтах Северного, Восточного и Внутреннего Тянь-Шаня. Водные ресурсы этой реки по большей части формируют одно из крупнейших озер мира – озеро Балхаш (18 тыс. км²). Ресурсы реки активно используются в народном хозяйстве, особенно на территории КНР, где проживает большая часть населения ее бассейна. Резко континентальный климат Центральной Азии продуцирует значительные вариации в водности сезона. Годовой объем стока реки Или на границе с Казахстаном может варьироваться примерно от 9 (1992) до 14 (1958) км³.

В условиях значительной антропогенной нагрузки в верхней, китайской, части бассейна информация о режиме водности года, определяемом погодными условиями, очень важна для эффективного водопользования в нижнем, казахстанском секторе. Оперативная гидрологическая информация с китайского сектора бассейна для казахстанских экспертов ограничивается данными пограничного гидропоста (Сандаохэцзы), чего недостаточно для прогноза водности сезона [1]. Это обстоятельство определяет актуальность, для казахстанских профильных организаций, спутниковых оценок водности сезона для верховий реки Или.

Региональная система мониторинга, разработанная для территории СУАР КНР [2; 3], предназначена для анализа состояния ряда водных объектов, расположенных в трансграничных бассейнах. В бассейне реки Или наиболее значимыми являются доминирующие водохранилища, расположенные на ее основных притоках: на реке Текес – Капшагайское; на реке Каш – Жарынтайское. Также представляет интерес снежный покров бассейна реки, который формируется в холодный период и является важнейшим источником воды речного стока в теплое время.

В данной работе рассматривается текущее состояние и перспективы водности сезона реки Или на территории КНР. Главная цель спутникового мониторинга – как можно раньше зарегистрировать признаки маловодности. Маловодность сопряжена с наибольшими экономическими потерями в нижней части бассейна на территории Казахстана. Информация о водности сезона необходима для эффективного администрирования работы Капчагайского гидроузла (Казахстан), расположенного в районе крупнейшего мегаполиса Республики – города Алматы. Водоохранилище работает в энергетическом режиме, вырабатывая электроэнергию для мегаполиса Алматы. Также водохранилище должно поддерживать высокий уровень воды в нижней части русла реки Или в определенное время, чтобы обеспечить ирригацию рисовых массивов в районе поселка Баканас.

Первая половина сезона 2020 г. оказалась маловодной. В связи с этим представляло интерес проанализировать, каким образом система регионального спутникового мониторинга СУАР может характеризовать гидрологические параметры бассейна реки Или; какие прогнозы по водности реки Или могут быть сделаны для второй половине сезона, насколько они оправдаются.

Первый параметр, характеризующий потенциальную водность сезона, – снежный покров бассейна реки Или. Продукт *Snow Water Equivalent Anomaly* от про-

граммы *Famine Early Warning System NET (SWEA FEWS NET)* доступен на свободной основе на сайте программы (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/>). По данным на 30 апреля 2020 г., в хребтах Тянь-Шаня, которые служат источником стока реки Или, регистрированы запасы снега существенно ниже нормы (рис. 1).

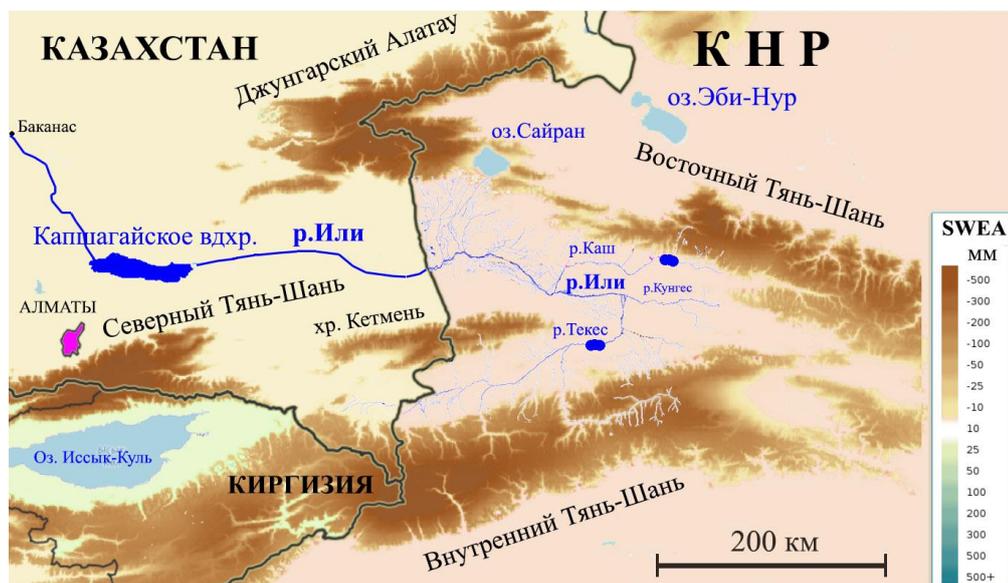


Рис. 1. Аномалии водного эквивалента снежного покрова (*Snow Water Equivalent Anomaly (SWEA)*) в районе трансграничного бассейна реки Или. Построено по данным *SWEA FEWS NET* на 30 апреля 2020 г.

Вторым параметром, связанным с водностью сезона, является календарные даты заполнения крупнейших водохранилищ в китайском секторе бассейна реки Или. Маловодный режим сдвигает на более поздние даты календарные сроки заполнения основных водохранилищ, в частности Капшагайского на реке Текес и Жарынтайского на реке Каш. Сельскохозяйственное водопользование начала лета требует большого количества воды, и в условиях маловодья ресурсов на сезонное пополнение резервуаров не остается. В конце лета (август) потребность воды в сельском хозяйстве значительно уменьшается, появляется возможность заполнения водохранилищ крупных гидроузлов. Однако такой режим продуцирует острое антропогенное маловодье реки Или в Казахстане. Многолетний спутниковый мониторинг запасов воды в этих резервуарах, базирующийся на оценках размеров водных зеркал, показал, что в первой половине сезона 2020 г. заполнение водохранилищ шло очень медленно, с графиком близким к 2014 г., когда наблюдалось исключительное маловодье (рис. 2).

Третьим параметром являются спутниковые оценки расхода воды в реке Или в районе границы КНР – Казахстан. Гидрологическая информация не попадает в программу международного обмена Всемирной метеорологической организации, и поэтому данные о расходе воды в реках не имеют свободного распространения. Спутниковые снимки с разрешением 20–30 м (*Landsat-7, 8* и *Sentinel-2A*) свободного доступа достаточно часто покрывают территорию в районе границы КНР – Казахстан, раз в неделю и чаще. Для крупных рек, протекающих по слабонаклоненным равнинам в аридном климате с неразвитой древесной растительностью, спутниковые снимки с разрешением 20–30 м позволяют оценивать расход воды. Сезон 2020 г. по расходу воды в реке Или начинался как обычный, но со второй половины мая расход воды начал резко падать. В период июня – начала июля регистрировалось исключительное маловодье. Расход воды в реке оценивался как более чем в 4 раза меньше климатической нормы (рис. 2).

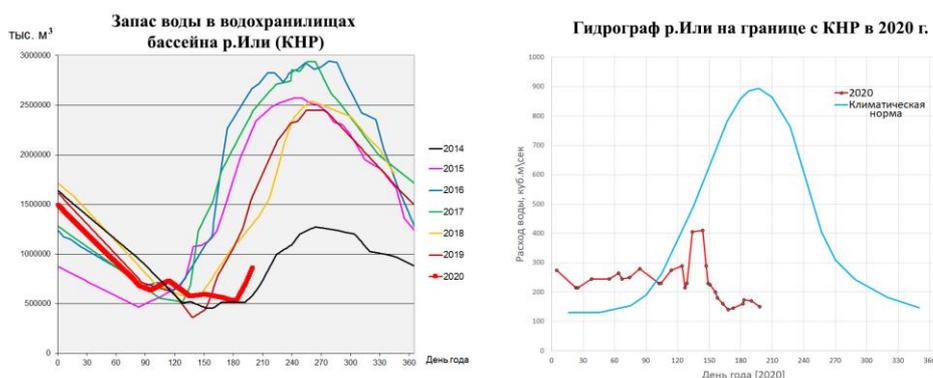


Рис. 2. Динамика суммарных запасов воды в рабочих частях основных водохранилищ (Капшагайское и Жарынтайское) в китайской части бассейна реки Или в период 2014–2020 гг., а также спутниковые оценки расходов воды в реке Или на границе с КНР

Таким образом, система регионального спутникового мониторинга СУАР КНР регистрирует по всем основным параметрам маловодность сезона для реки Или в 2020 г.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты AP08957394; AP05134241.

Список литературы

1. Соглашение между Правительством Республики Казахстан и Правительством Китайской Народной Республики о сотрудничестве в сфере использования и охраны трансграничных рек // Постановление Правительства Республики Казахстан от 10.09.2002 № 989. URL: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/P020000989>.
2. Терехов А.Г. Принципы спутникового мониторинга трансграничных речных бассейнов на примере территории СУАР КНР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М: ИКИ РАН, 2019. С. 538. DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.
3. Терехов А.Г., Пак А.А. Состояние и перспективы развития системы дистанционного зондирования Синьцзян-Уйгурского автономного района КНР // Сб. материалов 6-й Междунар. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». 10–13 сент. Красноярск, 2019. С. 34–36.

A.G. Terekhov^{1,2}, N.N. Abayev^{2,3}

¹Institute Informational and Computing Technology MES, Almaty, Kazakhstan

²RSE Kazhydromet, Almaty, Kazakkstan

³Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: aterekhov1@yandex.ru; abayev.nurlan@gmail.com

SATELLITE MONITORING OF LOW WATER LEVEL IN THE RIVER ILI CHINE'S AREA IN 2020

The possibilities of satellite monitoring of the River Ili river (China-Kazakhstan) are considered. The lack of China's hydrological information can be compensated by satellite monitoring. The 2020 season was characterized by significant negative anomalies of the snow water equivalent in the areas of river flow formation (Tien Shan ridges). Calendar dates for the beginning of seasonal replenishment of the dominant reservoirs in the Chinese sector of the basin were moved to a later date, indicating a water shortage. Satellite estimates of River Ili outflow on the border of China-Kazakhstan show low level in June/July, less than 30 % of the climate norm.

Keywords: remote sensing, transboundary river Ili basin, snow cover, seasonal refill of reservoir, river outflow.

В.И. Харук^{1,2}, М.Л. Двинская²

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: viharuk@ksc.krasn.ru

КЛИМАТОГЕННАЯ ДИНАМИКА ПОЖАРОВ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ СИБИРИ

Рассмотрено воздействие потепления климата на динамику частоты и площади пожаров, а также северную границу возникновения пожаров в арктическом секторе Сибири. Установлено возрастание частоты и площади (средней и суммарной) гарей и продвижение северной границы пожаров к арктическому побережью Ледовитого океана. Параметры горимости в арктической зоне, а также максимальная широта возникновения пожара коррелируют со среднелетней температурой воздуха и синхронизированы с «волнами тепла» (*heat waves*).

Ключевые слова: природные пожары, пожары в Арктике, термические точки, динамика природных пожаров.

Потепление климата в бореальной зоне повлекло возрастание частоты и площади гарей [1–4]. Проблема возрастающей горимости представляет особый интерес в северных лесах, тундре и лесотундре – зоне стока углерода, где в почвогрунтах и торфяниках сосредоточены обширные запасы углерода, высвобождение которого в форме парниковых газов в процессе горения способствует потеплению климата.

В данной работе проверяется следующая гипотеза: температурные аномалии в арктической зоне Сибири, как и в целом возрастание температуры воздуха в летний период, повлекут возрастание частоты и площади гарей, а также продвижение границы возникновения пожаров в высокие широты.

Исследуемая территория – арктический сектор Сибири севернее Полярного круга с разбивкой на три сектора, ограниченных Уральским хребтом, реками Енисей и Лена и восточной оконечностью Чукотки (рис. 1). Первый арктический сектор включает северную часть Западносибирской равнины, второй и третий – преимущественно плато и горные территории, а также прибрежные низменности Ледовитого океана.

Число пожаров определялось по термическим точкам (*hot spots*) с разрешением на местности 1×1 км [5]. Площади гарей рассчитывались по данным MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua; доступные данные ограничены 70° с.ш. [6]. Гари, наблюдаемые в разновременных данных, объединялись по признаку наличия совместных границ. Среднемесячная температура воздуха извлечена из базы данных CRU TS 4.04 (пространственное разрешение 0.5°×0.5°) [7].

В арктической зоне Сибири в целом наблюдается возрастающий тренд частоты и площади (средней и суммарной) гарей (2, 3). Во втором десятилетии среднее число пожаров превысило в 2,5 раза таковое в начале XXI столетия (рис. 3).

Наблюдается продвижение северной границы распространения пожаров (рис. 4). В секторах «Енисей – Лена» и «Лена – Чукотка» пожары уже достигли побережья Северного Ледовитого океана (рис. 1).

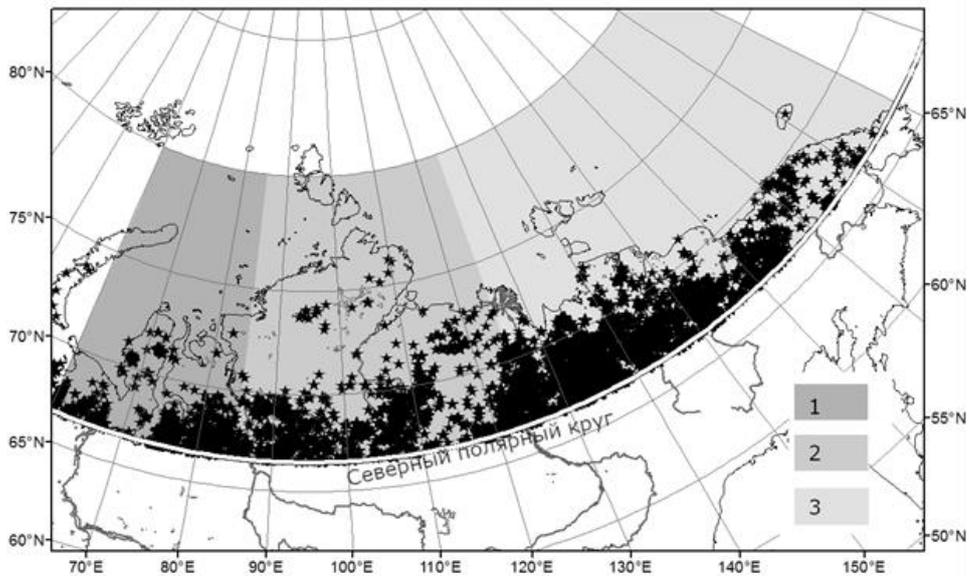


Рис. 1. Исследуемая территория расположена севернее Полярного круга и включает три арктических сектора: Урал – Енисей (1), Енисей – Лена (2) и Лена – Чукотка (3). Координаты пожаров (*hot spots*) указаны звездочками

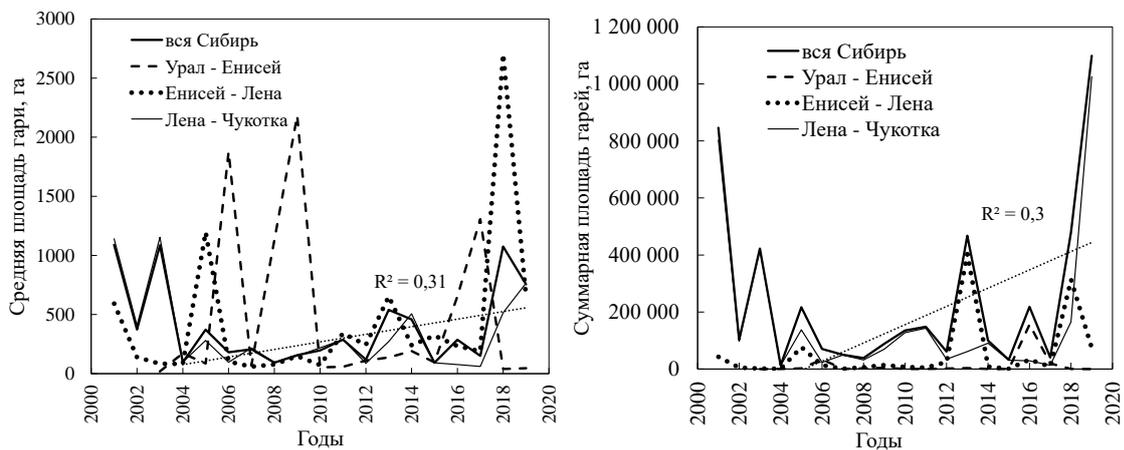


Рис. 2. Возрастающие в арктической тренды средней и суммарной площадей гарей. Значимость трендов (здесь и далее) на уровне $p < 0,05$

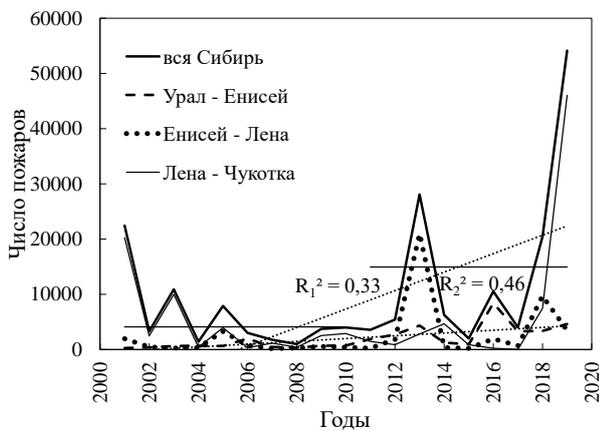


Рис. 3. Возрастающие тренды числа пожаров в целом в арктической зоне Сибири (R_1^2) и секторе «Урал – Енисей» (R_2^2) в частности. Средние значения числа пожаров за период 2001–2010 и 2011–2019 указаны прямыми (5 930 и 14 940 соответственно)

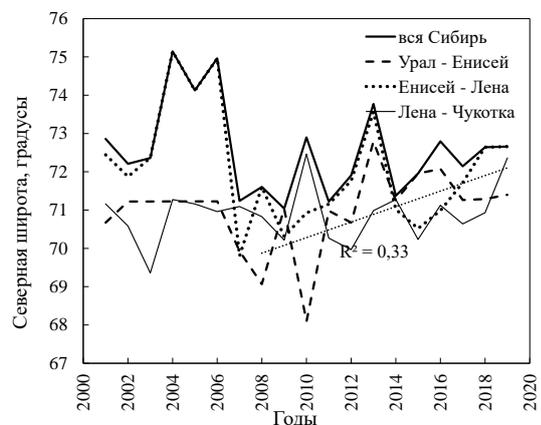


Рис. 4. Динамика северной границы распространения пожаров в арктической зоне Сибири. В секторе «Урал – Енисей» наблюдается значимый тренд продвижения пожаров на север. Координаты усреднены по трем наиболее продвинутым в высокие широты пожарам

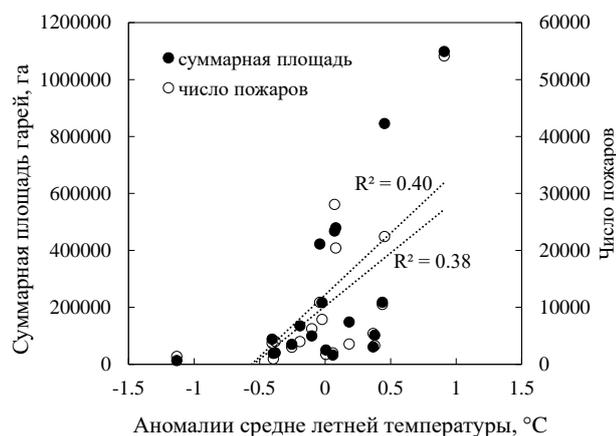


Рис. 5. Корреляционные зависимости между температурой воздуха и количеством и суммарной площадью гарей

Установлены значимые корреляции между параметрами горимости и средне-летней температурой воздуха (рис. 5), а также динамикой северной границы пожаров. Наблюдается синхронность максимумов продвижения пожаров к арктическому побережью с аномалиями температуры воздуха в летний период («волн тепла», *heat waves*). Аналогичная зависимость выявлена между частотой и площадью пожаров.

Выводы

1. В арктической зоне Сибири в XXI столетии происходит возрастание частоты и площади (средней и суммарной) гарей. Среднее число пожаров возросло в 2,5 раза во втором десятилетии по сравнению с первым.
2. Северная граница пожаров продвигается к арктическому побережью Ледовитого океана. В Восточной Сибири границы распространения пожаров в настоящее время достигли побережья Северного Ледовитого океана.
3. Параметры горимости в арктической зоне, а также максимальная широта возникновения пожара коррелируют со среднелетней температурой воздуха.
4. Экстремальные величины смещения на север границы горимости, а также частоты и площади гарей синхронизированы с «волнами тепла» (*heat waves*).
5. Обусловленное потеплением продвижение на север границ горимости, возрастание частоты и площади гарей в арктической зоне, являющейся стоком углерода, ведут к усилению выбросов парниковых газов и усилению положительной обратной связи между горимостью и температурой воздуха.

Список литературы

1. Харук В.И., Пономарев Е.И. Пожары и гари сибирской тайги // Наука из первых рук. 2020. № 87 (2). С. 56–71. URL: <https://scfh.ru/papers/pozhary-i-gari-sibirskoy-taygi/>.
2. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities / V.I. Kharuk, K.J. Ranson, M.L. Dvinskaya, S.T. Im // Environmental Research Letters. 2011. № 6. DOI:10.1088/1748-9326/6/4/045208.
3. Larch forests of Middle Siberia: Long-term trends in fire return intervals / V.I. Kharuk, M.L. Dvinskaya, I.A. Petrov [et al.] // Environmental Research Letters. 2015. № 16 (8). P. 2389–2397. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0964-9>.
4. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 / A. Krylov, J.L. McCarty, P. Potapov [et al.] // Environmental Research Letters. 2014. № 9 (105007). P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105007>.
5. MODIS Collection 6 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL. URL: <https://earthdata.nasa.gov/firms> DOI:10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14ML.006.

6. Giglio L., Schroeder W., Justice C.O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. № 178. P. 31–41.

7. Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset / I. Harris, T.J. Osborn, P. Jones, D. Lister // Sci Data. 2020. № 7. P. 109. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

V.I. Kharuk^{1,2}, M.L. Dvinskaya²

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: viharuk@ksc.krasn.ru

CLIMATOGENIC FIRES DYNAMICS IN THE ARCTIC ZONE OF SIBERIA

In this paper the impact of climate warming on the fire frequency and burned area dynamics, as well as the northern boundary of the fire occurrence in the Arctic sector of Siberia, was considered. An increase in the fire frequency and burned area (average and total) and the fires northern border advancement to the Arctic coast of the Arctic Ocean were established. The fire parameters in the Arctic zone, as well as the maximum latitude of fire occurrence, correlate with the average summer air temperature and are synchronized with the "heat waves".

Keywords: natural wildfires, Arctic wildfires, thermal points, wildfires dynamic.

Секция

**СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ
СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

УДК 004.057

М.Ф. Казаков, Ф.А. Казаков¹

¹Кандидат технических наук

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: mkazakov@sfu-kras.ru; fkazakov@sfu-kras.ru

**СПЕЦИФИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Рассмотрены вопросы организации взаимодействия узлов на борту космических аппаратов на основе перспективных технологий беспроводной связи. Выделены основные требования к показателям и управлению трафиком в бортовых сетях, связанных с особенностью взаимодействия беспроводных узлов. Приведены результаты моделирования различных алгоритмов управления доступом к среде передачи для одного из распространенных протоколов организации беспроводных сетей (IEEE 802.15.4).

Ключевые слова: бортовые сети, беспроводные технологии, малые космические аппараты, IEEE 802.15.4.

Космические системы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) на базе космических аппаратов (КА) являются одной из приоритетных областей развития [1] космической отрасли науки и промышленности.

Неуклонно растет количество и плотность спутников, ведущих съемку в различных диапазонах электромагнитного спектра с разрешением от нескольких километров до нескольких десятков сантиметров [2–6].

Одной из главных тенденций на современном этапе развития данной области является переход к использованию многоспектральных и гиперспектральных оптико-электронных систем, работающих в видимом и ИК-диапазонах и осуществляющих съемку в сотнях спектральных каналов. Такой переход является причиной увеличения информационной производительности, необходимой для обработки и передачи трафика, генерируемого в системах ДЗЗ на борту КА. Например, информационная производительность современных КА может достигать 2 Гбит/с, когда в аппаратах двадцатилетней давности данный параметр редко превышал десятки Мбит/с [7].

Современные исследования рассматривают передачу данной информации в первую очередь по каналам связи «Космос – Земля». При этом одним из перспективных направлений является организация сетей передачи данных на борту КА на основе беспроводных технологий.

Применение беспроводных сетей (БС) позволяет значительно сократить использование жгутов кабелей в составе бортовых сетей КА, что составляет до 10 % от общей массы аппарата [8–9].

Также при проектировании бортовых систем передачи данных, независимо от используемых технологий, должны учитываться требования отказоустойчивости и быстродействия [10]. В отношении беспроводных систем это решается дополнительным резервированием приемопередающих узлов и использованием протоколов с автоматическим изменением конфигурации.

В зависимости от используемых беспроводных технологий скорость передачи данных может составлять десятки Гбит/с. При определении эффективной скорости передачи необходимо учитывать совместный характер использования среды. В отличие от классических проводных технологий в БС среда передачи данных разделяется между всеми узлами на борту КА.

При выборе протоколов и проектировании алгоритмов доступа к среде необходимо учитывать ситуацию, когда будет необходимо одновременно передавать критичный к задержке трафик (управляющие сигналы и т.д.) и большие объемы от аппаратуры гиперспектральных оптико-электронных систем. В рамках информационных сетей общего пользования данная проблема решается использованием различных алгоритмов приоритезации трафика и настройкой параметров качества обслуживания.

Одним из стандартов, подходящих под специфику использования в бортовой сети КА, является IEEE 802.15.4 [11]. Он задает протокол, который определяет физический слой и алгоритм управления доступом к среде. Данный стандарт определяет два режима доступа к среде: это режим конкурентного доступа и гарантированного доступа. Первый основан на алгоритме конкурентного доступа (CSMA/CA), что не позволяет управлять параметрами качества обслуживания и допускает потери пакетов. Второй режим позволяет резервировать интервалы времени для передачи информации от ограниченного числа узлов.

Для расширения возможностей управления доступом к среде передачи и обеспечения требуемых показателей качества в нашей работе были предложены модификации протокола IEEE 802.15.4, позволяющие расширить возможности управления параметрами передачи информации в режиме гарантированного доступа к среде.

Предложенные алгоритмы полностью исключают потерю пакетов вне зависимости от количества узлов, участвующих в передаче. Но при этом (рис. 1) время задержки пакетов возрастает в зависимости от числа узлов и используемого алгоритма. Это позволяет обеспечить гарантированную доставку данных за счет увеличения задержек при передаче.

Основным направлением снижения влияния роста задержек является выделение различных типов трафика в зависимости от категории потребителей и назначение для каждого из них обоснованных значений приоритетов.

Временные параметры задержки, полученные при моделировании сетей с применением различных значений приоритета, приведены на рис. 2. При использовании приоритетного алгоритма мы имеем достаточно гибкий механизм, в котором можем настраивать параметры качества для каждого типа трафика.

В работе выполнено имитационное моделирование предложенных модификаций протокола в среде OmNET++ и получены результаты, которые позволяют говорить о возможности применения данного модифицированного протокола при построении бортовых беспроводных сетей КА, в том числе и для решения задач ДЗЗ.

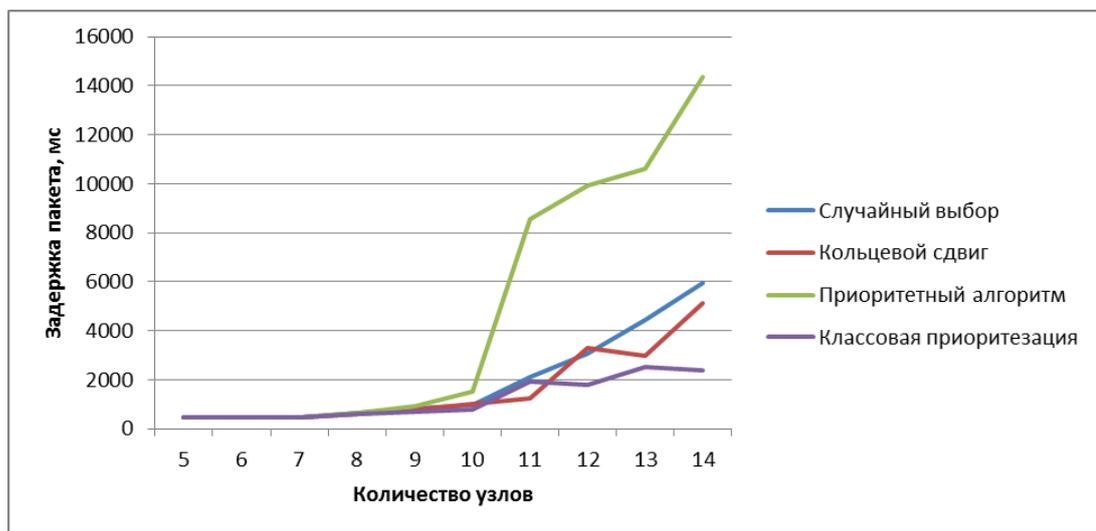


Рис. 1. Задержка для различных алгоритмов доступа

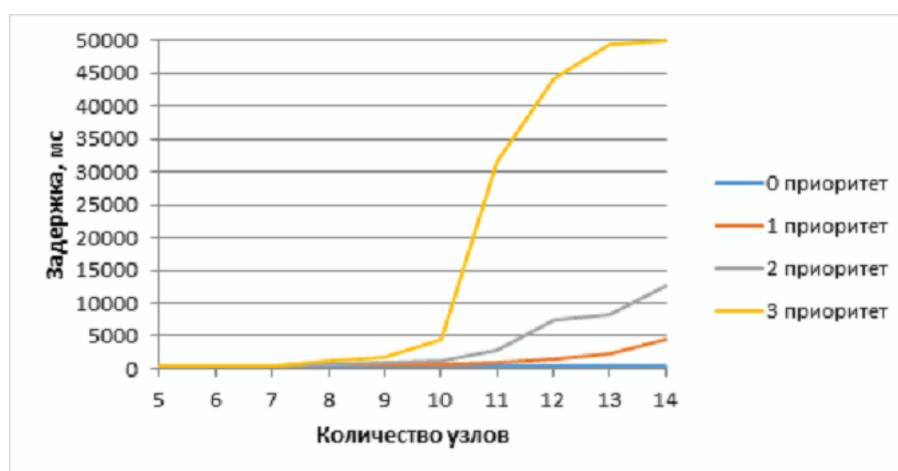


Рис. 2. Задержка для различных приоритетов при использовании приоритетного алгоритма

Список литературы

1. Гансвинд И.Н. Малые космические аппараты в дистанционном зондировании Земли // Космические аппараты, системы и программы ИЗК. 2019. № 5. С. 82–88.
2. Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. 228 с.
3. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга. М.: БИНОМ: Лаборатория знаний, 2009. 234 с.
4. Сорокин Ю.С. Космическая съемка Земли 2010–2011. Ежегодник. М.: Радиотехника, 2010. 490 с.
5. Schowengerdt R.A. Remote sensing. Models and methods for image processing. N.Y.: Academic Press, 2007. 558 p.
6. Рождествен В.Н. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
7. Мальцев Г.Н., Козин И.А. Передача гиперспектральных видеоданных дистанционного зондирования Земли по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью // Информационно-управляющие системы. 2019. № 2. С. 74–83.
8. Magness R. A comparison of can and bluetooth protocols a study for application of can over bluetooth for wireless on-board data handling for a spacecraft sensor network: DASIA of ESA Special Publication. 2003. 532 p.

9. Meltzer M. The Cassini-Huygens visit to Saturn: An Historic mission to the ringed planet. Springer, 2015. 409 p.

10. Бортовая распределенная вычислительная система для обработки гиперспектральных данных / А.А. Белов, А.П. Калинин, А.Г. Орлов, Е.Ю. Федунин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. № В.5. Т. 1. С. 229–234.

11. Казаков Ф.А., Колотовкин Е.А., Казаков М.Ф. Беспроводные сети на борту космического аппарата. Сравнительный анализ протоколов // Интернаука. 2016. № 3-2 (3). С. 65–69.

M.F. Kazakov, F.A. Kazakov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: mkazakov@sfu-kras.ru; fkazakov@sfu-kras.ru

SPECIFIC USE OF WIRELESS TECHNOLOGIES FOR REMOTE EARTH SENSING SYSTEMS

The article deals with the issues of interaction on board spacecraft based on advanced wireless communication technologies. The requirements for indicators of traffic use in onboard networks related to the functions of wireless nodes are highlighted. The results of modeling various algorithms for controlling access to the transmission medium for one of the common for organizing wireless networks are presented protocols.

Keywords: onboard networks, wireless technologies, small spacecraft, IEEE 802.15.4.

УДК 630

**А.В. Кашницкий, И.В. Балашов, С.А. Барталев,
Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, Т.С. Ховратович**

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

ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ «ВЕГА-ЛЕС» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ НА ПРИМЕРЕ ТУНГУССКО-ЧУНСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА

Работа посвящена возможностям использования информационной системы (ИС) «Вега-Лес». Дана краткая оценка и характеристики доступных в системе данных дистанционного зондирования Земли и основных имеющихся тематических продуктов о лесах России. Выполнена оценка возможностей ИС «Вега-Лес» для изучения изменений лесных ресурсов на отдельных локальных территориях. В качестве тестовой территории было выбрано Тунгусско-Чунское лесничество Красноярского Края и Тунгусский заповедник. Приведен анализ изменений лесного покрова, происходящих на указанной территории с 2002 г. по настоящее время. В результате сделан вывод о применимости ИС «Вега-Лес» для дистанционного изучения и мониторинга различных характеристик лесов России.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, информационные системы, мониторинг лесов, Вега-Лес, Тунгусский заповедник, Тунгусско-Чунское лесничество.

В 2019 г. на основе инфраструктуры центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>, [1; 2]) в ИКИ РАН была создана информационная система (ИС) «Вега-Лес», <http://forest.geosmis.ru/> [3]. Основными задачами данной системы является предоставление исследователям возможностей удаленного комплексного изучения лесных ресурсов России с помощью данных дистанционного зондирования Земли. В составе системы объединены как огромные объемы спутниковой информации за длительный промежуток времени, так и различные возможности ее анализа и обработки.

В системе доступны оперативно обновляемые данные дистанционного зондирования приборов MODIS (*Terra/Aqua*), AVHRR (NOAA), VIIRS (Suomi NPP, NOAA 20), ETM+, OLI (*Landsat*), MSI (*Sentinel 2A/B*), MCC (серия спутников «Канопус В»), KMCC (Метеор-М), ПСС (серия спутников «Канопус В»), TIRS (*Landsat*), C_SAR (*Sentinel 1A/B*), а также архивные данные спутников *Landsat-4,5*, ORBVIEWS-3, EO-1. Информация с этих космических аппаратов включает данные в различных диапазонах электромагнитного спектра (длины волн от 0,4 до 12 мкм), а также данные радиолокации; различное пространственное разрешение (от 10 м до 1 000 м на пиксель); различное временное разрешение поступления данных (от нескольких раз в сутки до нескольких раз в год). Отметим, что имеются достаточно длинные однородные ряды данных за длинный промежуток времени (например, данные спутников *Landsat* за последние 35 лет, а данные прибора MODIS (*Terra/Aqua*) – за последние 20 лет). Актуальный объем и номенклатура основных данных ДЗЗ, доступных в системе, приводятся на сайте ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6>).

Кроме исходных спутниковых данных уровня не ниже L1B, в системе доступны продукты более высоких уровней обработки, включая различные безоблачные композитные изображения. Эти композиты регулярно формируются в полностью автоматическом режиме. Они очищены от различных шумов и привязаны к определенным диапазонам времени (день, 4 дня, неделя, месяц, сезон, год, несколько лет). В систему интегрировано большое число различных тематических карт о лесах России, в основном полученных на основе данных среднего пространственного разрешения, например, карты типов земного покрова (23 класса), преобладающих древесных пород, запасов стволовой древесины и другие [4–6].

Также в системе имеется информация о лесных пожарах и их последствиях. Основная информация получена на основе данных активного горения низкого пространственного разрешения. Имеются карты повреждений лесов пожарами по данным среднего пространственного разрешения и возможности уточнения контуров лесных гарей по данным высокого пространственного разрешения.

Реализованные в системе возможности анализа данных включают как базовые, доступные в любой геоинформационной системе, так и специальные инструменты обработки информации для изучения лесного покрова. Также в системе доступна метеорологическая информация и различные картографические материалы.

В докладе представлены основные возможности ИС «Вега-Лес» по анализу состояния лесных ресурсов на отдельных локальных территориях. Эти возможности рассмотрены в работе на примере анализа состояния лесного покрова на территории Тунгусско-Чунское лесничества Красноярского Края и Тунгусского заповедника. На указанной территории находится более 10 млн га земель, покрытых лесом. В частности, приведены примеры:

- оценки состояния лесного покрова и его изменений с 2002 по 2019 г., в том числе изменений состава лесов и запасов стволовой древесины. В основе та-

ких оценок лежат карты, полученные по данным MODIS [6] и доступные в системе;

- оценок площадей, пройденных лесными пожарами, и постпожарных повреждений лесного покрова. Такие оценки даются как на основе данных активного горения, так и на основе уточнения этой информации по данным высокого пространственного разрешения (*Landsat, Sentinel-2*). Приводится информация по отдельным годам, а также данные об интегральных площадях, пройденных пожарами в период с 2001 по 2019 г.;
- оценок масштабов и динамики промышленной заготовки древесины (выруб-бок), которая ведется в юго-восточной части Тунгусско-Чунское лесничества.

На примере Тунгусского заповедника представлена возможность построения карт типов лесного покрова на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения (*Landsat, Sentinel-2*) с использованием обучающей выборки, полученной на основе карт по данным прибора MODIS (среднее пространственное разрешение).

Представленные в работе оценки являются первичными и могут потребовать определенной наземной верификации, которая позволила бы учесть специфику рассматриваемой территории. В то же время следует отметить, что все представленные в ИС «Вега-Лес» возможности анализа и данные прошли верификацию на различных типах территории и показали свою работоспособность. В дальнейшем возможно проведение отдельного исследования по уточнению и подтверждению приведенных в работе оценок по указанной территории. Однако поскольку рассматриваемая территория характеризуется крайней труднодоступностью, то актуальная и достоверная информация по ней может быть получена только с использованием дистанционных данных.

Таким образом, на основе анализа территории Тунгусско-Чунского лесничества и Тунгусского заповедника в работе сделан вывод о применимости ИС «Вега-Лес» для дистанционного изучения и мониторинга различных характеристик лесов России.

Работа выполнена при поддержке проекта Минобрнауки «Разработка технологий автоматизированной обработки спутниковых данных дистанционного зондирования Земли для создания и поддержки информационных сервисов мониторинга лесных ресурсов и охотничьих угодий России» (Соглашение ЭБ 075-15-2019-1374, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57718X0294).

Список литературы

1. 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. 263–284.
2. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
3. Vega-Les information system. Actual features and future evolution / I. Balashov, S. Bartalev, M. Burtsev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2020. Vol. 507, № 1. P. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012002.
4. Барталев С.А., Лупян Е.А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 197–214.

5. Состояние и перспективы развития спутникового картографирования растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 203–221.

6. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко [и др.]. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

A.V. Kashnitskii, I.V. Balashov, S.A. Bartalev,
E.A. Loupian, F.V. Stytsenko, T.S. Khovratovich

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

POSSIBILITIES OF THE VEGA-FOREST SYSTEM FOR SOLVING THE PROBLEMS OF REGIONAL MONITORING OF FORESTS ON THE EXAMPLE OF THE TUNGUSSKO-CHUNSKOYE FORESTRY

The work is devoted to the possibilities of using the information system (IS) "Vega-Les". A brief assessment and characteristics of the Earth remote sensing data available in the system and the main available thematic products about Russian forests are given. An assessment of the capabilities of IS Vega-Les for studying changes in forest resources in certain local areas was carried out. The Tungusko-Chunskoye forestry of the Krasnoyarsk Territory and the Tunguska nature reserve were chosen as the test area. The analysis of changes in forest cover taking place in the specified area from 2002 to the present is presented. As a result, a conclusion is made about the applicability of IS "Vega-Les" for remote study and monitoring of various characteristics of Russian forests.

Keywords: remote sensing, information systems, forest monitoring, Vega-Les, Tunguska nature reserve, Tungusko-Chunskoye forestry.

УДК 502

П.Н. Матина¹, Г.А. Колотков²

¹Аспирант, Национальный исследовательский
Томский государственный университет, Томск, Россия
²Кандидат технических наук, Институт оптики атмосферы
им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
e-mail: matina_polina@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО ФОНА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА

Проблема изучения малых фоновых доз радиации, вызванных как антропогенной, так и естественной радиоактивностью, является одной из важнейших междисциплинарных фундаментальных проблем, которая приобрела в настоящее время глобальный характер. Интенсивная антропогенная нагрузка на окружающую среду в настоящее время достигла масштабов, угрожающих жизни и здоровью людей. Существует необходимость разработки новых оперативных методов оценки состояния радиационного фона, которые на уровне регионов разработаны слабо. Для решения данной проблемы авторами разрабатывается дистанционный метод микроволнового детектирования с помощью радиометрического ком-

плекса вертолетного типа и современных геоинформационных технологий. Преимущества разрабатываемого метода: возможность охвата больших труднодоступных территорий для исследований, оперативность, возможность картографирования уровня радиационного излучения земной поверхности.

Ключевые слова: почва, радиация, радиометр, микроволновое излучение, мониторинг.

Введение. С 50-х гг. XX в. одной из важных проблем геохимии окружающей среды стала проблема значения радиоактивности как для человека, так и для всех компонентов ландшафта. Это связано с тем, что в биосферу планеты стали поступать в большом объеме техногенные радионуклиды. Большие площади земли подверглись радиационному загрязнению, появилась необходимость постоянного мониторинга радиационной обстановки. Даже слабые проявления радиоактивности оказывают мощное воздействие на геосистемы, что свидетельствует о сильном влиянии радиоактивности на стабильность общества, современную военно-ядерную ситуацию, на проблемы энергетического будущего и состояние окружающей среды.

В оценке географических масштабов радиационного воздействия имеются сложности, связанные со спецификой применения радиации в военной промышленности и гражданской энергетике: максимальная ведомственная закрытость и отсутствие правовой нормативной базы и анализа проблем утилизации реакторов (в настоящее время в мире накоплено более 350 тыс. т отработанного ядерного топлива, и ежегодно из реакторов выгружается около 10,5 тыс. т). Значительная часть работ по этой тематике носит закрытый характер и не отражена в официальном справочнике.

В России 11 млн человек (7,4 % от населения) живут в условиях повышенного облучения (2–5 мЗв), 3,7 млн человек (2,5 %) – высокого облучения (свыше 5 мЗв), 1 млн человек облучаются дозой, превышающей 10 мЗв. 200 тыс. человек подвергаются облучению, превышающему 20 мЗв.

Детектирования повышенной радиоактивности в почвенном слое земли в настоящее время проводится с помощью аэрогаммасъемки и эманационной съемки. Однако их большая времязатратность, низкая разрешающая способность и недостаточная чувствительность не позволяют проводить измерения с расстояний более 200 м.

Мониторинг радиоактивного загрязнения в Томской области осуществляет сеть стационарных постов радиационного контроля – автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО), которая уже устарела и требует обновления и модернизации, а посты расположены лишь на малой части области, в пределах 30 км от зоны влияния СХК [1].

Несмотря на то, что в результате процессов самоочищения природной среды радиационная ситуация в регионе улучшилась, радиационный контроль и мониторинг требуется проводить непрерывно, так как промышленные предприятия продолжают действовать и планируется строить новые. Например, на Сибирском химическом комбинате в г. Северске реализуется проект «Прорыв», в рамках которого будет построен реактор, работающий в замкнутом топливном цикле, и налажено производство уран-плутониевого топлива. Работа модуля в опытно-промышленном режиме начнется в 2022 г., а с 2023 г. там стартует промышленная наработка нитридного топлива для загрузки реактора.

Современное состояние проблемы. Авторами разрабатывается новая экспериментальная методика, позволяющая оперативно и довольно точно фиксировать повышенную радиоактивность в ландшафте.

Вне зависимости от природы появления избыточной радиоактивности в почве, она инициирует ряд физико-химических реакций с появлением так называемых маркеров радиоактивности (в нашем случае – атомарный водород). Разрабатываемый пассивный метод бортового мониторинга основывается на измерении мощности спонтанного излучения атомарного водорода от поверхности земли на частоте 1 420 МГц. Бортовой радиометр (для измерения слабых электромагнитных излучений) обеспечит данными о наличии радиоактивности в приповерхностном слое земли.

Преимущества разрабатываемого метода: высокая чувствительность, дистанционность (могут работать на больших расстояниях от источника), режим реального времени, возможность картографирования уровня радиационного излучения земной поверхности на труднодоступных территориях (суровые климатические условия, отсутствие инфраструктуры, транспортного сообщения).

Метод применим как для мониторинга радиоактивной обстановки, так и для поиска месторождений редкоземельных металлов (РЗМ), так как им в комплексе сопутствуют радиоактивные элементы (^{232}Th , ^{40}K). Например, в циркониевых минералах содержание U и Th по массе составляет 0,2–20 % (по степени содержания радиоактивности циркониевые пески относят к повышено радиоактивным или высоко-радиоактивным) [2; 3].

В России редкоземельные месторождения имеют статус стратегических, основные запасы редкоземельных металлов сосредоточены в неразрабатываемых месторождениях Восточной Сибири, расположенных в сложных климатических условиях, что изначально обуславливает высокую капиталоемкость проектов их освоения.

Основным источником рудно-сырьевой базы титановой и циркониевой отраслей промышленности являются комплексные титано-циркониевые россыпи, которым сопутствуют РЗМ. Среди десятков известных в России месторождений и рудопроявлений данного типа наиболее перспективными являются отдельные участки Центрального, Лукояновского и Туганского месторождений (Томская область) [4].

Поиски ильменит-цирконовых россыпей на территории Томской области геологами проводились с применением рекогносцировочной маршрутной и площадной дистанционной съемки концентрации α -активных газов и озона в приземной атмосфере. Были обнаружены радиоактивные аномалии, которые могут быть интерпретированы как перспективные на ильменит-цирконовую россыпь [5].

Выводы. Проблемы радиоактивности Западной Сибири и Томской области остаются актуальными. Комплексные исследования радиоактивной обстановки на территории Томской области дистанционными методами не проводились, карты пространственного распространения радиоактивных элементов отсутствуют. Опубликованные данные государственных структур по содержанию радиоактивных элементов в природной среде, как правило, разноречивы, многие из них недостаточно увязаны с вариабельностью фонового содержания, нет четкой дифференциации поступления радионуклидов в зависимости от источников, что затрудняет оценку степени антропогенной нагрузки на природные комплексы [6]. Остается актуальным развитие радиометрических исследований и совершенствования способов обработки данных и приемов получения слабовыраженного сигнала. Дистанционные микроволновые съемки перспективны при геологическом картировании крупных малоизученных территорий, поисках рудного сырья, нефти и газа, картировании почв, радиоэкологическом мониторинге [7].

Список литературы

1. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. политехнич. ун-та, 2009. 430 с.

2. Kolotkov G.A., Penin S.T., Matina P.N. The sources of radioactive contamination in the southeast of the Tomsk region // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2018. 108330S. DOI:10.1117/12.2505805.

3. Kolotkov G., Penin S., Matina P. Modeling the spatial distribution of Cesium-137 in surface soils in the southeast of the Tomsk Region // 2019 Russian open conference on radio wave propagation, RWP 2019 – Proceedings. 2019. P. 454–457. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810368.

4. Туганское комплексное месторождение в Томской области / А.И. Летувнинкас [и др.] // Рудные месторождения. Минералогия. Геохимия. Томск, 2000. С 139–179.

5. Самохвалов М.А. Результаты поисков ильменит-цирконовых россыпей с применением специальной эмансионной и озоновой съемки // Рудные месторождения. Минералогия. Геохимия. Томск, 2000. С. 81–86.

6. Безносиков В.А. Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно-и среднетаежных подзон республики Коми // Почвоведение. 2017. № 7. С. 824–829.

7. Соболев И.С. Методы радиогеохимии при наземных поисках месторождений нефти и газа // Изв. Том. политехнич. ун-та. Томск, 2007. Т. 311, № 1. С. 90–96.

P.N. Matina¹, G.A. Kolotkov²

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch
of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia

e-mail: matina_polina@mail.ru

PROSPECTS FOR STUDYING THE RADIATION BACKGROUND OF THE TOMSK REGION BY USING REMOTE MONITORING METHODS

The problem of studying small background doses of radiation caused by both anthropogenic and natural radioactivity is one of the most important interdisciplinary fundamental problems, which has now acquired a global character. Intensive anthropogenic pressure on the environment has now reached scales that threaten human life and health. There is a need to develop new operational methods for assessing the state of the radiation background, which are currently poorly developed at the regional level. To solve this problem, the authors are developing a remote method of microwave detection using a radiometric complex of a helicopter type and modern geographic information technologies. Advantages of the developed method: the ability to cover large inaccessible areas for research, efficiency, the ability to map the level of radiation of the earth's surface.

Keywords: soil, radiation, radiometer, microwave radiation, monitoring.

**И.И. Серeda, П.В. Денисов, Е.А. Лупян,
Д.Е. Плотников, В.А. Толпин, К.А. Трошко**

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
e-mail: iisereda@mail.ru

РАЗВИТИЕ ОЗИМЫХ И ЯРОВЫХ КУЛЬТУР РОССИИ В 2020 ГОДУ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

На основе данных дистанционного зондирования и с использованием сервиса Vega-Science в 2020 г. проводился непрерывный мониторинг состояния озимых и яровых сельскохозяйственных культур. При этом были использованы актуальные данные о сезонной динамике вегетационного индекса NDVI и метеорологических параметров, их сопоставление с данными прошлых лет. Развитие работы в данном направлении необходимо для уточнения сроков проведения сельскохозяйственных работ, обоснования введения режима чрезвычайной ситуации, раннего прогнозирования урожайности. В результате работы были определены территории, для которых условия для формирования урожайности в текущем сезоне более или менее благоприятны относительно среднемноголетних наблюдений.

Ключевые слова: мониторинг посевов, озимые культуры, спутниковые системы наблюдения Земли, дистанционное зондирование.

Методика. Мониторинг состояния выращиваемых культур с использованием методов дистанционного зондирования и инструментов сервиса Vega-Science регулярно проводится Институтом космических исследований РАН [1–4]. В ходе выполнения этих работ накопился опыт оценки состояния посевов, который был использован относительно ситуации текущего года, а также способствовал созданию и улучшению инструментов проводимого анализа. Подробная оценка развития посевов в 2020 г. описывалась в ежемесячных бюллетенях Института космических исследований.

В основе проводимого мониторинга посевов сельскохозяйственных культур лежит анализ погодных данных, а также сезонной динамики вегетационного индекса NDVI. Сведения о метеорологических параметрах собираются в системе Vega-Science на основе данных реанализа, предоставляемого в открытый доступ в рамках проекта NCEP Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA). Данные об изменении вегетационного индекса NDVI формируются с помощью технологии автоматического определения участков произрастания озимых и яровых культур и еженедельных безоблачных композитов съемочной системы MODIS [5].

Оценке состояния посевов сельскохозяйственных культур относительно других годов способствует формирование многолетних норм сезонного хода NDVI. Для озимых и яровых культур существуют характерные изменения значений индекса в течение года. Таким образом, отклонения от этих значений в текущем сезоне могут говорить о положительной или отрицательной динамике их развития. В свою очередь, наличие метеорологических показателей позволяет определить основную часть причин этих отклонений.

Результаты исследования. Погодные условия сезона 2019–2020 гг. на территории европейской части России выдались особыми. После засушливой осени последовала теплая и бесснежная зима, что способствовало развитию растительности в более ранние сроки. Однако это привело к тому, что к весне запаса продуктивной влаги в почве осталось недостаточно для их дальнейшего развития. В марте и апреле ситуация с засухой для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов усугубилась. Кроме того, негативное влияние на развитие посевов оказали заморозки, которые наблюдались в этот период в Ставропольском крае, Ростовской области, Краснодарском крае и Республике Крым. В мае на большей части территории Европейской России выпало значительное количество осадков, которое заметно повысило значения гидротермического коэффициента. Но несмотря на то, что дожди оказали положительный эффект на состояние почвы, для посевов озимых культур на юге России они оказались недостаточно своевременными. Более того, ряд регионов вдоль границы с Казахстаном осадки оставили стороной, а их среднегодовые значения вплоть до июля оставались ниже среднегодовой нормы. В то же время для большей части Центрального, Приволжского и Северо-Западного федеральных округов накопленный запас почвенной влаги обеспечил стабильный рост как озимых, так и яровых культур. Положительное отклонение вегетационного индекса NDVI относительно среднегодовых значений свидетельствует о том, что их развитие происходило близко к среднегодовому уровню или даже несколько выше него. Это является признаком высокой продуктивности посевов.

Максимальные сезонные значения вегетационного индекса NDVI имеют устойчивую прямую зависимость с итоговой урожайностью сельскохозяйственных культур. Сравнивая их текущее значение с показателями многолетней нормы, можно говорить о предполагаемых значениях урожайности. К настоящему моменту можно сказать, что на территории Европейской России уверенно выделяются благоприятная и неблагоприятная зоны развития озимых и яровых культур, обусловленные различным количеством запасов продуктивной влаги в почве в период их развития (рис. 1). Примеры благоприятного и неблагоприятного развития посевов приведены на графиках (рис. 2). Для Петровского района Ставропольского края характерен недостаток накопленных осадков в период основного роста культур. При этом максимальные сезонные значения 2020 г. значительно ниже показателей среднегодовой нормы. В то же время для Белинского района Пензенской области наблюдается обратная ситуация. Высокие сезонные максимумы NDVI вследствие достаточных осадков свидетельствуют о высоких значениях накопленной фитомассы и, вероятно, о более высокой урожайности посевов.

На территории азиатской части России в период весенней посевной кампании преобладала довольно мягкая и преимущественно сухая погода. Своевременные дожди обеспечили интенсивное развитие яровых культур на ранних стадиях их роста. Тем не менее последовавший дефицит осадков в западных районах Уральского округа и Юго-Западной Сибири привел к засухе. Это подтверждают относительно низкие значения ГТК в Омской, Новосибирской областях и Алтайском крае в период с мая по июль 2020 г. (рис. 3).

Выводы. К настоящему моменту можно сказать, что на территории Европейской России уверенно выделяются благоприятная и неблагоприятная зоны развития отдельно для озимых и для яровых культур, обусловленные различным количеством запасов продуктивной влаги в почве в период их развития. Значения урожайности озимых культур в регионах Центрального федерального округа и запада Приволжского федерального округа можно ожидать более высокими, чем в среднем за последние годы, в том числе 2018 и 2019 гг.

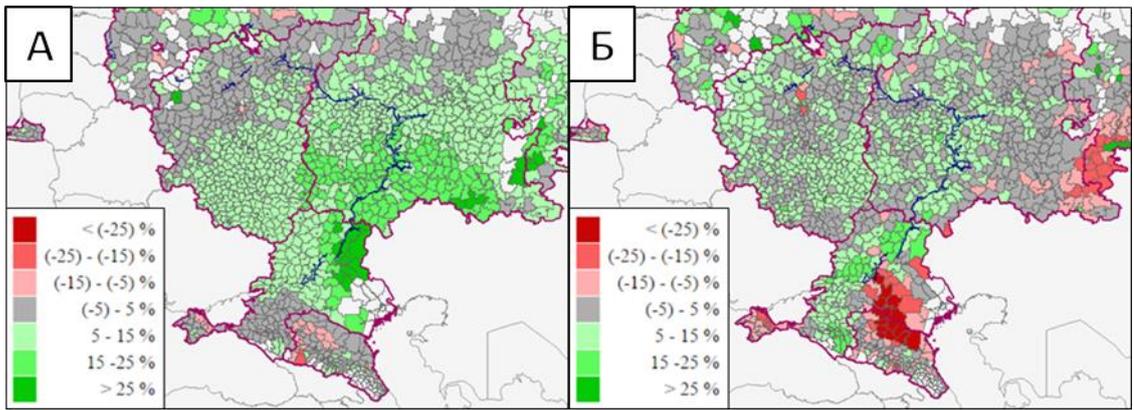


Рис. 1. Порайонная разница максимальных значений вегетационного индекса NDVI 2020 г. и среднемноголетних максимумов для: *А* – озимых культур; *Б* – яровых культур

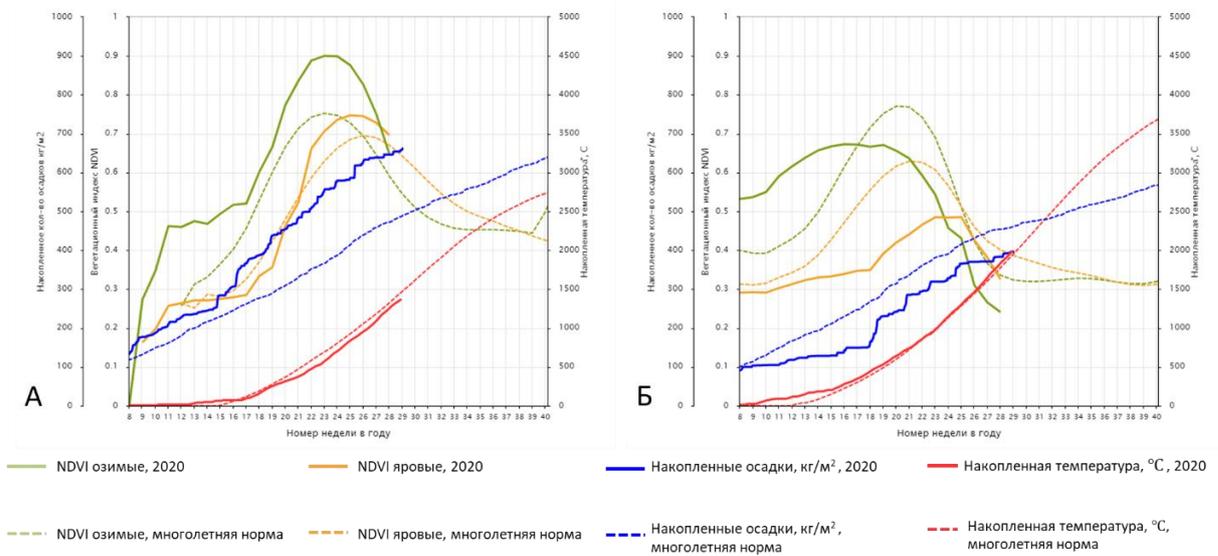


Рис. 2. Динамика NDVI и метеорологических параметров: *А* – Пензенская область, Белинский район; *Б* – Ставропольский край, Петровский район

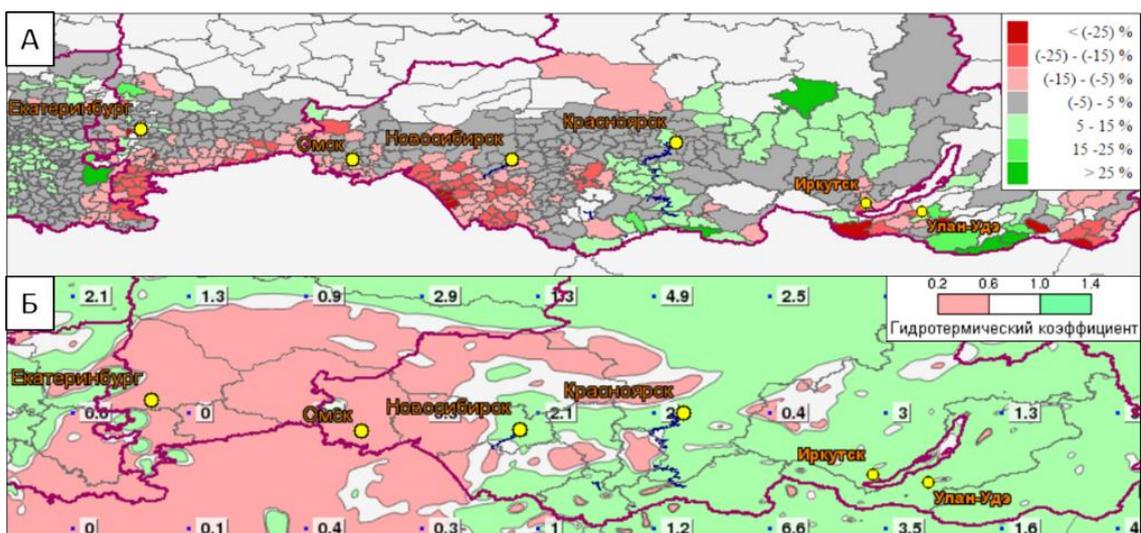


Рис. 3. Порайонная разница максимальных значений вегетационного индекса NDVI пахотных земель 2020 г. и среднемноголетних максимумов (*А*); гидротермический коэффициент (ГТК) за период 10.07.2020–20.07.2020 (*Б*)

Для Ставропольского края, Республики Крым, Республики Калмыкия их продуктивность ожидается на более низком уровне. Для яровых культур в большинстве регионов Центральной России их развитие происходит в целом согласно средне-многолетней норме, однако для регионов вдоль границы с Казахстаном можно ожидать более низкие значения урожайности.

В Азиатской части России наиболее негативная ситуация с развитием культурной растительности складывается в Курганской, Челябинской, Тюменской, Омской, Новосибирской областях и в Алтайском крае, где вследствие засухи можно ожидать более низкую итоговую урожайность посевов. На территории Восточной Сибири и Дальнего Востока ситуация более благополучна и в целом близка к показателям среднемноголетнего развития.

Список литературы

1. Лупян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С. Наблюдение аномально раннего развития сельскохозяйственных культур в южных регионах России весной 2016 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 240–243.

2. Наблюдение раннего развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2017 года на основе данных дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, Ю.С. Крашенинникова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 268–272. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-268-272.

3. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, Ю.С. Крашенинникова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 2. С. 272–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

4. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России в феврале 2019 года на основе данных дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, К.А. Буланов, П.В. Денисов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 266–271. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-266-271.

5. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса ВЕГА / В.А. Толпин, Е.А. Лупян, С.А. Барталев [и др.] // Оптика атмосферы и океана, 2014. Т. 27, № 7 (306). С. 581–586.

I.I. Sereda, P.V. Denisov, E.A. Loupian,
D.E. Plotnikov, V.A. Tolpin, K.A. Troshko
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia
e-mail: iisereda@mail.ru

ANALYSIS OF WINTER AND SPRING CROPS DEVELOPMENT IN RUSSIA IN 2020 BASED ON REMOTE MONITORING

The paper presents the results of continuous monitoring of the state of winter and spring crops in 2020 using remote sensing data and the VEGA-Science service. The research is based on the seasonal dynamics of the vegetation index NDVI and meteorological parameters, their comparison with data from previous years. The development of such works is necessary to clarify the timing of agricultural works, justify the emergencies on fields and for early yield forecast. The paper showed territories of better or worse crop conditions relative to the average annual observations.

Keywords: crops monitoring, winter crops, Earth observation satellite systems, remote sensing.

Секция

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 528.852

А.А. Бучнев¹, А.В. Гетлинг²

¹Кандидат технических наук, Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Доктор физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной
физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: baa@ooi.sccc.ru; A.Getling@mail.ru

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА

Адаптирован для задач физики Солнца и реализован в вычислительной программе метод измерения горизонтальных скоростей в фотосфере, ранее применявшийся для обработки аэрокосмических снимков. От стандартной процедуры локального корреляционного трассирования он отличается специальным выбором пробных площадок («эталонов»), смещение каждой из которых определяется по максимуму корреляции между ее исходным и всевозможными смещенными положениями. А именно: в некоторой окрестности каждого узла заданной сетки в качестве эталона выбирается площадка, на которой достигает максимума либо контраст, либо энтропия распределения яркости. Полученные таким образом горизонтальные скорости интерполируются на положения воображаемых «пробных частиц» с помощью триангуляции Делоне и аффинных преобразований, определяемых деформацией полученных треугольников на рассматриваемом временном шаге. Движение пробных частиц представляется их траекториями. Отчетливо выявляется суперпозиция течений различных масштабов.

Ключевые слова: фотосфера, эталон, пробные частицы, траектории, триангуляция Делоне, аффинные преобразования.

Введение. Магнитные поля, ответственные за весь комплекс активных явлений, зарождаются в плотных слоях Солнца, где течения играют важную роль в формировании магнитных полей. Структура этих полей в большой мере является отпечатком структуры течений, и изучение морфологии течений, таким образом, важно для понимания процессов солнечной активности.

Наблюдаемые в фотосфере гранулы переносятся конвективными течениями более крупных масштабов и поэтому могут служить трассерами для выявления структуры этих течений [1–4]. Это обстоятельство (и вообще перенос неоднородностей яркости течениями вещества) лежит в основе известного метода локального корреляционного трассирования (ЛКТ; в литературе на английском языке *local correlation tracking, LCT*) для определения скоростей перемещения деталей поля яркости [5]. Найденные этим методом скорости в некотором приближении соответствуют скоростям течения вещества и часто используются вместо последних при анализе фотосферной динамики (так приходится поступать из-за отсутствия метода

прямого измерения скоростей, нормальных к лучу зрения, хотя, конечно, движение яркостных неоднородностей – не то же, что движение вещества).

Метод исследования. Идея метода ЛКТ состоит в следующем. На изображении солнечной поверхности выделяется некоторая площадка. Затем берется изображение, полученное в следующий, близкий, момент времени, а в некоторой окрестности исходного положения площадки просматриваются ее всевозможные сдвинутые положения. Для каждого из них вычисляется корреляция между распределением яркости в исходной площадке на первом изображении и в сдвинутой площадке на втором изображении. Вектор сдвига, при котором эта корреляция максимальна, поделенный на временной интервал между моментами получения двух изображений, принимается в качестве вектора локальной скорости.

Процедура, используемая нами, отличается от стандартной процедуры ЛКТ выбором пробных площадок («эталонов»), используемых при вычислении корреляций. Если в стандартном методе эталоны привязываются к узлам специально заданной равномерной сетки, то в нашей работе выбор эталонов представляет собой отдельную задачу: в окрестности каждого узла выбранной сетки в качестве эталона выбирается та площадка, на которой достигается максимума либо контраст $C = p_{\max} - p_{\min}$ (где p_{\max} и p_{\min} – соответственно наибольшее и наименьшее значение яркости на площадке), либо энтропия распределения яркости (где p_i – значение яркости в пикселе с номером i ; суммирование ведется по всем пикселям площадки).

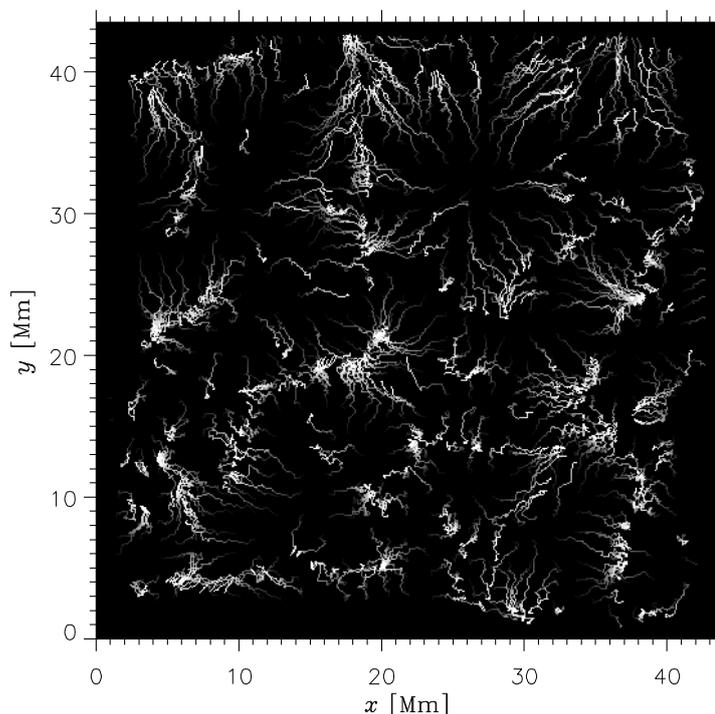
На наш взгляд, наиболее информативное представление полей скорости, полученных методом ЛКТ, достигается, если строить семейство траекторий воображаемых «пробных частиц», которые в начальный момент считаются равномерно распределенными по полю изображения и дальнейшее движение которых в каждый момент времени определяется найденными локальными значениями скоростями. Для этого нужно знать скорости в начальных точках расположения пробных частиц и в точках, где оканчиваются уже построенные участки траекторий. Наша же процедура дает значения скорости в точках, определяемых выбором эталонов, и точки эти свои для каждого момента. Поэтому, чтобы получить значения скорости в требуемых точках, мы интерполируем на эти точки горизонтальные скорости, найденные описанным методом. Для этого используется триангуляция Делоне [6] и аффинные преобразования, задаваемые деформацией найденных треугольников на рассматриваемом временном шаге.

Наблюдательные данные. Представленный ниже рисунок построен по результатам анализа серии изображений солнечной грануляции, полученной Брандтом, Шармером и Саймоном с помощью Шведского вакуумного солнечного телескопа на острове Ла Пальма Канарского архипелага [7]. Эта серия, примечательная своей длительностью (11 ч), в сочетании с непрерывностью (постоянный интервал между кадрами, составляющий 21.03 с) и качеством (среднеквадратичный контраст, варьирующийся от 6 до 10,6 %) до сих пор остается одной из лучших. Наблюдения велись с 08:07 до 19:07 UT вблизи центра солнечного диска в спектральной полосе шириной 10 нм с центром на длине волны 468 нм. Разрешение изображений было, как правило, не хуже 0,5".

Предварительная обработка данных включала в себя совмещение каждого следующего кадра с предыдущим, компенсацию искажений, вносимых атмосферой, и устранение быстрых (пятиминутных) колебаний яркости путем дозвуковой фильтрации [8].

Мы представили здесь результаты построения траекторий пробных частиц, пройденных за интервалы длительностью около двух часов.

В дальнейших исследованиях для качественного анализа эволюции групп растущих биполярных пятен использовались данные солнечного оптического телескопа спутника *Hinode* (Япония) [9] и данные гелиосейсмического и магнитного скане-



ров Обсерватории солнечной динамики (НАСА, США) [10].

Рисунок. Дрейф пробных частиц за двухчасовой интервал

Результаты. Пример картины траекторий на двухчасовом интервале изображен на рисунке. Движение от начала к концу каждой траектории показано нарастанием яркости линии. Концы траекторий четко обрисовывают границы ячеек, причем обращает на себя внимание отчетливое разделение масштабов течений. На самые крупные, супергрануляционные, ячейки накладываются меньшие, уверенно отождествляемые с мезогранулами. Форма границ ячеек оказывается гораздо ближе к многоугольной, чем если эти границы определять по концентрации пробных частиц на некоторый момент времени.

Нетрудно заметить, что в правом верхнем квадранте изображения на ячейку с характерным размером, лежащим в супергрануляционном масштабном диапазоне, наложилась ячейка размера меньшего (около 15 Мм), но превышающего значения, типичные для мезогранул. Такие ячейки, которым мы дали предварительное название «большие мезогранулы», обнаруживаются в разные времена и не выглядят явлением исключительным. Если супергранулы похожи на выпуклые многоугольники (обычно неправильные), то для больших мезогранул часто бывает характерна звездчатая форма. Она может свидетельствовать о том, что течение в таких ячейках дальше от режима установления, чем течение в супергранулах. Обращает на себя внимание область сильной конвергенции чуть левее и ниже центра изображения. Конвергенция в некоторых случаях сопровождается закрученностью сходящегося потока и иногда наблюдается в центре ячейки; вещество к этому центру стекается – такая картина типична для газов.

Заключение. Мы видим, что процедура трассирования пробных частиц отчетливо выявляет суперпозицию ячеечных течений разных масштабов, которые сохраняют некоторые наблюдаемые в эксперименте черты упорядоченной ячеечной кон-

векции. Кроме ячеек супергрануляции и мезогрануляции с характерными размерами соответственно 20 (или более) и 5–10 Мм, выявляются «большие мезогранулы», которые имеют размеры порядка 15 Мм. Последние нередко имеют звездчатую структуру, что, возможно, является эффектом нестационарности. Характерная черта структуры течения – участки сильной конвергенции, иногда с закрученностью.

Благодаря использованию представленной методики выбора эталонов снижается вероятность учета случайно скоррелированных распределений яркости на таких площадках, где она меняется в небольших пределах и плавно. В конечном счете это повышает надежность определения локальных скоростей.

Список литературы

1. Adv. Space Res. / A.M. Title, T.D. Tarbell, G.W. Simon [et al.]. 1986. № 8. P. 253.
2. Nature / R. Muller, H. Auffret, T. Roudier [et al.]. 1992. Vol. 356. P. 322.
3. Shine R.A., Simon G.W., Hurlburt N.E. // Sol. Phys. 2000. Vol. 193. P. 313.
4. Astron. Astrophys / M. Rieutord, T. Roudier, H.-G. Ludwig [et al.]. 2001. Vol. 377. L14.
5. November L.J. Appl. Opt. 1986. Vol. 25. P. 392.
6. Preparata F.P., Shamos M.I. Computational geometry: an introduction. Springer. N.Y., 1985. (Рус. пер.: Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия. Введение. М.: Мир, 1989.)
7. Solar Surface Magnetism / G.W. Simon, P.N. Brandt, L.J. November [et al.]; ed. R.J. Rutten, C.J. Schrijver // NATO Adv. Sci. Inst. 1994. Vol. 433 (Kluwer). P. 261.
8. Astrophys J. / A.M. Title, T.D. Tarbell, K.P. Topka [et al.]. 1989. Vol. 336. P. 475.
9. Getling A.V., Ishikawa R., Buchnev A.A. Development of active regions: Flows, magnetic-field patterns and bordering effect // Sol. Phys. 2016. Vol. 291. P. 371.
10. Getling A.V., Buchnev A.A. The Origin and Early Evolution of a Bipolar Magnetic Region in the Solar Photosphere // Astrophysical J. 2019. Vol. 871, № 2. P. 224.

A.A. Buchnev¹, A.V. Getling²

¹Institute of the Computational Mathematics
and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Skobeltsyn Nuclear Physics Research Institute,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
e-mail: baa@ooi.sccc.ru; A.Getling@mail.ru

VISUALIZATION OF THE ACTIVE AREA DEVELOPMENT PROCESSES IN THE SOLAR PHOTOSPHERE

A technique of measuring horizontal velocities in the photosphere previously used to process aerospace images is adapted for problems of solar physics and implemented in a computer code. It differs from the standard local-correlation-tracking procedure by a special choice of the trial areas ("targets") whose displacements are determined by maximizing the correlation between the original and displaced positions of each area. Specifically, as a target, in a certain neighbourhood of each node of the given grid, we choose the area in which either the contrast or the entropy of the brightness distribution reaches its maximum. The horizontal velocities thus obtained are then interpolated to the required points using the Delaunay triangulation and affine transformations specified by the deformation of the obtained triangles at the time step considered. The motion of corks is represented in the form of their trajectories. A superposition of cellular flows differing in their scale can clearly be seen.

Keywords: photosphere, target, trial corks, trajectories, affine transformations.

М.Г. Вахнин

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
e-mail: misha2006@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА СЕВЕРЕ ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Рассмотрены некоторые экологические проблемы, которые возникают при поиске, разведке и добыче месторождений нефти и газа. При этом особое внимание уделено использованию дистанционных методов и применению геоинформационных систем, а также рискам, которые могут возникнуть при добыче месторождений нефти и газа на севере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

Ключевые слова: геоэкология, экология нефти и газа, природные ресурсы, дистанционные методы, геоинформационные системы.

Проблемы, возникающие на Севере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, оказывают значительное влияние на экономику и развитие производственных мощностей нашей страны [1].

При этом большое значение имеет сохранение благоприятной экологической обстановки в стране и на севере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции в частности. В настоящее время на севере ТПП открыто более восьмидесяти месторождений нефти и газа. Среди них есть такие крупные, как месторождения им. Требса и им. Титова. Однако разработка данных месторождений в суровых климатических условиях сопровождается существенными экологическими рисками. Значительное количество месторождений углеводородов на севере ТПП расположено в районах распространения вечной мерзлоты, в величине которой появляются изменения при добыче и разработке углеводородов. На Севере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции часто происходят экологические аварии при разработке месторождений, которые наносят большой вред окружающей среде, и их последствия можно наблюдать даже из космоса.

При разработке месторождений повышается общий фон загрязнения углеводородами. На основной территории Севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции общий фон загрязнения углеводородами незначительный, но на отдельных участках происходит катастрофическое повышение уровня загрязненности углеводородами. Наибольший ущерб экологической среде приносят экологические аварии, происходящие в районах наиболее интенсивной нефтегазодобычи. Например, в районе г. Усинска после аварии с магистральным трубопроводом состояние экологической среды можно приравнять к состоянию экологического бедствия. Поэтому при освоении нефтегазовых месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции все вопросы о возможных экологических противоречиях и проблемах, а также оценка ущербов и рассмотрение баланса «выгод-затрат» должны быть решены с максимальной точностью, с учетом экологических факторов. Боль-

шое значение при освоении месторождений углеводородов на севере ТПП имеет экологический контроль. Важно, чтобы максимально сохранялась первоначальная природная среда.

Необходимо свести к минимуму вероятность техногенных аварий, чтобы не допустить разрушения окружающей среды. Значительное количество месторождений на севере ТПП расположено в зонах распространения многолетнемерзлых пород. Нарушение технологий при разведке и разработке месторождений может привести к серьезным авариям, последствия которых невозможно будет устранить в течение многих десятилетий.

Нарушение технологии бурения может привести к таянию многолетнемерзлых пород, повреждению почвенного слоя и образованию аварийных выбросов, которые вызывают аварии, происходящие на небольших глубинах. Одной из причин подобных аварий могут быть скопления газогидратов, которые сформировались на сравнительно небольшой глубине, где при таянии многолетнемерзлых пород возникает большая вероятность выбросов газа, что может привести к тяжелым экологическим последствиям, поэтому бурение скважин в данных районах должно проводиться с учетом максимальной сохранности растительного почвенного слоя [2]. Кроме того, большое влияние при разведке и добыче углеводородов оказывает состояние нефтегазового оборудования, различные химические вещества, которые могут быть использованы при разведке и добыче углеводородов, а также значительные занимаемые площади [3].

Все это приводит к повышению риска экологических аварий, наносится значительный ущерб экологической обстановке. При этом максимальное воздействие на окружающую среду оказывает проведение сейсморазведочных работ и бурения. Всего на севере Тимано-Печорской провинции было пробурено более тысячи поисковых разведочных скважин, хотя плотность их распределения достаточно неравномерная. Кроме того, при доразведке и эксплуатации месторождений появляются дополнительные риски, связанные с разливами нефтепродуктов, а также другие риски.

Значительная часть территории Тимано-Печорской ТПП расположена за пределами полярного круга с характерными климатическими и природными условиями – многолетней мерзлотой и значительной заболоченностью в некоторых районах. Все это требует распространения новых технологий, а также значительных инвестиций – как иностранных, так и российских, – которые помогут эффективно проводить разведку и разработку новых месторождений углеводородов [4].

Большое значение для сохранения экологической среды имеют информационные технологии. Так, с помощью геоинформационных технологий можно отслеживать изменения, происходящие в регионе. Проведение геоэкологического анализа окружающей среды особенно важно в районах интенсивной разработки и добычи углеводородов. Можно выделить несколько методов при создании системы геоэкологического мониторинга. Это, во-первых, разработка серии электронных карт, с помощью которых мы можем наблюдать обстановку на севере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Во-вторых, это разработка баз данных, различные геоэкологические карты. В-третьих, большое значение для экологического контроля имеет использование спутниковых данных, которые позволяют дистанционно наблюдать за изменениями, происходящими на севере ТПП.

В настоящее время удобно использовать для наблюдения за состоянием окружающей среды данные спутниковых наблюдений, проведенные с помощью *Landsat-8*.

Данный спутник снимает около 700 сцен в день. Причем повторно снять эту же поверхность можно раз в шестнадцать дней. Существуют тринадцать зон в различных участках спектра для анализа данных дистанционного зондирования с использованием *Landsat-8*. Разрешение изменяется от 15 до 30 м в зависимости от спектрального диапазона.

Первая зона используется для анализа аэрозолей выделения пыли и дыма. Во второй зоне выделяется синий участок спектра, и эта зона применяется для выделения почвенного покрова от растительности, проведения картографирования типов лесов и выделения техногенных объектов. Третья зона – зеленый участок спектра. Эту зону можно использовать для выделения пиков вегетации, определения здоровья растений. Четвертая зона – красный участок спектра. Пятая зона расположена в ближней инфракрасной зоне, с ее помощью можно определять типы растительности, анализировать вегетативные индексы. Шестая зона – это коротковолновая инфракрасная зона, которую хорошо использовать для анализа содержания влаги в почве. Также ее можно применять для выделения пожаров. Седьмая зона – коротковолновая инфракрасная, дополнительная, удобна для выявления активных пожаров, особенно в ночное время. Восьмая зона имеет более высокое – 15-метровое – разрешение. Девятую зону можно использовать для обнаружения перистых облаков. Также существует десятая и одиннадцатая зоны, которые расположены в длинноволновой инфракрасной области и предназначены для определения температуры в почвах и влаги в грунтах. Они имеют 100-метровое разрешение.

При разведке и разработке месторождений углеводородов современные технологии позволяют фиксировать изменения, происходящие в окружающей среде. Например, использование спутниковых данных позволяет наблюдать, как изменяется ландшафт, гидросеть, состояние заболоченности, а также насколько значительны последствия, возникающие при разведке и добыче месторождений нефти и газа. При экологическом мониторинге возможно выявление участков аварийных выбросов, проведение их картографической привязки, можно рассчитывать площади, которые нуждаются в рекультивации.

В настоящее время на территории севера Тимано-Печорской провинции можно выделить районы, где происходит интенсивная добыча месторождений нефти и газа. В данных местах формируется повышенный фон загрязнения битуминозными веществами. Несмотря на сложные природно-климатические условия, затраты на добычу одной тонны нефти здесь несколько ниже, чем во многих других регионах России благодаря незначительной глубине залегания нефтяных пластов и достаточно высокому дебиту скважин. Все это способствует тому, что на севере Тимано-Печорской провинции происходит интенсивная добыча углеводородов. Хотя эти районы уже достаточно освоенные, здесь существует большая вероятность открытия новых нефтегазоносных площадей на северо-востоке ТПП, а также в Ненецком автономном округе и на о. Колгуев.

Пониженная способность севера Тимано-Печорской провинции к самоочищению, близко залегающая многолетняя мерзлота, длительная зима, а также учет значительного количества решений при добыче и транспортировке нефти и газа – все это требует необходимости учитывать влияние экологической среды при разработке и эксплуатации месторождений [6]. Поэтому важно больше внимания уделять экологическим проблемам, возникающим при формировании нефте- и газодобывающей добычи на севере ТПП. Многие из этих проблем можно решать дистанционными методами.

Территория севера ТПН НПП имеет среднюю степень изученности глубоким бурением и сейсморазведкой, существует значительная перспективность данных районов для выделения новых структурных, а также неструктурных ловушек углеводородов. Это свидетельствует о том, что данную территорию можно рассматривать как потенциально устойчивую в плане экономического развития в течение продолжительного времени. При этом роль экологического контроля в процессе поиска, разведки и добычи углеводородов весьма значительна.

Список литературы

1. Базарский О.В., Косинова И.И. В сб.: Экологическая геология крупных горнодобывающих районов Северной Евразии (теория и практика). Воронеж, 2015. С. 42–75.
2. Богацкий В.И., Ларионова З.В., Савинкин П.Т. Перспективы поисков стратиграфически экранированных ловушек в среднедевонских отложениях // Стратиграфия и литология нефтегазоносных отложений Тимано-Печорской провинции. Л.: ВНИГРИ, 1988. С. 7–17.
3. Богданов Б.П. Особенности размещения верхнедевонских органогенных построек Тимано-Печорской провинции и связь их с разломами фундамента // Рифогенные зоны и их нефтегазоносность: сб. науч. тр. ИГиРГИ. М., 1991. С. 150–156.
4. Косинова И.И. В сб.: Экологическая геология крупных горнодобывающих районов Северной Евразии (теория и практика). Воронеж, 2015. С. 42–75.
5. Рубанова Н.Д. Экология нефти и газа. Ростов н/Д: Изд-во ЗАО «Цветная печать», 2000. 254 с.
6. Савельев Б.А. Физико-химическая механика мерзлых пород. М.: Недра, 1989. 508 с.

M.G. Vakhnin

Institute of Geology of Komi NC RAS, Syktyvkar, Russia
e-mail: misha2006@gmail.com

ENVIRONMENTAL PROBLEMS ARISING FROM THE DEVELOPMENT OF FIELDS IN THE NORTH OF THE TIMANPECHORA OIL AND GAS PROVINCE

The factors of anthropogenic and technogenic impact on the environment during the exploration and production of hydrocarbons in the north of the Timan-Pechora oil and gas province are considered. A characteristic is given of using remote sensing methods using a geographic information system for assessing the degree of environmental risk and monitoring the dynamics of changes in the geoecological environment in a given territory.

Keyword: geoecology, geoinformation systems, environment, ecology, satellite data, north of Taman province.

Б.С. Добронев, О.А. Попова, А.М. Мерко

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: OlgaArc@yandex.ru

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ И МЕТОД ТРАНСФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрены вопросы численного моделирования задач со случайными входными данными. Изучено нахождение совместной функции плотности вероятности вектора выходных параметров. Предлагается использовать вычислительный вероятностный анализ и метод трансформаций. Приведен численный пример совместной функции плотности вероятности вектора решения системы нелинейных уравнений со случайными входными данными.

Ключевые слова: вычислительный вероятностный анализ, метод трансформации, численное моделирование, функции случайных аргументов, системы нелинейных уравнений.

Введение. Для решения многих практических задач, использующих в том числе данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), применяется подход, основанный на численном моделировании, когда входные параметры имеют различные типы неопределенности, в том числе носят случайный характер. Если исходная модель описывается функцией или системой уравнений от случайных аргументов, то важное значение имеют вопросы, связанные с имеющимися у исследователя знаниями о виде функций плотности вероятности входных и выходных характеристик, совместной функции распределения, а также функциональных зависимостях, устанавливающих моделирующие связи между входными и выходными параметрами. Знания или отсутствие таковых существенным образом влияют на выбор методов и подходов для решения как частных задач численного моделирования, так и общей задачи в целом, продиктованной практической проблемой.

Одним из основных способов решения подобных задач является численное моделирование методом Монте-Карло. Этот подход применяется, например, для моделирования взаимодействия солнечного излучения с растительной средой [1]. Здесь важным этапом моделирования является формирование достаточной статистики (обычно десятки, сотни и более тысяч) траекторий случайных параметров. Работа с таким объемом информации характеризуется сложностью вычислений и низкой скоростью сходимости вычислительного процесса. Альтернативой методу Монте-Карло является вычислительный вероятностный анализ (ВВА), где предлагаются методы решения линейных и нелинейных систем уравнений со случайными параметрами.

В статье рассматривается математическая модель в виде системы функций со случайными аргументами. Для вычисления совместной функции плотности вероятности вектора выходных параметров применяется модифицированный метод, основанный на применении ВВА и метода трансформации. На примере решения системы нелинейных уравнений демонстрируется алгоритм построения совместной функции плотности вектора решения. Для этого используется одно из основных понятий ВВА – вероятностное расширение.

Метод трансформации. Рассмотрим применение метода трансформаций для вычисления совместной функции плотности вероятности вектора выходных параметров системы функций со случайными аргументами [9].

Пусть математическая модель описывается системой функций

$$\begin{aligned} z_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n), \\ &\vdots \\ z_m &= f_m(x_1, \dots, x_n), \end{aligned} \quad (1)$$

где $Z = (z_1, \dots, z_m)$, $X = (x_1, \dots, x_n)$, $m \leq n$.

Совместную функцию плотности вероятности p_z случайного вектора Z можно найти непосредственно в терминах совместной функции плотности вероятности p_x случайного вектора X , найдя эквивалентные события бесконечно малых прямоугольников. Рассмотрим для примера линейное преобразование случайных векторов при $m = n$:

$$Z = AX.$$

Обозначим через A матрицу $n \times n$. Предположим, что A имеет обратную, поэтому каждому вектору X соответствует единственный Z , полученную из

$$X = A^{-1}Z \quad (2)$$

Рассмотрим бесконечно малый прямоугольный параллелепипед. Бесконечно малый прямоугольный параллелепипед и параллелепипед являются эквивалентными событиями, поэтому их вероятности должны быть равны

$$p_x(X)dX = p_z(Z)dP,$$

где dX , dP – площади параллелепипедов. Таким образом, совместная функция плотности вероятности для Z определяется как

$$p_z(Z) = p_x(X) / (|dP/dX|), \quad (3)$$

где случайные векторы X и Z связаны с формулой (2). Уравнение (3) утверждает, что совместная функция плотности вероятности для случайного вектора X является совместной функцией плотности вероятности для случайного вектора Z в соответствующей точке, но пересчитывается с помощью «коэффициента растяжения» $|dP/dX|$.

Рассмотрим общий случай $m < n$, представим модель (1) в виде

$$\begin{aligned} z_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n), \\ &\vdots \\ z_m &= f_m(x_1, \dots, x_n), \\ z_{m+1} &= f_{m+1}(x_1, \dots, x_n), \\ &\vdots \\ z_n &= f_n(x_1, \dots, x_n). \end{aligned} \quad (4)$$

Предположим, что функции f_1, \dots, f_m взаимно-однозначные, непрерывно дифференцируемые, и существует следующее обратное преобразование:

$$X = F^{-1}Z_1.$$

Дифференциал системы (4) можно представить в виде

$$dZ_1 = F'(X)dX,$$

где $F'(X)$ – матрица первых производных. Тогда совместная функция плотности вероятности $f_{Z_1}(Z_1)$ для случайного вектора Z_1 равен

$$f_{Z_1}(Z_1) = f_X(F^{-1}Z_1) / |F'(F^{-1}Z_1)|.$$

Поскольку случайный вектор $Z_1 = (z_1, \dots, z_m, \dots, z_n)$ содержит в общем случае фиктивные компоненты z_{m+1}, \dots, z_n для вычисления совместной функции плотности вероятности $f_Z(Z)$ необходимо произвести интегрирование по фиктивным переменным. Проиллюстрируем это примере решения системы нелинейных уравнений со случайными параметрами.

Системы нелинейных уравнений. Рассмотрим задачу нахождения множества решений системы нелинейных уравнений

$$f_i(x, k) = 0, i = 1, \dots, n,$$

где $x \in R^n$ – вектор решений, $k \in R^m$ – вектор параметров. Относительно $k \in R^m$ будем предполагать, что известны функции плотности вероятности. Будем рассматривать случай $m \geq n$. Заметим, что случай строгого неравенства $m > n$ можно свести к случаю $m = n$ использованием результатов вероятностных расширений.

Рассмотрим частный случай $m = n$. Продифференцировав исходную систему нелинейных уравнений, получаем

$$\begin{aligned} F'_x(x, k)dx + F'_k(x, k)dk &= 0, \\ dx &= -(F'_x(x, k))^{-1} F'_k(x, k)dk. \end{aligned}$$

Таким образом, зная решение x при некоторых значениях параметров k , можно получить связь dx и dk . Последнее позволяет вычислить значение совместной функции плотности вероятности решения.

Рассмотрим пример системы нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 - r^2 &= 0, \\ xy - c &= 0, \end{aligned}$$

где r, c – равномерные случайные величины, плотности вероятности которых имеют носители $[1, 1.1]$, $[0.4, 0.5]$.

Пусть при некоторых значениях r_0, c_0 решение системы x_0, y_0 , тогда справедливо

$$\begin{pmatrix} 2x_0 & 2y_0 \\ y_0 & x_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2r_0 dr \\ dc \end{pmatrix}.$$

При этом прямоугольник S_0 со сторонами dr, dc переходит в четырехугольник S_1 со сторонами dx, dy . Решив систему, получаем значения dx, dy . Плотность вероятности множества решений в точке (x_0, y_0) пропорциональна отношению площадей $|S_0| / |S_1|$:

$$p(x_0, y_0) = p_1(r_0, c_0) |S_0| / |S_1|.$$

Таким образом, для того чтобы построить совместную функцию плотности случайных величин x, y , построим сетки в области носителей случайных величин $r, c : \{r_i, i := 0, \dots, m\}, \{c_j, j := 0, \dots, m\}$. Решим $(m+1)^2$ систем нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 - r_i^2 &= 0, \\ xy - c_j &= 0, i, j = 0, \dots, m. \end{aligned}$$

На рисунке представлена триангуляция области решения системы нелинейных уравнений. Вершины треугольников – точки решений с вычисленными значениями плотности совместной функции вероятности решения $p(x^i, y^j)$. Таким образом, используя линейную интерполяцию, на каждом треугольнике можно построить значение совместной функции плотности вероятности. Оттенками серого представлена совместная функция плотности решения системы нелинейных уравнений.

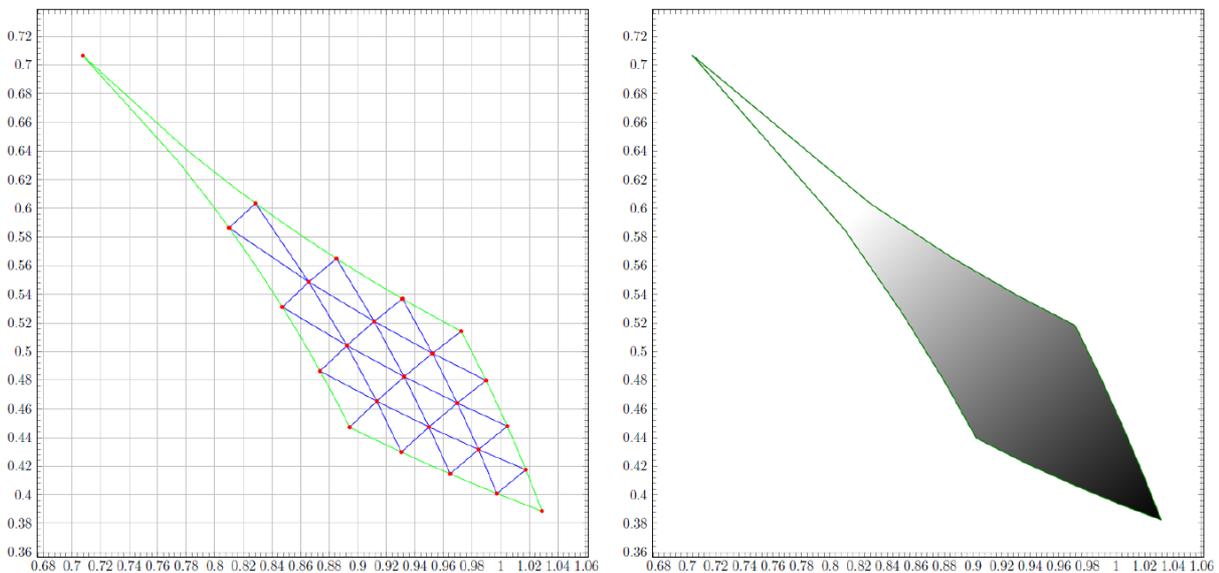


Рисунок. Триангуляция области решения и совместная функция плотности системы нелинейных уравнений

В данном примере для построения совместной функции плотности решения необходимо решить всего 25 раз систему нелинейных уравнений, метод Монте-Карло потребует порядка 10^6 решений. Общий случай построения плотностей вероятности может быть реализован, используя построение вероятностных расширений.

Заключение. Рассмотрен случай, когда моделирующие взаимосвязи входных и выходных переменных представлены в виде систем уравнений, как линейных, так и нелинейных, со случайными неопределенностями. Применение ВВА и метода трансформации позволяет находить совместные функции плотности вероятности выходных параметров задач ДЗЗ. Способ построения совместной функции плотности вероятности решения снимает ограничения на требование независимости входных параметров, предоставляет аналитическую и графическую возможность построения вероятностной области возможных значений выходных параметров.

Предлагаемый модифицированный подход обеспечивает результатам численного моделирования необходимую точность вычислений, что гарантируется свойствами численных арифметических процедур, разработанными в рамках ВВА.

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. Добронетц Б.С., Попова О.А. Вычислительный вероятностный анализ: модели
3. и методы: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 236 с.
4. 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.
5. Dobronets B.S., Popova O.A. The numerical probabilistic approach to the processing and presentation of remote monitoring data // J. of Sib. Federal University. 2016. Vol. 9, № 7. P. 960–971.
6. Dobronets B.S., Popova O.A. Piecewise polynomial aggregation as preprocessing for data numerical modeling // IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf. Series 1015. 2018. 032028. DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032028.
7. 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) 012006 doi:10.1088/1757-899X/354/1/012006.
8. Dobronets B.S., Popova O.A. Improving the accuracy of the probability density function estimation // J. of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. 2017. № 10 (1). P. 16–21.
9. Dobronets B.S., Popova O.A. Computational aspects of probabilistic extensions // Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 47. С. 41–48.
10. Leon-Garcia A. Probability, statistics, and random processes for electrical engineering. University of Toronto: Pearson Education, Inc. 2008. 833 p.

B.S. Dobronets, O.A. Popova, A.M. Merko
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: OlgaArc@yandex.ru

COMPUTATIONAL PROBABILISTIC ANALYSIS AND THE METHOD OF TRANSFORMATION IN THE PROBLEM OF REMOTE EARTH SENSING

The issues of numerical modeling of problems with random input data are considered. Finding the probability density functions of the output parameters is studied. It is proposed to use computational probabilistic analysis and the transformation method. A numerical example of a system of nonlinear equations with random input data is given.

Keywords: computational probabilistic analysis, transformation method, numerical modeling, functions of random arguments, systems of nonlinear equations.

Л.Г. Евстратова, И.Н. Пеньшин

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
e-mail: lge_21@mail.ru; ignat.penshin51@gmail.com

ПОСТРОЕНИЕ СЕТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ ТОЧЕК ПАНОРАМНОЙ СЪЕМКИ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ

Показана актуальность разработки новых решений по построению навигационной сети по точкам пешеходной панорамной съемки для мониторинга объектов инфраструктуры города. Настоящее исследование решает задачу построения навигационной сети для веб-сервиса по просмотру уличных панорам. Отличительной особенностью данного сервиса является акцент на внутриквартальную съемку. Это условие формирует задачу построения навигации внутри дворовых территорий. Разработан и программно реализован вычислительно эффективный автоматизированный алгоритм построения сети пространственной маршрутизации для точек панорамной съемки в условиях отсутствия дорожного графа. Задача рассматривается с позиции теории графов, работа алгоритма реализована в функциональном блоке интеллектуального агента. Выполнена апробация разработанного алгоритма на реальных данных.

Ключевые слова: материалы панорамной съемки, сеть пространственной маршрутизации, интеллектуальный агент, теория графов.

Эффективность управления городскими ресурсами зависит от полного и своевременного получения информации об объектах городской инфраструктуры, что достигается путем проведения мониторинга. В настоящее время панорамная съемка позволяет выполнять сбор пространственной информации о состоянии инфраструктуры города и окружающей среды с высокой пространственной точностью. Одним из преимуществ панорамной съемки является возможность осуществлять обзор пространства в сравнимом с человеческим восприятием виде. Растровый геопривязанный и ориентированный в пространстве панорамный снимок позволяет использовать актуальные сведения о городском пространстве. Интерпретация полученного массива данных при проведении панорамной съемки в рамках геоинформационной системы позволяет провести инвентаризацию и последующий анализ соответствия использования тех или иных территорий целевому назначению.

Подобные технологии успешно реализуются средствами автомобильной панорамной съемки в паре с параллельным сканированием окружающей среды. Однако автомобильная съемка не обеспечивает полного покрытия городской территории и ограничивается захватом уличной территории, прилегающей к формирующим маршрут передвижения автомобильным дорогам общего пользования.

Пешеходная панорамная съемка обеспечивает максимально возможное территориальное покрытие и достаточно высокую мобильность оператора панорамной съемки.

Дорожки для пешеходов, велодорожки, даже асфальтированные автомобильные дороги внутри дворовых территорий часто имеют неизвестный статус или вообще не отражены из-за отсутствия обследования или невозможности определения отношений с ближайшими дорогами в камеральных условиях. В данной ситуации

даже при прямой видимости между соседними точками фотографирования создание навигации между панорамными снимками на основе дорожных сетей становится затруднительной или невыполнимой задачей. Таким образом, классический метод использования дорожной сети для навигации по панорамной съемке становится нерелевантным. Актуальной является задача разработки интеллектуального агента [1–3] по построению навигационной сети внутри дворовых территорий.

Цель исследовательской работы заключалась в разработке автоматизированного алгоритма построения сети пространственной маршрутизации для точек панорамной съемки в условиях отсутствия дорожного графа для рассматриваемой съемочной территории, при котором в качестве опорной информации для построения сети используются картографические данные о площадных объектах капитального строительства.

При пространственной маршрутизации по массиву точек панорамной съемки без привязки к дорожной сети необходимо определить исходные данные и поставить задачу для построения решающих правил [1–3]. Предложено и реализовано решение, в котором массив точек и связи между ними рассматриваются как изоморфный неориентированный граф. Вершинам графа соответствует слой с точечными объектами, а ребрам – слой с линейными объектами. Неориентированность свидетельствует о наличии прямых и обратных направлений перемещения между любой парой смежных вершин. Каждому слою соответствует своя таблица в базе данных ГИС [2; 3]. Каждый точечный объект имеет свой идентификационный номер (id), а таблица для слоя линейных объектов содержит столбцы атрибутивной информации о id точек начала и конца каждой линии. Таким образом, мы имеем полные сведения об инцидентности всех элементов графа друг с другом.

Так как формирование графа происходит в результате определения окрестности для каждой вершины, можно сказать, что все частные графы с началом в точках массива определяют друг друга и являются однозначно связанными – отсюда следует, что графу присуще свойство изоморфизма [4]. Достижение изоморфизма при построении сети является одной из ключевых задач построения сети пространственной маршрутизации. Заметим, частный граф – изначально неориентированный граф, построенный для одной начальной вершины. Частный граф определяет окрестность данной начальной вершины. Понятие введено авторами для решения поставленной задачи. В качестве дополнительного условия выступает взаимодействие с уличной дорожной сетью с целью создания корректной навигации, исключаяющей связи панорам на разных концах проезжей части и обеспечивающей корректное перемещение пользователя в пределах квартала. Следует иметь в виду, что на данном этапе рассматриваются дороги с высоким приоритетом, информация о которых в большинстве случаев является актуальной.

Таким образом, к исходным данным относятся: массив точек панорамной съемки, полученный в результате полевых изысканий; массив площадных объектов, загруженный с сервера OSM, который содержит информацию о капитальных объектах строительства; массив линейных объектов дорожной сети, загруженный с сервера OSM, содержит информацию о дорогах общего пользования с высоким приоритетом.

В результате подключения всех вышеперечисленных слоев мы получаем информацию, достаточную для решения задачи пространственной маршрутизации между точками панорамной съемки. Решение заключается в построении ребер между вершинами графа.

На основе ряда геометрических условий [4] предложен алгоритм построения сети пространственной маршрутизации. Последовательность действий алгоритма

реализована в функциональном блоке интеллектуального агента, принимающего на вход исходные данные и возвращающего набор связей между точечными объектами. На рисунке представлена блок-схема, последовательность действий алгоритма построения навигационной сети.

Объектной реализацией задачи является автоматически заполняемый слой линейных объектов, связывающих панорамные снимки максимально логично и оптимально в прямом и обратном направлении, избегая отсутствия видимости между панорамами, схлопывания, чрезмерного удаления между связанными панорамами. В процессе разработки и тестирования алгоритма возникало большое количество неоднозначных ситуаций, распознавание и учет которых позволил построить отказоустойчивый и масштабируемый алгоритм, обеспечивающий создание навигационной сети для более чем миллиона панорамных снимков Москвы, привязанных и сориентированных на электронной карте общего пользования. Алгоритм опирается на открытую и наиболее актуальную базу геоданных городской среды *OSM – Open Street Map*.



Рисунок. Алгоритм построения навигационной сети

Таким образом, изменение городской среды (транспортные сети, капитальные сооружения) не является препятствием для работы созданной навигационной сети. Сохраняется возможность перестраивать сеть в любых необходимых масштабах (треки съемки, группы треков, городские районы, административные округа, целый город).

В результате геопортал, агрегирующий и предоставляющий пользователю растровые геопривязанные и ориентированные в пространстве панорамные снимки, позволяет решать следующие прикладные задачи: аналитика в области городского планирования без необходимости физического присутствия на исследуемой территории; инвентаризация объектов инженерной, транспортной, социальной, производственной, жилой инфраструктуры; развитие рекреационного потенциала территорий и т.д.

Список литературы

1. Kwan M.P., Hong X.D., Network-based constraints-oriented choice set formation using GIS // Geographical Systems. 1998. № 5. С. 148–153.
2. Hand D.J. Data mining // Encyclopedia of Environmetrics. 2006. № 2.
3. Spatial process and data models: Toward integration of agent-based models and GIS / D.G. Brown, R. Riolo, D.T. Robinson [et al.] // J. of Geographical Systems. 2005. № 7 (1). P. 25–47.
4. Penshin I.N., Evstratova L.G. Method for constructing a navigation network of survey points in the conditions of cartographic information about the urban environment // E3S Web Conf., Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2019). 2020. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/09/e3sconf_rpers2020_02001/e3sconf_rpers2020_02001.html

L.G. Evstratova¹, I.N. Penshin

State University of Land Use Planning Elarusian State University, Moscow, Russia
e-mail: lge_21@mail.ru; ignat.penshin51@gmail.com

SPATIAL ROUTING NETWORK CONSTRUCTION FOR PANORAMIC SURVEY POINTS WHEN MONITORING URBAN AREAS

The article shows the relevance of developing new solutions for constructing a navigation network based on points of pedestrian panoramic shooting for monitoring city infrastructure. This study solves the problem of constructing a navigation network for viewing street panoramas web service. A distinctive feature of this service is the emphasis on intra-quarter shooting. This condition forms the task of constructing navigation inside courtyards. A computationally efficient automated algorithm for construction a spatial routing network for panoramic survey points in the absence of a road graph has been developed and implemented programmatically. The problem is considered from the point of view of graph theory, the algorithm is implemented in the functional block of the intelligent agent. The developed algorithm was tested on real data.

Keywords: panoramic shooting materials, spatial routing network, intelligent agent, graph theory.

Е.А. Ерофеев, В.Н. Катаев¹

¹Доктор геолого-минералогических наук
Пермский университет (ПГНИУ), Пермь, Россия,
e-mail: erofeev-ea@yandex.ru; kataev@psu.ru

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ КАРСТА НИЖНЕИРЕНСКО-ОРДИНСКОГО ОПОРНОГО УЧАСТКА

Представлены результаты исследований по использованию дистанционных и геофизических методов для изучения геологических закономерностей развития карста. Рассмотрены практические аспекты расширения возможностей применения дистанционных методов при инженерно-геологических изысканиях на закарстованных территориях. Анализ и интерпретация материалов исследований выполнена при помощи пространственного анализа и математических методов.

Ключевые слова: карстовые формы, распределение, частота, мощность, глубина, структурный план.

Введение. Принимая во внимание нормативные требования к проведению инженерно-геологических изысканий на закарстованных территориях (СП 11-1057-П) в части выполнения предварительного дешифрирования АКС и комплексирования с общегеологическими методами, авторами, основываясь на результатах карстологического дешифрирования, радарной съемки земной поверхности и материалах бурения, дана математическая оценка влияния различных природных факторов на параметры карстовых форм.

Территория исследований. В качестве территории исследований обоснована площадь Нижнеиренско-Ординского опорного участка, занимающего правобережную часть нижнего течения реки Ирень до долготы села Орда и соответствующего северной части Иренского района гипсового и карбонатно-гипсового карста.

Геолого-структурные условия – платформенные, участок расположен в пределах Веслянского вала, осложняющего Бымско-Кунгурскую впадину. Геологический разрез изучен по материалам структурно-поисковых скважин до глубин 200–400 м. В геологическом строении участвуют отложения уфимского, кунгурского и артинского ярусов, покрытых чехлом рыхлых элювиально-делювиальных и аллювиальных осадков. Характер распространения карстующихся и покровных отложений предопределил условия развития карста. Карстуются сульфатно-карбонатные отложения иренского горизонта и в меньшей степени – карбонатные филипповского горизонта и артинского яруса. В восточной части иренский горизонт разрушен на различную глубину и преобразован в карстовую брекчию, представленную сцементированными обломками ангидритов и доломитов. Карст относится к голому, задернованному, на значительных площадях – к подэлювиальному, в долинах рек – к подаллювиальному, и к закрытому – под соликамскими породами. Карстовые формы – самые разнообразные: воронки, провалы, поноры и т.п. [1].

Геологическая изученность. Территория участка и сопредельных площадей характеризуется высокой степенью. Основу исследований составили материалы бу-

рения, комплексной гидрогеологической съемки и специальных работ по изучению карста Пермского края.

Картографические построения базируются на материалах литолого-стратиграфических разбивок структурно-поисковых (298 шт.) и различных гидрогеологических (450 шт.) скважин, вскрывших кровлю иренского горизонта. Расчленение разреза выполнено по ГИС. Сведения о поверхностной закарстованности получены по материалам дешифрирования КФС [3–5]. Топографическая основа построена с привлечением материалов космической радарной съемки (SRTM).

Методика исследований. Комплектование и анализ геолого-геофизических и дистанционных данных, а также математическая оценка закономерностей развития карста выполнена с помощью анализа пространственных данных. Техническим инструментом послужил программно-аналитический ресурс геоинформационной платформы ARC GIS. Основу анализа составил комплект элементарных карт, построенных по материалам обобщения и интерпретации исходных данных. Методической базой, определяющей подходы к градации выделяемых факторов и последовательности математических расчетов, послужила вероятностно-статистическая теория В.В. Толмачева [7], некоторые методические положения которой подробно рассмотрены в работе [2].

Обработка результатов исследований выполнена с использованием методов математических методов. Пространственный анализ основан на следующих методических принципах: вероятность образования провальных поверхностных форм контролируется влиянием многочисленных природных факторов, где роль каждого отдельно взятого фактора может проявляться в виде определенной тенденции, которая может быть выражена количественно системой коэффициентов связи Q_i . Градация Q_i ($-1...+1$) отражает вероятность возникновения провалов: от -1 (образование провалов при i -м признаке исследуемого фактора невозможно) до $+1$ (наоборот, возникновение провальных форм возможно только при i -м признаке).

Ранжирование и оценка степени влияния выделенных природных факторов на интенсивность образования карстовых провалов в целом может быть выполнена, прибегая к понятию энтропии из теории информации. Информационная энтропия E события (x) есть сумма (со знаком минус) всех произведений относительных частот появления события i , умноженных на их двоичные логарифмы. Сравнивая соотношение энтропий (E_{\max} / E) нескольких факторов, можно определить степень их значимости в отношении влияния факторов на образование провалов (поверхностных карстовых форм) [7].

Результаты исследований. В границах участка выявлено почти 19 тыс. форм, поперечный размер установлен для 7 384 шт. Закарстованность неравномерная, плотность варьирует от 0,1 до 660 шт/км². Разброс значений обусловлен сочетанием различных природно-геологических факторов. Наибольшее число форм (10 469 шт.) соответствует площади развития лунежкой пачки, 2 039 шт. – тюйской, 2 432 шт. – демидовской, 20 шт. – елкинско-шалашнинской. Значительное число форм зафиксировано и в пределах распространения покровных соликамских отложений – 2 255 шт. Максимальная плотность соответствует границе иренских и соликамских пород, где карстующиеся породы прикрыты лишь тонким чехлом рыхлых отложений. Наиболее закарстованными являются склоны речных долин и водораздельные пространства реки Ирень-Кунгур, изрезанные овражно-балочной сетью.

Эта закономерность хорошо прослеживается по характеру снижения закарстованности по мере удаленности форм от магистральных и более мелких рек.

Анализ удаленности показывает, что эрозионная расчлененность рельефа (глубина врезов, плотность современной гидросети) являются локализирующим фактором развития карстового процесса. По мере удаления от дрен число форм резко снижается (рис. 2).

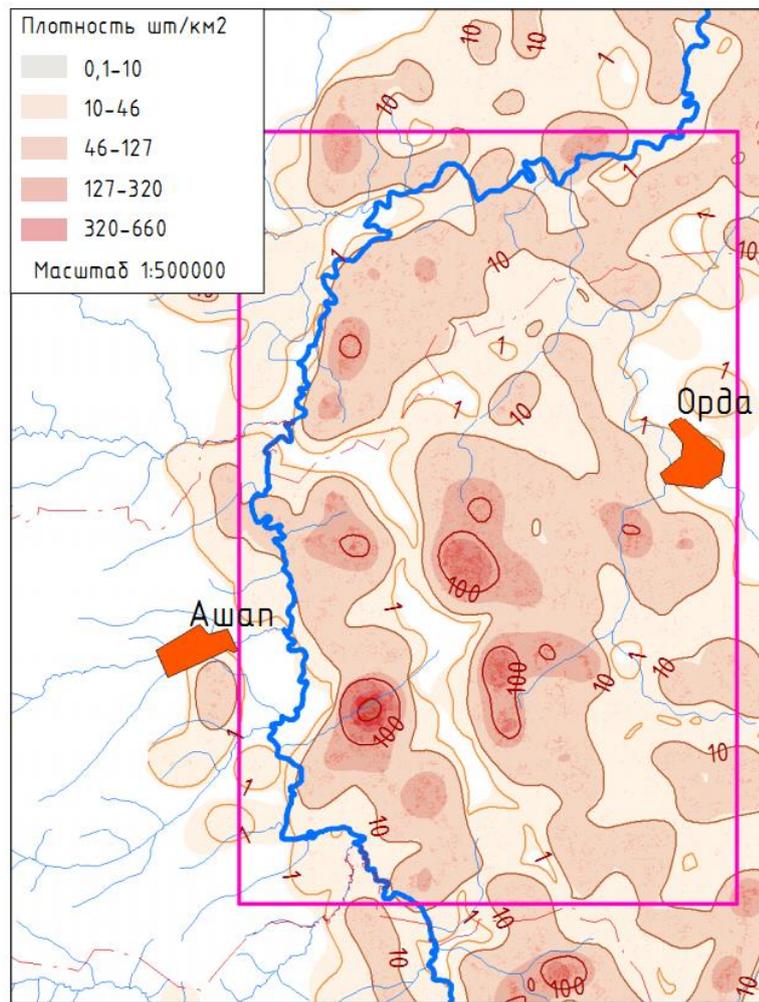


Рис. 1. Карта плотности участка исследований

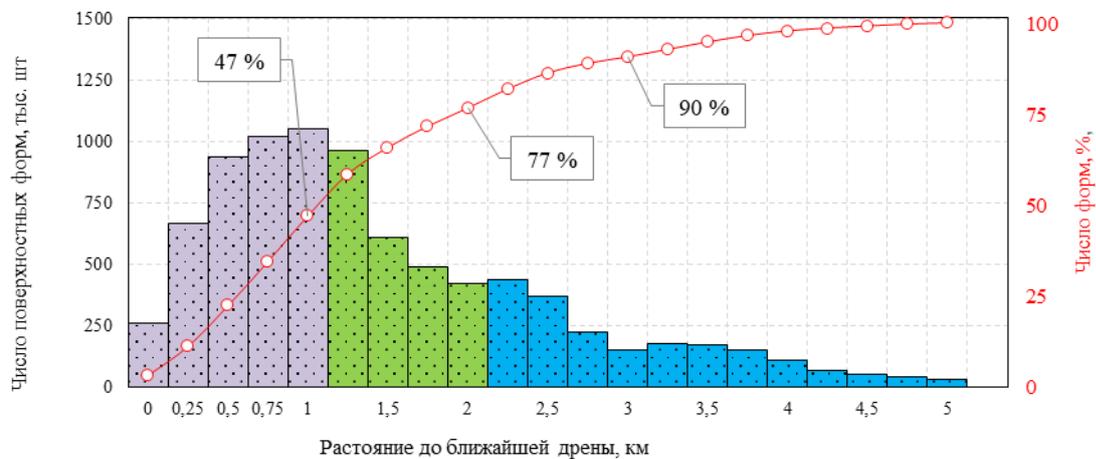


Рис. 2. Характер снижения числа форм от расстояния до речной сети

Половина (47 %) всех выявленных форм сосредоточена в пределах узкой километровой полосы, ограничивающей речную сеть, 80 % локализуется в пределах двух-, а 90 % – в пределах трехкилометровой зоны. Также отмечено изменение диаметров воронок, например, с удалением от дрены средние поперечники увеличиваются с 15,9 до 23,5 м, а максимальные с расстояния 2–2,5 км начинают медленно снижаться с 90 до 43 м.

Представление о характере размещения подземных карстовых полостей и трещиноватых зон по глубине дает диаграмма поглощений бурового раствора Ординской и Опачевской площадей (рис. 3). Максимальное число поглощений соответствует интервалам залегания иренского горизонта 20–80 м. На глубинах, соответствующих филипповскому горизонту, их число резко снижается и вновь повышается после проходки кровли артинского яруса.

Наблюдаемое на опорном участке эмпирическое распределение диаметров карстовых форм советуется логарифмически нормальному закону (рис. 4). Преобладают воронки и провалы с поперечником 10–15 м, общее число которых достигает 50 % от общего числа. Среднестатистический диаметр составляет 17,5 м.

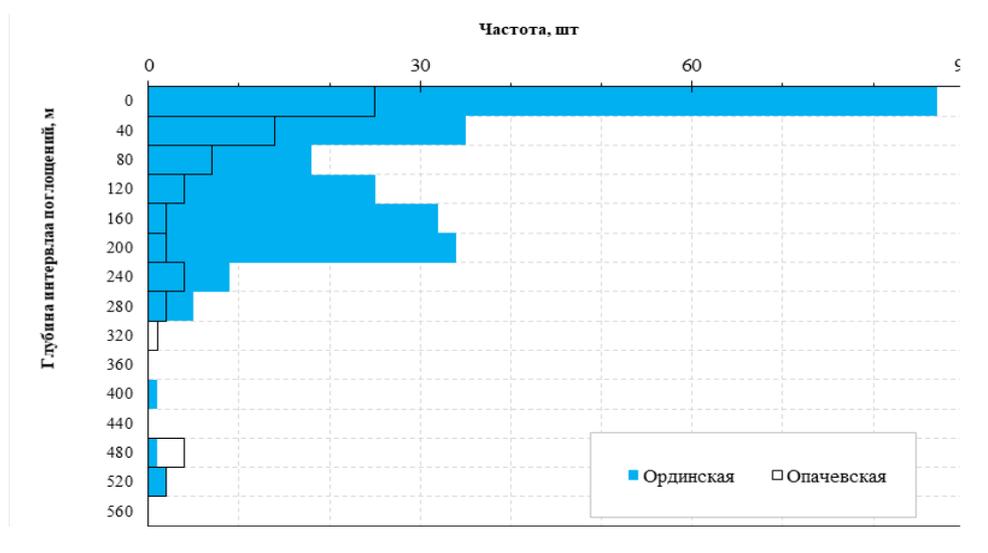


Рис. 3. Диаграмма глубин поглощений

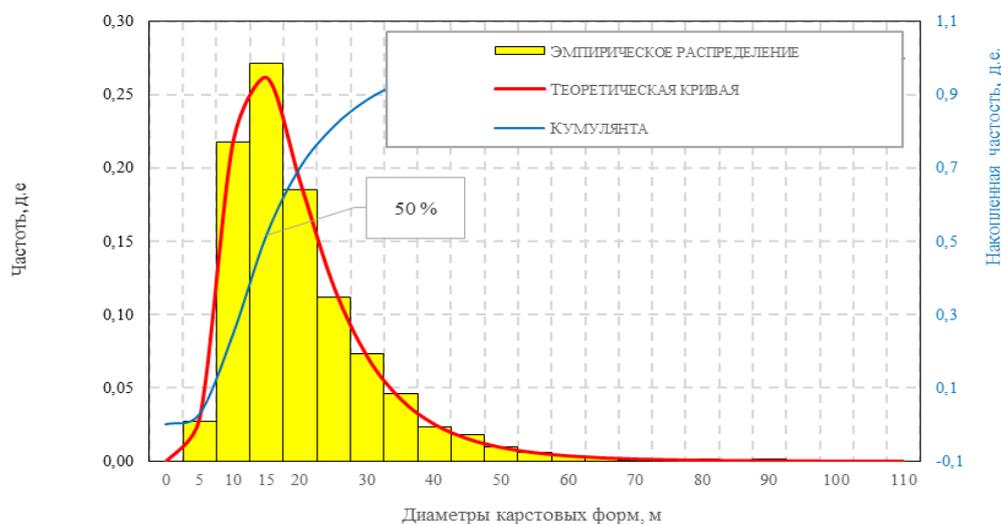


Рис. 4. Гистограмма распределения диаметров карстовых форм

Математическая оценка влияния природных факторов на интенсивность образования карстовых форм

1. Основные тенденции развития карста, связанные с морфологическими особенностями рельефа (поверхность или превышение над уровнем дрены, уклон и энергия), являются интегральными показателями эрозионной расчлененности и контролируют особенности распределения поверхностного стока и глубины дренирования карстовых вод. Уверенно просматривается закономерность изменения поверхностной закарстованности с увеличением поверхности рельефа. В интервале высот 128–190 м, советующих склонам речных долин, число форм возрастает, но при превышении высот не более чем на 190 м их число плавно уменьшается. Подобная тенденция прослеживается и для уклонов рельефа. Рост величины энергетического потенциала отражает уверенную тенденцию увеличения форм. Показательна и роль экспозиции склонов, определяющая характер и интенсивность снеготаяния в весенний период: так, максимальная закарстованность проявляется на склонах западной и южной экспозиций, а минимальная для восточной.

2. Геологические факторы, отражающие особенности геологического строения участка исследований, можно разделить на две группы: *мощности* геологических подразделений и *глубины залегания кровли*.

Мощности по мере увеличения глубин залегания литолого-стратиграфических элементов теряют свою роль и силу влияния на поверхностную закарстованность. Преобладающая роль принадлежит главным образом верхним (туйской и демидковской) пачкам иренского горизонта, для которых выявлена сходная тенденция – с увеличением толщин прослеживается рост числа закарстованности. Для самой же верхней и самой разрушенной пачки – лунежской – тенденция аналогична, но сила фактора минимальна (табл. 1). Вторым по-своему значению являются показатели мощности филипповского горизонта и рыхлых покровных отложений. В обоих случаях увеличение мощности отложений сопровождается снижением числа форм.

3. Показатели глубин кровли карстующихся отложений имеют более высокие коэффициенты, чем геологические факторы первой группы. С увеличением глубин залегания пачек иренского горизонта их сила и степень влияния падают. Максимальные показатели E_{\max}/E принадлежат факторам глубины кровли иренского горизонта и артинского яруса. С погружением ниже определенных отметок общая закарстованность снижается. Математическая тенденция глубины филипповского горизонта тождественна артинскому ярусу, но сила его влияния значительно меньше.

Таблица 1

Сводная таблица коэффициентов E_{\max}/E

Фактор	E_{\max}/E	Фактор	E_{\max}/E
Геоморфологические факторы			
Поверхность рельефа	1,0982	Экспозиция склона	1,0131
Уклоны рельефа	1,0118	Энергия рельефа	1,0270
Геологические факторы			
Мощности		Глубины кровли	
Иренский горизонт	1,0399	Иренский горизонт	1,1487
Филипповский горизонт	1,0677	Филипповский горизонт	1,0858
Лунежская пачка	1,0442	Лунежская пачка	1,1543
Туйская пачка	1,0849	Туйская пачка	1,1469
Демидковская пачка	1,0886	Демидковская пачка	1,1215
Елкинская пачка	1,0229	Елкинская пачка	1,0705
Шалашнинская пачка	1,0493	Шалашнинская пачка	1,0227
Покровные отложения	0,0565	Артинский ярус	1,1762

Математическая оценка характера и степени влияния природных факторов на поперечные размеры поверхностных форм. Оценка и обоснование выбора природных факторов, имеющих влияние на размер карстовых форм, основана на проверке гипотезы об однородности выборок диаметров признаков фактора между собой, на предмет их принадлежности к одной генеральной совокупности. Если все выборки фактора принадлежат к одной генеральной совокупности, то можно считать, что этот фактор практически не влияет на размер. Для проверки использован критерий Комогорова – Смирнова [7; 8], показавший, что все факторы, использованные в работе (табл. 1), оказывают влияние на размеры карстовых форм, что в принципе согласуется с их законом распределения.

Математическая оценка определения степени значимости рассматриваемых факторов по силе их влияния на величину формы, вычислена с помощью коэффициента взаимной сопряженности *T* А.А. Чупрова. В настоящей работе представлены результаты анализа только для наиболее значимых факторов (табл. 2), включая мощность покровных отложений.

Таблица 2

Сводная таблица значений коэффициента сопряженности *T*

Фактор	<i>T</i>	Фактор	<i>T</i>
Мощности		Глубины кровли	
Лунежская пачка	0,0482	Иренский горизонт	0,0653
Покровные отложения	0,0560	Тюйская пачка	0,0596
Поверхность рельефа	0,0695	Демидковская пачка	0,0594
		Артинский ярус	0,0570

Выводы. Выполненный анализ пространственных данных позволил получить актуальные количественные характеристики поверхностной закарстованности, закономерности возникновения и размещения форм в плане и разрезе, выявить и математически обосновать основные природно-геологические условия развития карста Нижнеиренского-Опорного участка. Подготовленные материалы будут положены в основу районирования территории по условиям развития карста и соответствуют предпроектной стадии инженерно-геологических исследований.

Список литературы

1. Карст и пещеры Пермской области / К.А. Горбунова, В.Н. Андрейчук, В.П. Костарев, Н.Г. Максимович. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. 200 с.
2. Ерофеев Е.А., Катаев В.Н. Применение вероятностно-статистических методов оценки карстовой опасности в условиях техногенного воздействия на закарстованные территории // Инженерная геология. Декабрь 4/2010. С. 34–46.
3. Ерофеев Е.А., Катаев В.Н. Идентификация поверхностных карстовых форм по материалам спутниковых изображений // Геология и полезные ископаемые Западного Урала : сб. ст. 37-й Всерос. науч.-прак. конф. (май 23–24 2017, Пермь) / под ред. Р.Г. Ибламинова. 2017. С. 193–197.
4. Erofeev E.A., Kataev V.N. Estimative karst interpretation of satellite images of the south – south-eastern districts of Perm region // International Symposium KARST 2018 – Expect the Unexpected. Trebinje, 2018. P. 143–150.
5. Ерофеев Е.А., Катаев В.Н. Методический подход к проведению оценочного карстологического дешифрирования территории карстовых районов пермского края / Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли // Материалы VI Междунар. науч. конф. Красноярск, 10–13 сентября 2019 г. С. 96–101.
6. Катаев В.Н. Отчет о результатах выполненных работ в 2009 году по объекту «Мониторинг закарстованных территорий Пермской области». ПГУ, 2009.

7. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий / под ред. Е.А. Сорочана. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.

8. Шарапов И.П. Применение математических методов в геологии. 2-е изд., испр. и доп. М.: Недра, 1971. 248 с.

Е.А. Erofeev, V.N. Kataev

Perm State University (PSU), Perm, Russia
e-mail: erofeev-ea@yandex.ru; kataev@psu.ru

GEOLOGICAL CONDITIONS OF DEVELOPMENT OF KARST NIZHNEYANSK-ORDA SUPPORT SECTION

The paper presents the results of research on the use of remote and geophysical methods to study the geological patterns of karst development. The practical aspects of expanding the possibilities of using remote methods for engineering and geological surveys in karst territories are considered. Analysis and interpretation of research materials was performed using spatial analysis and mathematical methods.

Keywords: karst forms, distribution, frequency, power, depth, structural plan.

УДК 528.8

А.Н. Жуковская

Аспирант, Сибирский государственный университет науки
и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: zhukovskaya.angelina@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЗЕМНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Работа представляет собой исследование современных инструментов глубокого обучения, известных и хорошо зарекомендовавших себя моделей, таких как DenseNet121, InceptionV3, VGG16, VGG19, Xception, ResNet50 и InceptionResNetV2. Результаты решения задачи классификации, полученные благодаря сверточным нейронным сетям, сравниваются с результатами, полученными классическими методами машинного обучения: случайный лес и метод опорных векторов.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, глубокое обучение, мультиспектральные изображения, методы машинного обучения, тонкая настройка, классификация земного покрова.

Несмотря на достижения глубинных сверточных нейронных сетей (СНС) в различных задачах машинного распознавания образов, их потенциал для классификации многоспектральных изображений дистанционного зондирования полно-

стью не исследован. Дистанционное зондирование – эффективный инструмент, позволяющий снизить затраты и время, учитывая ограничения традиционных методов, путем предоставления ценных экологических сведений для мониторинга изменений земного покрова [1–3]. Оптические датчики дистанционного зондирования собирают спектральную информацию о наземных объектах в различных точках электромагнитного спектра, например, в видимой и инфракрасной областях [4]. Основными целями работы были: исследовать возможности глубоких СНС для классификации спектрально схожих классов; изучить обобщающую способность существующих СНС для классификации многоспектральных спутниковых изображений; сравнить эффективность известных СНС: DenseNet121, InceptionV3, VGG16, VGG19, Xception, ResNet50 и InceptionResNetV2. Таким образом, данное исследование способствует использованию самых современных инструментов классификации для составления сложных карт земного покрова с использованием данных многоспектрального дистанционного зондирования.

Использовалась тонкая настройка СНС. На рис. 1 продемонстрирована эффективность на валидационной и обучающей выборке, а также ошибку при тонкой настройке СНС с использованием трех выбранных сигналов изображений. DenseNet121 имеет самую низкую точность на валидационной выборке, за которой следует VGG16.

При этом сеть Xception имеет самую высокую точность на валидационной выборке, за которой следует InceptionResNetV2. Две СНС, а именно InceptionV3 и ResNet50, показывают относительно одинаковую точность на валидационной выборке. На рис. 2 продемонстрирована точность на обучающей и валидационной выборке, а также ошибка в случае, когда использовались три сигнала изображений. Как показано, все СНС, за исключением DenseNet121, очень хорошо справляются с классификацией при сравнении точности на валидационной выборке. В частности, три СНС (InceptionResNetV2, Xception и VGG19) имеют более высокую точность на обучающей и валидационной выборке по сравнению с другими известными СНС. Кроме того, DenseNet121 имеет самую низкую точность на валидационной выборке. Вероятно, эта сеть менее пригодна для комплексного картирования земного покрова по сравнению с другими сетями. На рис. 3 показана точность на валидационной и обучающей выборке, а также ошибка в случае обучения сетей с нуля, при использовании пяти сигналов изображений. Эффекты от увеличения количества сигналов легко увидеть при сравнении рис. 2 и 3. Увеличение числа сигналов повышает точность классификации во всех случаях. Например, точность на валидационной выборке у DenseNet121 была ниже 90 %, при использовании лишь трех сигналов. Однако при увеличении количества сигналов точность DenseNet121 на валидационной выборке достигла 94 %. InceptionResNetV2 снова показывает высочайшую точность на валидационной выборке, следующие по эффективности идут ResNet50, Xception и VGG19. Таким образом, результаты показывают важность включения большей спектральной информации.

Результаты классификации также сравнивались с результатами, полученными с помощью двух традиционных инструментов машинного обучения. В таблице представлены точность, коэффициент Каппа и метрика F1 с использованием различных СНС (полное обучение на пяти сигналах), случайный лес и метод опорных векторов. Как видно из таблицы, случайный лес и метод опорных векторов имеют самую низкую точность классификации и метрику F1 по сравнению со всеми глубокими СНС. Результаты показывают, что обучение СНС с использованием пяти спектральных сигналов превосходит классические СНС. InceptionResNetV2, ResNet50 и Xception являются лидерами и имеют точность классификации 96,17, 94,81 и 93,57 %.

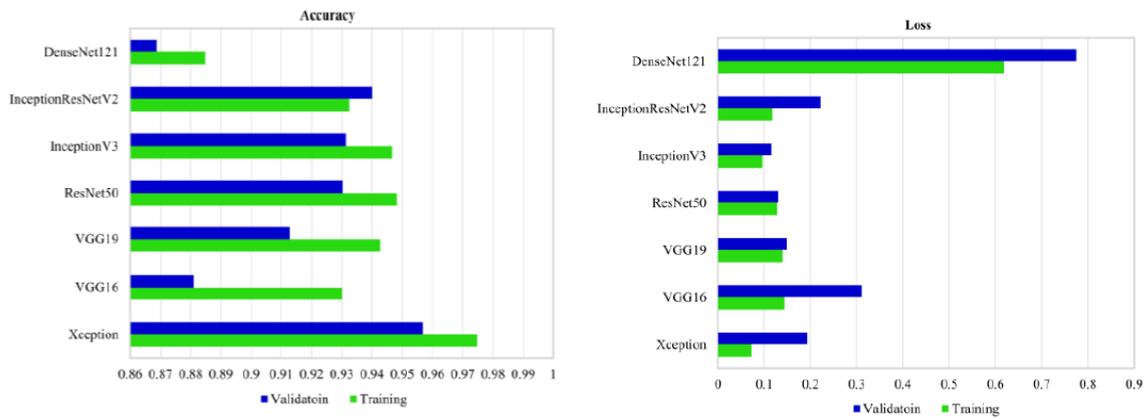


Рис. 1. Сравнение точностей известных СНС на обучающей и валидационной выборках, а также их ошибки при тонкой настройке трех сигналов (зеленого, красного и около-инфракрасного)

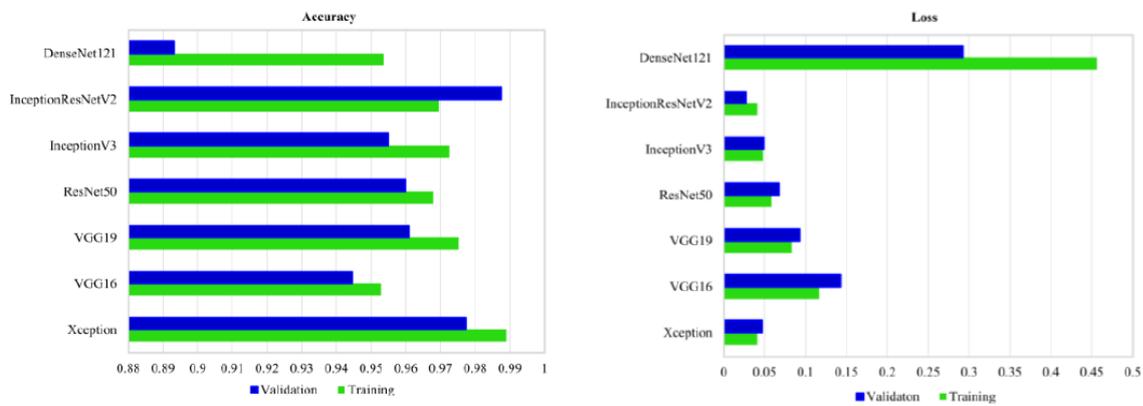


Рис. 2. Сравнение точностей известных СНС на обучающей и валидационной выборках, а также их ошибки, при обучении с нуля, с использованием трех сигналов (зеленого, красного и ближнего инфракрасного)

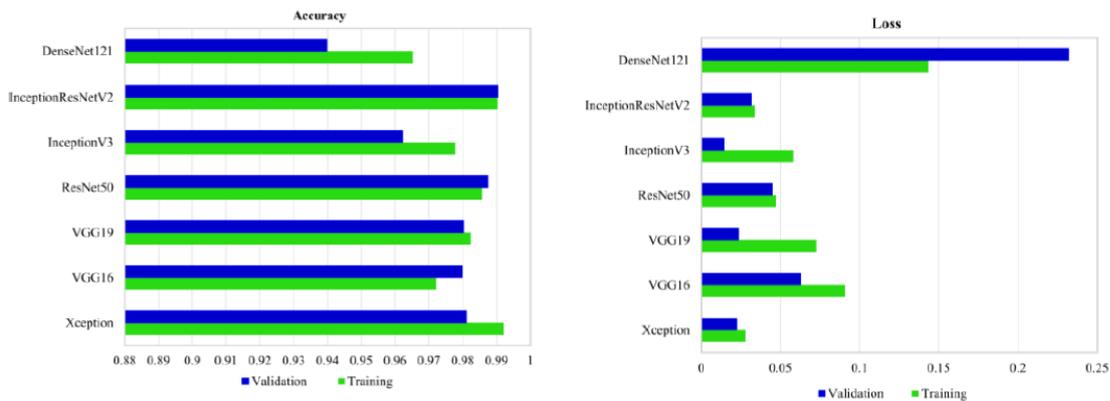


Рис. 3. Сравнение точностей известных CNN на обучающей и валидационной выборках, а также их ошибки при обучении с нуля с использованием пяти сигналов (красного, зеленого, синего, ближнего инфракрасного и около-инфракрасного)

Общая точность (%), коэффициенты Каппа и показатель F1 (%)
с использованием различных глубинных СНС (полное обучение на пяти сигналах),
случайного леса и метода опорных векторов

Методы	Точность	Коэффициенты Каппа	F1
SVM	74,89	0,68	53,58
RF	76,08	0,70	58,87
DenseNet121	84,78	0,80	72,61
InceptionV3	86,14	0,82	75,09
VGG16	87,77	0,84	78,13
VGG19	90,94	0,88	84,20
Xception	93,57	0,92	89,55
ResNet50	94,81	0,93	91,39
InceptionResNetV2	96,17	0,95	93,66

Точность классификации, полученная с использованием метода опорных векторов и случайного леса, составляет 74,89 и 76,08 %, что значительно ниже, чем у СНС. InceptionResNetV2 превосходит все остальные сети, используя интеграцию модулей Inception и ResNet – эффективной архитектуры для классификации сложных сцен дистанционного зондирования.

Список литературы

1. Adam E., Mutanga O., Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review // Wetl. Ecol. Manag. 2010.
2. The history began from alexnet: A comprehensive survey on deep learning approaches / M.Z. Alom [et al.]. 2018.
3. Fisher linear discriminant analysis of coherency matrix for Wetland classification using polarimetry / M. Mahdianpari, B. Salehi, F. Mohammadimanesh [et al.] // Remote Sens. Environ. 2018.
4. Multi-temporal, multi-frequency, and multi-polarization coherence and sar backscatter analysis of wetlands / F. Mohammadimanesh, B. Salehi, M. Mahdianpari [et al.] // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2018. P. 78–93.

A.N. Zhukovskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: zhukovskaya.angelina@yandex.ru

USING DEEP CONVOLUTIONAL NETWORKS FOR COMPLEX LAND COVER MAPPING USING MULTISPECTRAL REMOTE SENSING IMAGERY

The work is a study of modern deep learning tools, popular, such as: DenseNet121, InceptionV3, VGG16, VGG19, Xception, ResNet50 and InceptionResNetV2. The results of solving the classification problem, obtained thanks to convolutional networks, are compared with the results obtained by the classical methods of machine learning: random forest and the support vector method.

Keywords: Convolutional Neural Network, deep learning, multispectral images, machine learning, fine-tuning, land cover classification.

**В.В. Заворуев, О.Э. Якубайлик,
А.А. Кадочников, А.В. Токарев**
ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: valzav@icm.krasn.ru; oleg@icm.krasn.ru;
scorant@icm.krasn.ru; tav@icm.krasn.ru

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОЗДУХА КРАСНОЯРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА СО РАН

Рассмотрена проблема мониторинга приземного слоя атмосферы миллионного сибирского города Красноярска с целью изучения закономерностей формирования пространственно-временного поля концентраций взвешенных частиц в воздушной среде. Показано, что такое исследование можно выполнить только с помощью системы научного мониторинга атмосферного воздуха. Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН – это комплекс специального оборудования и программного обеспечения, предназначенный для сбора и анализа объективных данных о состоянии атмосферного воздуха в Красноярске. Основной задачей создания и эксплуатации системы мониторинга является формирование информационно-аналитической основы для научных исследований и разработок, направленных на решение задач улучшения экологической обстановки в городе. В статье представлены основные результаты почти двухлетней эксплуатации системы.

Ключевые слова: система мониторинга, Красноярск, взвешенные частицы.

Введение. Государственная система мониторинга атмосферного воздуха регламентируется множеством нормативно-правовых документов. В силу этого обстоятельства внедрение в России передовых и общепризнанных во многих странах технологий и средств наблюдения за состоянием воздушной среды практически не осуществляется. Например, Росгидромет до сих пор проводит измерение взвешенных веществ, в то время как многолетний мировой опыт показывает, что необходимо контролировать взвешенные частицы. Показано, что именно взвешенные частицы весьма негативно влияют на здоровье людей [1].

На уровне субъекта РФ создана региональная система мониторинга окружающей среды, оператором которой является подведомственное учреждение Минэкологии края. В составе этой системы в Красноярске и пригороде функционирует девять автоматизированных постов наблюдения (АПН), на которых осуществляется измерение взвешенных частиц. Однако полученная информация не может быть интерпретирована в доступном и понятном для населения виде из-за бюрократических причин, прописанных в нормативно-правовых актах Росгидромета.

Особое беспокойство у жителей Красноярска вызывают смоговые явления, которые народ и СМИ называют «черным небом». Интенсивность смога определяется концентрацией взвешенных частиц. В связи с этим возникает необходимость изучения закономерностей формирования пространственно-временного поля концентраций взвешенных частиц в приземном слое атмосферы г. Красноярска. Для такого исследования воздушной среды над территорией миллионного города девяти АПН, оборудованных пылемерами, явно недостаточно. Эту проблему можно решить с помощью установки относительно дешевых станций мо-

мониторинга воздуха, которые измеряют концентрацию РМ и некоторые метеорологические параметры [2].

Перечисленные выше обстоятельства обусловили необходимость разработки системы научного мониторинга воздушной среды.

Система мониторинга воздуха. Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН (далее – Система) – это комплекс специального оборудования и программного обеспечения, предназначенный для сбора и анализа объективных данных о состоянии атмосферного воздуха в г. Красноярске, в составе которого, во первых, распределенные по городу сертифицированные и откалиброванные автоматические станции контроля загрязнения атмосферного воздуха (станции мониторинга), регистрирующие характеристики атмосферы и передающие эту информацию в централизованную базу данных через сотовую сеть, во вторых, специальные программные средства – встроенное программное обеспечение станций мониторинга и веб-интерфейс для их администрирования, подсистема хранения регистрируемых данных и программные интерфейсы для их загрузки через веб-сервисы, средства для оперативной обработки и визуализации данных [3].

Основной задачей создания и эксплуатации Системы является формирование информационно-аналитической основы для научных исследований и разработок, направленных на решение задач улучшения экологической обстановки в Красноярске.

Измеряемые показатели. В Системе представлено два блока информации: метеорологические характеристики и данные по загрязнению воздуха.

Метеорологические характеристики – это температура (в градусах Цельсия), давление (мм ртутного столба), относительная влажность воздуха (проценты).

Данные по загрязнению воздуха – это концентрации в атмосферном воздухе взвешенных твердых частиц (англ. *PM* – *particulate matter*), с диаметром менее 10 мкм (PM_{10}) и менее 2,5 мкм ($PM_{2.5}$).

Индекс качества воздуха. На основе измерений концентраций взвешенных частиц в Системе рассчитывается индекс качества воздуха *Instant AQI*.

Индекс качества воздуха *AQI* (англ. *Air Quality Index*) – это широко используемый во всем мире инструмент предоставления информации о загрязнении атмосферного воздуха в простой и наглядной форме. В Системе в настоящее время он вычисляется на основе концентраций взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$, которые пересчитываются (нормируются) кусочно-линейной интерполяцией к единой шкале уровней загрязнения (от 0 до 500 единиц). Для каждого класса этой шкалы также вводится цветовое обозначение. Основная идея *AQI* – представлять данные о загрязнении воздуха в уровнях воздействия на здоровье человека.

Наряду с базовым показателем – индексом качества воздуха *AQI* – на практике широко применяются его модификации: *NowCast AQI*, *Asian AQI*, *Instant AQI (InstantCast AQI)* и др. Они используют скорректированные формулы расчета, в которых усреднение концентраций взвешенных веществ выполняется не за 24 часа, как в случае *AQI*, а за меньший период – 12 часов (*NowCast AQI*) или 1 час (*Instant AQI*). Результат – более объективная оперативная информация о качестве воздуха; именно поэтому подобные модификации рекомендованы для использования в системах оповещения населения. В Системе представлен индекс *Instant AQI* (мгновенный, оперативный индекс *AQI*).

Шкала значений индекса *AQI* с ее цветовыми обозначениями показывает каким образом загрязнение атмосферы влияет на здоровье человека; на ее основе сформулированы рекомендации населению по пребыванию на открытом воздухе.

Использованные ресурсы и данные. В основе Системы – многолетний опыт научных исследований и разработок в области решения задач экологического мониторинга и оценки состояния окружающей природной среды коллектива авторов из Института вычислительного моделирования СО РАН (ИВМ СО РАН) [4].

Программно-технологическая платформа разработки – Геопортал ИВМ СО РАН, в том числе его подсистема «Данные оперативного мониторинга».

В качестве базового оборудования системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН используются 23 сертифицированные станции мониторинга воздуха *CityAir*, разработанные группой компаний из новосибирского технопарка и инновационного центра Сколково.

Для оценки данных, поступающих со станций мониторинга воздуха *CityAir*, используется информация четырех АПН за загрязнением атмосферного воздуха «Краевой ведомственной информационно-аналитической системы данных о состоянии окружающей среды Красноярского края», оператором которой является Краевое государственное бюджетное учреждение «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края». Эта работа выполняется в рамках интенсивного информационно-технического взаимодействия и сотрудничества, при поддержке Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края.

Опыт эксплуатации системы мониторинга и основные результаты. Система стабильно функционирует с октября 2018 г. К достоинствам Системы необходимо отнести то, что она устойчиво работает при температурах минус 35–40 °С. При таких условиях на краевых АПН измерения не проводится по техническим причинам. Таким образом, с помощью Системы впервые была определена концентрация $PM_{2.5}$ в атмосфере г. Красноярска в период сильных морозов [5].

Кроме того, на основа данных, полученных с помощью Системы, проводятся исследования закономерностей загрязнения в период антициклонов и влияния дыма лесных пожаров, изучаются поля концентраций $PM_{2.5}$ в зависимости от рельефа территории города и близости незамерзающей реки Енисей. Результаты исследования опубликованы в отечественной и зарубежной печати.

Список литературы

1. Health burden attributable to ambient $PM_{2.5}$ in China / C. Song, J. He, L. Wu [et al.] // *Environ. Pollut.* 2017. № 223, P. 575–586.
2. Observation of $PM_{2.5}$ using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring / Changqing Lin [et al.] // *Atmospheric Environment.* 2020. Vol. 227, 117410.
3. Prototype of city environmental monitoring system based on geoportals technologies / A.A. Kadochnikov, A.V. Tokarev, V.V. Zavoruev, O.E. Yakubailik // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019. Vol. 537 (6). 062052.
4. Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V. WEB geographic information system and the hardware and software ensuring rapid assessment of air pollution // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2018. № 54 (3), P. 243–249.
5. Spatial analysis of air pollution in Krasnoyarsk / O.E. Yakubailik, V.V. Zavoruev, M.I. Malimonov, A.A. Pushkarev // *CEUR Workshop Proceedings.* 2019. Vol. 2534, P. 491–496.

V.V. Zavoruev, O.E. Yakubailik, A.A. Kadochnikov, A.V Tokarev

FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: valzav@icm.krasn.ru; oleg@icm.krasn.ru;
scorant@icm.krasn.ru; tav@icm.krasn.ru

AIR MONITORING SYSTEM OF THE KRASNOYARSK SCIENTIFIC CENTER SB RAS

The paper deals with the problem of monitoring the surface layer of the atmosphere of the Siberian city of Krasnoyarsk with a population of one million people in order to study the regularities of the formation of a space-time field of particulate matter concentrations in the air. It is shown that such research can be performed only with the help of a system of scientific monitoring of atmospheric air. The Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS air monitoring system is a set of special equipment and software designed to collect and analyze objective data on the state of atmospheric air in Krasnoyarsk. The main task of creating and operating the monitoring system is to form an information and analytical basis for research and development aimed at solving the problems of improving the environmental situation in Krasnoyarsk. The article presents the results of almost two years of experience in the operation of the monitoring system and the main results.

Keywords: monitoring system, Krasnoyarsk, suspended particles.

УДК 004.932.2

С.А. Зотов¹, Е.В. Дмитриев^{1,2}, Т.В. Кондранин¹

¹Московский физико-технический институт
(Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

²Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия
e-mail: zotov.sa@mipt.ru; yegor@mail.ru; kondr@kondr.rector.mipt.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВОСТОЕВ ПО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ РАЗЛИЧНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Космические изображения среднего и высокого пространственного разрешения являются одним из основных источников регулярно обновляемых данных об изменении параметров и состоянии лесных территорий. При тематической обработке такого рода дистанционной информации используются различные методы автоматизированной классификации и интеллектуального анализа. В данной работе проводится сравнительный анализ эффективности ряда статистических, метрических и ансамблевых методов обучаемой классификации, используемых при обработке изображений *Landsat-8*, *Sentinel-2* и *WorldView-2*, имеющих различное пространственное разрешение. Для получения точностных характеристик используются наземные данные лесотаксации. Показаны преимущества ансамблевых методов распознавания и совместной обработки мультиспектральных и панхроматических изображений высокого пространственного разрешения.

Ключевые слова: распознавание образов, тематическая обработка, совместная обработка, мультиспектральные изображения, оценка параметров лесных территорий.

Введение. Леса являются стратегическим возобновляемым ресурсом Российской Федерации. По состоянию на 2017 г., их общая площадь составляет около 800 млн га, т.е. 46,4 % от всей территории страны [1]. Процесс устойчивого развития данной отрасли подразумевает постоянное наблюдение за состоянием лесных территорий, актуализацию таксационных и биопродукционных параметров, выявление лесных пожаров, нелегальных вырубок, пораженных болезнями участков. Также важными задачами являются оценка породного состава, запаса древесины и возраста древостоев. Наземные наблюдения и измерения являются наиболее точным способом получения информации, однако оперативный наземный мониторинг совокупной площади лесов фактически невозможен. Кроме того, многие лесные участки находятся вне досягаемости для специалистов, производящих таксацию леса.

Одним из наиболее важных источников оперативной информации являются мультиспектральные спутниковые изображения среднего, высокого и сверхвысокого разрешения. Данные по спектральному составу подстилающей поверхности Земли, передаваемые с таких аппаратов, как «Канопус-В», «Ресурс-П», *Landsat-8*, *Sentinel-2* позволяют решать задачи обнаружения зон лесных пожаров в труднодоступных территориях, производить оценки поражения лесных и осуществлять контроль лесозаготовительной деятельности. В тоже время мультиспектральные и панхроматические изображения сверхвысокого разрешения позволяют получить информацию о фактурных особенностях лесного полога и даже осуществлять попытки сегментации крон отдельных деревьев. Такие снимки поверхности делают, например, спутники *WorldView-1, 2, 3* и *Pleiades*, также их можно получить с борта самолетов или беспилотных аппаратов.

Совместное использование мультиспектральных и панхроматических изображений позволяет более эффективно оценивать ряд параметров растительного покрова, в частности, определять породный состав смешанных древостоев. В данной работе предлагается методика совместной тематической обработки мультиспектральных снимков среднего разрешения и панхроматических снимков сверхвысокого разрешения (менее 2 м). Приводятся результаты сравнительного анализа эффективности статистических, метрических и ансамблевых методов обучаемой классификации тематической обработки изображений территории Савватьевского лесничества (Тверская область). Также сравниваются результаты традиционной спектральной классификации изображений среднего разрешения и спектрально-текстурной классификации при совместной обработке изображений среднего и сверхвысокого пространственного разрешения.

Методика тематической обработки. Попиксельная классификация древостоев на мультиспектральном снимке проводится с помощью машинного обучения с учителем. Мультиспектральный снимок содержит ряд чисел на каждый пиксель – яркости спектральных каналов (далее спектральные признаки) или спектр. С помощью машинного обучения с учителем, имея обучающую выборку, по спектру возможно определить тип подстилающей поверхности в данном пикселе. Подстилающие поверхности имеют не только спектральные, но также текстурные характеристики. Разрешение мульти-, гиперспектрометров, как правило, не позволяет учитывать текстурные особенности при классификации подстилающих поверхностей. Поэтому к ряду спектральных признаков прибавляются текстурные признаки, вычисленные по соответствующим геопривязанным панхроматическим снимкам высокого разрешения.

Далее под текстурными признаками будут подразумеваться текстурные признаки Харалика [2]. Текстурные признаки Харалика вычисляются по матрице сов-

местной встречаемости уровней серого (англ. *Gray-Level Co-occurrence Matrix, GLCM*) [2; 3]. При обработке изображения матрица GLCM вычисляется для каждого положения скользящего окна, вырезающего участок изображения, и содержит относительные частоты наличия в окне соседних элементов, расположенных на расстоянии d (в пикселях) друг от друга, под углом α [2; 4]. Выбор ширины окна (в пикселях) существенно влияет на значения признаков. Исследования показывают, что для обработки аэрокосмических снимков лесных массивов наиболее эффективна ширина окна от 20 до 80 пикселей [4; 5].

Всего выделяется 19 текстурных признаков Харалика, но также каждый признак может вычисляться с разным углом α (как правило α может быть равен 0° , 45° , 90° и 135°) и расстоянием d [4; 6; 7]. При проведении классификации на основе спектральных и текстурных признаков методом машинного обучения с учителем каждому пикселю спектрального изображения сопоставляется окно панхроматического изображения выбранной ширины так, чтобы их географические центры совпадали. Для окна рассчитываются заранее отобранные как наиболее подходящие для решения конкретной задачи текстурные признаки. Полученные таким образом текстурные признаки добавляются к списку спектральных признаков для соответствующего пикселя спектрального изображения. И уже по всем спектральным и текстурным признакам проводится классификация.

Численные эксперименты проводились по трем алгоритмам машинного обучения k -ближайших соседей (англ. *k-nearest neighbors algorithm, kNN*), квадратичный дискриминантный анализ [8] и *Random forest* (с англ. – «случайный лес»).

Для алгоритма k ближайших соседей выбирается k – количество ближайших по выбранным признакам объектов из обучающей выборки, по которым классифицируется объект [9]. Алгоритм классификации *Random forest* основан на построении ансамбля решающих деревьев. Он имеет два основных параметра, требующих настройки: количество решающих деревьев в ансамбле и максимальная глубина решающих деревьев в ансамбле [10]. В ходе проведения численных экспериментов эти параметры подбираются таким образом, чтобы получить наилучший результат.

Численные эксперименты. Для отработки предлагаемых методов и проведения сравнительного анализа проведены численные расчеты по обработке космических изображений выбранных тестовых территорий всеми упомянутыми выше методами классификации. В том числе сравнили результаты классификации только по мультиспектральным данным и по мультиспектральным данным совместно с текстурными. Для постановки численного эксперимента была выбрана территория Савватьевского лесничества в Тверской области, так как для лесов на этой территории имеются данные лесотаксации. Согласно имеющимся данным на выбранной территории преобладают две породы: береза и сосна. Присутствие остальных пород незначительно. Данные лесотаксации содержат информацию о 579 выделах леса. При этом в 130 из них доминантной породой является береза, а в 427 – сосна. В остальных присутствует березы и сосны одинаковое или доминирует другая порода.

В качестве мультиспектральных снимков используется: мультиспектральное изображение со спутника *Landsat-8* от 29 июня 2016 г., мультиспектральное изображение со спутника *Sentinel-2* от 24 июля 2016 г. с разрешением 10 м, мультиспектральное изображение со спутника *WorldView-2* от 25 июня 2016 г. с разрешением 2 м. А в качестве изображения высокого разрешения – снимок панхроматической камеры спутника *WorldView-2* от 25 июня 2016 г. с разрешением 0,5 м.

В качестве спектральных признаков использовались синий, зеленый, красный, ближний инфракрасный, два коротковолновых инфракрасных канала мультиспек-

трометров *Landsat-8* и *Sentinel-2* и синий, зеленый, красный, два ближних инфракрасных канала мультиспектрометра *WorldView-2*. По результату отбора наиболее информативных текстурных признаков по корреляции Спирмана были выбраны следующие признаки: *Autocorrelation*, *Cluster shade*, *Contrast*, *Correlation*. При этом *Autocorrelation* вычислены только при $\alpha = 0^\circ$, а остальные признаки отдельно при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 135^\circ$. Все признаки вычисляются при $d = 1$. Кроме того, посредством перебора было установлено, наилучший результат (в случаях классификации с применением текстурных признаков) получается при выборе ширины скользящего окна равным 80.

По результатам проведенной классификации по породам и нескольким другим классам поверхности, характерным для данной местности, для каждого выдела, в которых доминирует береза или сосна, определялся доминирующий класс. Точности определения доминантных признаков для каждого тестируемого метода с каждым набором данных представлены в таблице, в столбце «Точность по доминантам». Также в столбце «Точность по кросс-валидации» представлена усредненная точность 10-блочной кросс-валидации, проведенной на обучающей выборке.

Таблица

Краткие результаты классификации каждым методом на каждом наборе данных

Метод классификации	Происхождение спектральных данных	Используемые признаки	Точность по доминантам	Точность по кросс-валидации
<i>Random forest</i>	<i>Landsat-8</i>	Спектральные	0,854	0,864
		Спектральные и текстурные	0,873	0,940
	<i>Sentinel-2</i>	Спектральные	0,883	0,831
		Спектральные и текстурные	0,888	0,956
	<i>Worldview-2</i>	Спектральные	0,827	0,560
		Спектральные и текстурные	0,839	0,952
<i>k-nearest neighbors</i>	<i>Landsat-8</i>	Спектральные	0,860	0,818
		Спектральные и текстурные	0,882	0,925
	<i>Sentinel-2</i>	Спектральные	0,887	0,799
		Спектральные и текстурные	0,887	0,934
	<i>Worldview-2</i>	Спектральные	0,869	0,614
		Спектральные и текстурные	0,853	0,954
<i>Quadratic discriminant analysis</i>	<i>Landsat-8</i>	Спектральные	0,845	0,811
		Спектральные и текстурные	0,852	0,932
	<i>Sentinel-2</i>	Спектральные	0,914	0,826
		Спектральные и текстурные	0,878	0,924
	<i>Worldview-2</i>	Спектральные	0,881	0,578
		Спектральные и текстурные	0,785	0,939

На рисунке представлена часть Саватеевского лесничества. Ее подстилающая поверхность была классифицирована методом *kNN* со спектральными данными с мультиспектрометра *Sentinel-2*.

Вывод. Из таблицы следует, что при переходе от спектральной к спектрально-текстурной классификации, точность кросс-валидации на обучающей выборке существенно возрастает для всех рассматриваемых методов. Для *kNN* и *Random forest* с применением данных *Landsat-8* точность по доминантным породам увеличивается на 2 % и практически не меняется при обучении на спектральных данных с *Sentinel-2* и *WorldView-2*. В то же время точность по доминантным породам при применении квадратичного дискриминантного анализа значительно не меняется

или даже ухудшается. Данные, приведенные на рисунке, показывают, что при использовании только спектральных признаков классы древостоев гораздо чаще интерпретируются как «луговая растительность» и наоборот, чем при применении текстурных признаков.

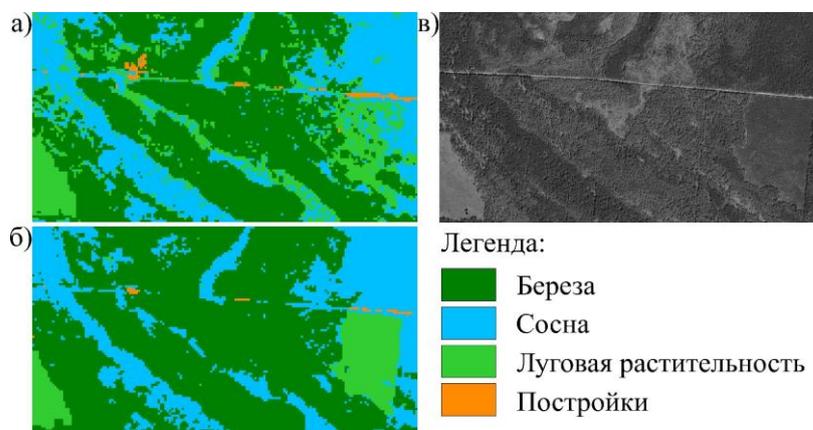


Рисунок. Классифицированная подстилающая поверхность участка Савватьевского лесничества и ее изображение в высоком разрешении: *a* – классификация методом *kNN* по спектральным данным с *Sentinel-2*; *b* – классификация методом *kNN* по спектральным данным с *Sentinel-2* и текстурным данным с панхроматической камеры *WorldView-2*; *v* – снимок данной области в высоком разрешении с панхроматической камеры *WorldView-2*

Таким образом, можно сделать вывод о том, что по крайней мере при использовании методов *kNN* и *Random forest* использование текстурных признаков Харалика в качестве дополнения к мультиспектральным данным способствует повышению точности классификации породного состава и значительно улучшает качество выделения контуров лесных массивов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00215.

Список литературы

1. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». 2017. С. 887.
2. Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture // *Proceedings of the IEEE*. 1979. Vol. 67, № 5. P. 786–804.
3. Фраленко В.П. Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли // *Программные системы: теория и предложения*. 2014. № 4 (22). С. 19–39.
4. Колодникова Н.В. Обзор текстурных признаков для задач распознавания образов // *Доклады ТУСУР*. 2004. № 1 (9). С. 113–124.
5. Потапов А.А. Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малоконтрастных целей // *Радиотехника и электроника*. 2003. № 9. С. 1101–1119.
6. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural features for image classification // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1973. № 6. P. 610–621.
7. Haralick texture features from apparent diffusion coefficient (ADC) MRI images depend on imaging and pre-processing parameters / P. Brynolfsson, D. Nilsson, T. Torheim [et al.] // *Sci Rep*. 2017. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04151-4>.
8. Santosh S., Maya R.G., Be'la A.F. Bayesian Quadratic Discriminant Analysis // *J. of Machine Learning Research*. 2007. № 8. P. 1277–1305.

9. Cover T.M., Hart P.E. Nearest neighbor pattern classification // IEEE Transactions on Information Theory. 1967. № 1. P. 21–27.
10. Breiman L. Random forests // Machine Learning. 2001. № 45. P. 5–32.

S.A. Zotov¹, Y.V. Dmitriev^{1,2}, T.V. Kondranin¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology, MIPT, Dolgoprudny

²Institute of Numerical Mathematics, RAS, Moscow

e-mail: zotov.sa@mipt.ru; yegor@mail.ru; kondr@kondr.ector.mipt.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF TREES FROM MULTISPECTRAL SPACE IMAGES OF VARIOUS SPATIAL RESOLUTION

Space images of medium and high spatial resolution are one of the main sources of regularly updated data on changes in structural parameters and forest areas condition. In the thematic processing of this kind of remote information, various methods of automated classification and intellectual analysis are used. This paper provides a comparative analysis of the effectiveness of a number of statistical, metric, and ensemble learning classification methods used in processing Landsat-8, Sentinel-2 and WorldView 2 images with different spatial resolution. Ground-based forest inventory data are used to obtain the accuracy characteristics. The article also presents the advantages of ensemble recognition methods and joint processing of multispectral and panchromatic images of high spatial resolution.

Keywords: pattern recognition, thematic processing, joint processing, multispectral images, assessment of the parameters of forest areas.

УДК 004.4:528.8

А.А. Кадочников¹, А.В. Токарев¹, О.Э. Якубайлик²

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

²ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: scorant@icm.krasn.ru; tav@icm.krasn.ru; oleg@icm.krasn.ru

СИСТЕМА КАТАЛОГИЗАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, ПОСТУПАЮЩИХ С РОССИЙСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Разработаны локальный архив и система каталогизации спутниковых данных с российских космических аппаратов, поступающих в ФИЦ КНЦ СО РАН через сервисы геопортала Роскосмоса. Создана автоматизированная система предварительной обработки данных ДЗЗ, которая существенно упрощает доступ к информации, реализует сервисы поиска и веб-визуализации зарегистрированных в каталоге снимков. Практический опыт эксплуатации системы позволил выявить ряд недостатков существующей системы распространения данных Роскосмоса. Представленные данные об исполнении Роскосмосом заказа на спутниковую съемку в 2019 г. показывают, что возможности российской системы ДЗЗ

сильно ограничены, значительная часть запланированных научно-исследовательских работ не реализована из-за отсутствия заказанных спутниковых данных.

Ключевые слова: веб-картография, геоинформационная система, геопространственные данные, данные дистанционного зондирования.

Введение. Основным источником данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с российских космических аппаратов является геопортал Роскосмоса, эксплуатацию которого осуществляет Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы». Это веб-ресурс, сочетающий в себе средства поиска и просмотра, заказа новых и архивных данных ДЗЗ. Получение данных возможно через веб-интерфейс геопортала или по протоколу ftp.

В использовании данных с российских космических аппаратов заинтересованы несколько институтов и подразделений ФИЦ КНЦ СО РАН. Большие объемы данных ДЗЗ, которые необходимо получать через геопортал Роскосмоса, а также анализ его возможностей, который выявил ряд принципиальных ограничений, привели к необходимости создания локального архива спутниковой информации, доступ к которому предоставляется всем заинтересованным подразделениям организации. Была разработана технология автоматизированной обработки данных, поступающих с ftp-сервера Роскосмоса в виде специализированной службы, работающей на сервере. Предложенный подход позволил попутно решить ряд обнаруженных технических проблем, связанных с получаемыми данными ДЗЗ.

Предмет исследования. Разработанная система каталогизации спутниковых данных, поступающих с российских КА, в настоящий момент ориентирована на данные спутников «Ресурс-П» и «Канопус-В». Данные централизованно загружаются для нужд подразделений, входящих в ФИЦ КНЦ СО РАН, по общей заявке для всех подразделений. Для удобства конечных пользователей каталога полученные данные обрабатываются и приводятся к единому формату. Сейчас эти данные автоматически загружаются с геопортала Роскосмоса (<https://www.gptl.ru>) и предварительно обрабатываются в полуавтоматическом режиме.

Доступ к снимкам со стороны геопортала Роскосмос организован через ftp-сервер. Данные на сервере геопортала хранятся ограниченное время (обычно не более месяца), поэтому их необходимо периодически загружать в свое хранилище. Каждый снимок содержит shape-файлы с его границами или границами каждого канала в отдельности, xml с метаданными снимка, jpeg с обзорным изображением и один или несколько tiff файлов с растровыми данными с одним или несколькими каналами. XML формат метаданных и формат имени файла для каждого типа космического аппарата свой. XML форматы также отличаются для разных уровней обработки полученных снимков. Данные подготавливаются и выкладываются операторами поставщика вручную, и как показал практический опыт эксплуатации, в связи с этим возникает масса ошибок, разные варианты структуры представления данных.

К недостаткам можно отнести тот факт, что имена файлов содержат время обработки их оператором, хотя удобнее было бы хранить в них время съемки. Имена папок могут содержать русские символы, что вносит ряд проблем при работе с ними в Unix системах при преобразовании кодировки. Запутанная иерархия папок.

Результаты и обсуждение. В 2019 г. был сформирован заказ на снимки с апреля по октябрь 2019 г. включительно с космических аппаратов «Канопус» аппаратуры ПСС (панхроматическая съемочная система) и МСС (многозональная съемочная система) с разрешением 2,7 м и 12 м соответственно [1], а также с аппарата «Ре-

сурс-П» аппаратуры «Сангур-1У» с панхроматической и спектральной съемкой с разрешением 1 и 3 м соответственно. Данные были запрошены с уровнем обработки 1А и 2А с облачностью не более 40 %.

Зоны интереса представлены на рисунке. В районы интереса попадают участки на территории Красноярского края, Республики Саха, Новосибирской, Кемеровской, Иркутской областей, Республики Бурятия и Тыва. Всего – 31 участок общей площадью около 690 тыс. км².

Данные за 2019 г. поступали неравномерно и последние данные за 2019 г. были получены в марте 2020 г. Всего было получено 1103 снимка с аппаратов Канопус и 110 снимков с аппарата «Ресурс-П». В общее количество не попали снимки с поврежденными или отсутствующими файлами растров в количестве семь штук.

Данные с аппарата Ресурс-П в большинстве случаев поступали в течение месяца съемки и следующего за ним месяцем, но снимков было не много, а по некоторым участкам не было совсем. Большая часть данных по аппаратам «Канопус» за 2019 г. была подготовлена зимой 2020 г. Рассчитывать на оперативное получение данных не стоит. К недостаткам (преимущественно для снимков с аппаратов «Канопус») можно отнести небольшой размер некоторых снимков, которые располагаются по углам участков заказа. Размер таких снимков может не превышать 10 % от общей площади участка, и практической цели в них мало. По небольшим участкам за год с аппарата «Ресурс-П» набралось в среднем от одного двух мультиспектральных снимков, и обычно эти снимки не покрывают участок полностью. По большим участкам максимальное количество снимков доходило до шести и территорию они также полностью не покрывают. Динамику в течение года по данным с аппарата «Ресурс-П» наблюдать невозможно. С данными аппарата «Канопус» ситуация немного лучше, но не на всех участках.

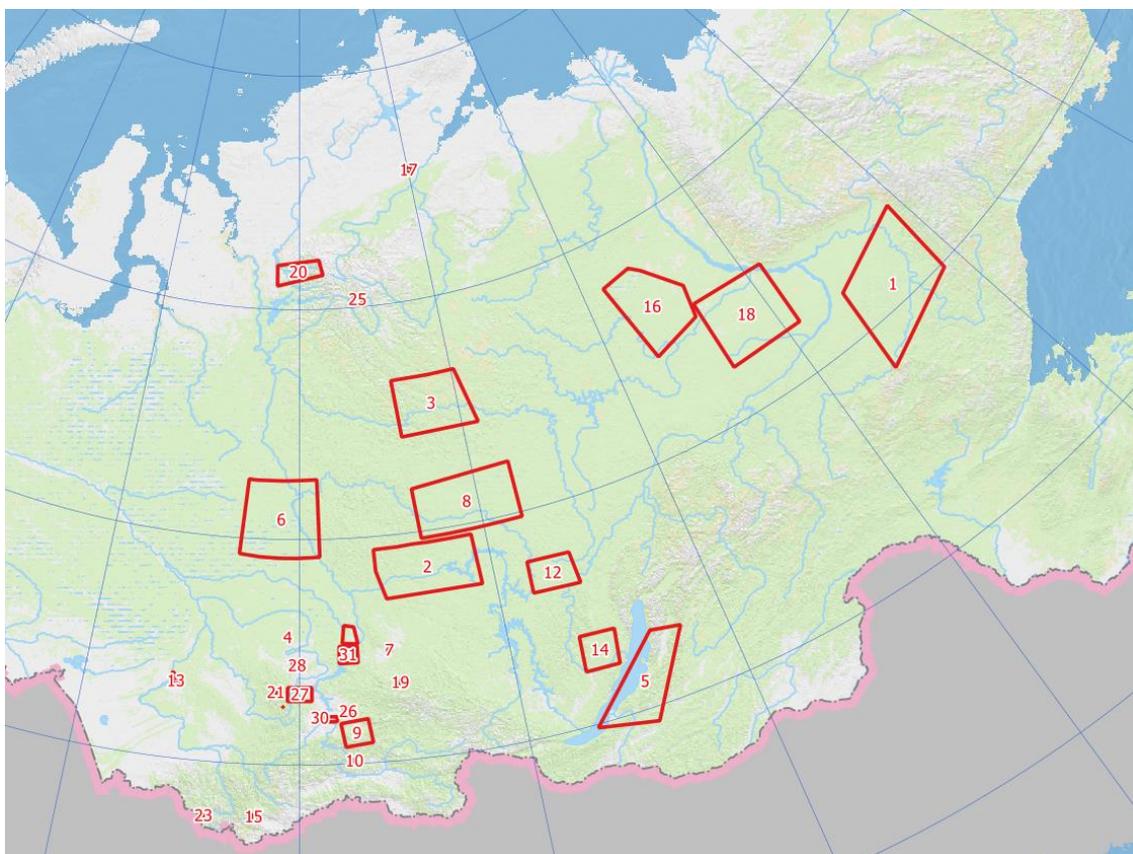


Рисунок. Зоны интереса на территории Сибири и Дальнего Востока

Для обеспечения всех заинтересованных пользователей в рамках ФИЦ КНЦ СО РАН был создан централизованный архив всех полученных снимков с геопортала «Роскосмос». Был разработан комплекс программ для полуавтоматической обработки полученных данных. Дополнительная полуавтоматическая обработка связана приведением каталога снимков к унифицированному формату с решением всех проблем, описанных выше. В результате имена файлов снимков содержат информацию о времени съемки снимка, типе (панхроматическая или мультиспектральная съемка) и идентификаторе аппаратуры спутника. Иерархия каталогов снимков на первом уровне содержит месяц съемки, на втором уровне располагаются сами снимки, где файлы каждого снимка в отдельной папке. Дополнительно, для удобства пользователей предусмотрена иерархия по участкам заказа с символическими ссылками на папки со снимками. Сформированная система обрабатывает данные автоматически, но в ситуациях, когда это невозможно сделать, отправляет сообщение администратору системы для принятия решения и ручного исправления.

Для поиска и навигации по каталогу спутниковых данных организован доступ по ftp внутри сети ФИЦ КНЦ СО РАН и разработано веб-приложение каталога спутниковых снимков с применением серверного языка программирования PHP, СУБД PostgreSQL, SQLite3 и клиентского веб-интерфейса на языке программирования TypeScript с использованием фреймворка Angular 5 [2; 3].

Список литературы

1. Кадочников А.А. Применение геоинформационных технологий для построения системы спутникового мониторинга // Геодезия и картография. 2019. Т. 80, № 1. С. 110–118.
2. Assessing the potential of open-source libraries for managing satellite data products – a case study on disaster management / V.K. Sharma, E. Amminedu [et al.] // Annals of GIS. 2017. № 23 (1). P. 55–65.
3. Yuqi Bai, Liping Di. Providing access to satellite imagery through OGC catalog service interfaces in support of the Global Earth Observation System of Systems // Computers & Geosciences. 2011. № 37 (4). P. 435–443.

А.А. Kadochnikov¹, А.В. Tokarev¹, О.Е. Yakubailik²

¹Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: scorant@icm.krasn.ru; tav@icm.krasn.ru; oleg@icm.krasn.ru

CATALOGING SYSTEM FOR RUSSIAN SATELLITES REMOTE SENSING DATA: MAIN CHARACTERISTICS AND OPERATING EXPERIENCE

A local archive and a system for cataloging satellite data from Russian spacecraft that are received by the FRC KSC SB RAS through the services of the Roscosmos Geoportal have been developed. An automated system for remote sensing data preprocessing has been created, which significantly simplifies access to information, implements search services and web visualization of images registered in the catalog. Practical experience in operating the system has revealed a number of shortcomings of the existing Roscosmos data distribution system. Presented data on the execution of the Roscosmos satellite survey order in 2019 they show that the capabilities of the Russian remote sensing system are very limited, and a significant part of the planned research work has not been implemented due to the lack of ordered satellite data.

Keywords: GIS, geospatial data, remote sensing data, web mapping.

А.В. Картушинский^{1,2}, Н.А. Огородов^{1,2}, С.А. Картушинский¹

¹Сибирский федеральный университет, Институт космических
и информационных технологий, Красноярск, Россия

²Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: kartalvas@rambler.ru; kartushka@mail.ru

ГРАДИЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Обсуждается проблема фиксации пространственных неоднородностей поверхности Земли физической и биологической природы по данным дистанционного зондирования на основе измерений параметров различного пространственного разрешения. Интенсивное развитие методов дистанционного зондирования Земли из космоса в совокупности с применением геоинформационных технологий обработки данных беспилотных аппаратов позволяет оценивать пространственную изменчивость параметров поверхности для получения градиентных характеристик различного свойства. Рассмотрены проблемы совмещения данных, измеренных аппаратурой различного пространственного и временного разрешения, для выявления градиентных полей параметров, отображающих свойства поверхности по динамической активности с использованием информационно-программных средств. Показаны возможности для анализа состояния экосистем различного уровня сложности: территорий сельскохозяйственного назначения, водных озерных экосистем, океанских акваторий по градиентным параметрам.

Ключевые слова: поверхностные неоднородности, градиенты температуры, концентрация хлорофилла, фронтальная зона, численные модели.

Введение. Стандартным пониманием градиента является направление возрастающего (в ряде случаев – резко понижающегося) изменения некоторой величины в направлении от одной точки пространства к другой. Это суть дифференциальной функции изменения по отношению к аргументу, стремящемуся к нулю [1]. Вычисление величины градиента во многом определено выбором численного метода, а точность связана с интерполяцией и экстраполяцией значений в точке, где вычисляется частная производная по времени или пространству.

В нашем случае продолжается обсуждение возможности сравнения динамики градиентных полей растительного, почвенного покрова и водных поверхностей экосистем по спутниковым данным [2], а также данным других аппаратных средств. В работах [3–5] основное внимание уделяется исследованиям почвенной поверхности и состоянию сельскохозяйственных посевов с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В работах [6; 7] описываются исследования влияния на урожайность различных азотных обработок озимой пшеницы с применением гиперспектрального оборудования на борту БПЛА и наземных измерений. Используются методы классификации изображений для выделения растительности и почвы, для анализа температуры растительности с признаками растений [7].

Материалы и методы. В качестве исходных данных в работе используются спутниковые изображения, полученные различными аппаратными средствами с высоким и низким пространственным разрешением за различные периоды времени. Ис-

пользуются данные БПЛА *Matrice 210 RTK*; БПЛА *Matrice 600* с системой гиперспектральной визуализации, содержащей спектральную камеру, компьютер и модуль GPS. В качестве спутниковых данных высокого пространственного разрешения используются снимки *Dove* программы *Planet Scope* трехметрового разрешения [8], полученные по соответствующим запросам и доступу к ресурсу компании *Planet Explorer* [9].

Результаты и обсуждение. Размеры и время существования пространственных неоднородностей спектральных характеристик поверхности суши значительно отличаются от водных систем, в которых процессы непосредственно связаны с воздействием нижнего слоя атмосферы и существующей системой струйных и дрейфовых течений. В качестве примера представлены результаты обработки спутниковых данных с расчетом градиентных характеристик. На рис. 1 приведены температурные градиентные зоны для Южной Атлантики, а на рис. 2 – градиентные поля поверхностной температуры и мутности озера Шира (Хакасия).

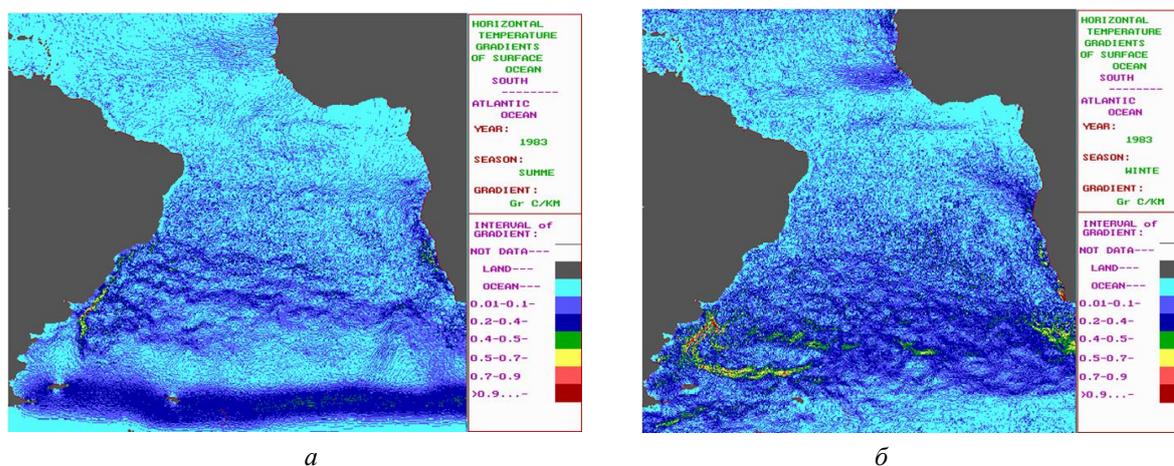


Рис. 1. Изменение градиентов температуры поверхности океана (Субарктическая фронтальная зона, Южная Атлантика): лето (а) и зима (б) 1993 г.



Рис. 2. Поля градиентов температуры (а) и мутности (б) поверхности озера Шира (Хакасия). 31.08.2014

В районах водных систем, где фиксируются наиболее устойчивые градиентные зоны, они определяются системами течений, подъемом вод или характерными формами рельефа дна. В механизме эволюции экологических систем такая специфика структурной организации систем отражается в цикличности динамических процессов и факторов воздействия.

С помощью БПЛА можно определять пространственно-временные масштабы неоднородного распределения температуры и растительности. На рис. 3 показан пример результата измерения спектра с привязкой к географическим координатам исследуемого участка. Растровое изображение позволяет оценить площадные мас-

штабы температурных неоднородностей поверхности почвы с помощью функции классификации ENVI. Это, в свою очередь, дает возможность изучать динамику мелкомасштабной термической структуры сельхозпосевов.

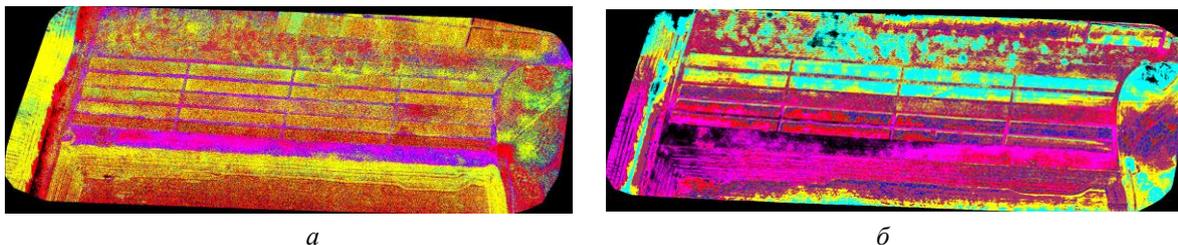


Рис. 3. Пример обработки изображения поверхности тестовой территории опытных сельхоз полей КрасГАУ ортофотоплана; *а* – в видимом диапазоне (красным цветом обозначена кукуруза; зеленым – пшеница на пару; желтым – пшеница по кукурузе; голубым цветом – пар; розовым – чистая почва; бирюзовым – ячмень; черным – неклассифицированные зоны); *б* – температурное поле ортофотоплана. Дата съемки 06.09.2019 на исследуемой территории 670×110 м

Заключение и выводы. Основным результатом работы является методика выявления градиентных зон с различными пространственно-временными масштабами по спутниковым данным различного пространственного разрешения для моделирования динамики поверхностных неоднородностей водных систем и экосистем суши. Реализация современных методов обработки и анализа данных дистанционного зондирования с помощью беспилотных аппаратов совместно со спутниковыми данными позволит расширить круг решаемых проблем для моделирования и прогнозирования продуктивности растительного покрова, включая поля сельскохозяйственного назначения.

Список литературы

1. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия методы и приложения: учеб. пособие. М.: Наука, 1986. 759 с.
2. Картушинский А.В., Кукоба Н.А. Градиентные поля поверхности Земли по спутниковым данным // Вестн. СибГАУ. 2015. № 3 (16). С. 587–596.
3. Гопп Н.В., Савенков О.А., Смирнов А.В. Цифровое картографирование урожайности яровой пшеницы на основе вегетационных индексов и оценка ее изменений в зависимости от свойств антропогенно-преобразованных почв // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 125–139.
4. Система спутникового мониторинга территории Красноярского края на основе использования малых космических аппаратов / А.П. Шевырнов, Т.И. Письман, Н.А. Кононова [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.
5. Оценка качества всходов сельскохозяйственных культур по RGB-изображениям с БПЛА / И.А. Пестунов, П.В. Мельников, С.А. Рылов [и др.] // Материалы конф. «Агроинфо-2018». 2018. С. 514–519.
6. Kanning M., Kugling I., Trautz D. High-resolution UAV-based hyperspectral imagery for LAI and chlorophyll estimations from wheat for yield prediction // Remote Sensing. 2018. Vol. 10, № 12. P. 2000.
7. UAV-based high resolution thermal imaging for vegetation monitoring, and plant phenotyping Using ICI 8640 P, FLIR Vue Pro R 640, and thermoMap Cameras / V. Sagan, M. Maimaitijian, P. Sidike [et al.] // Remote sensing. 2019. Vol. 11, № 3. P. 330.
8. Satellite Imaging Corporation. URL: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/dove-3m/>.
9. Planet Explorer. URL: <https://www.planet.com/explorer/>.

A.V. Kartushinsky^{1,2}, N.A. Ogorodov^{1,2}, S.A. Kartushinsky¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: kartalvas@rambler.ru; kartushka@mail.ru

GRADIENT CHARACTERISTICS OF ECOLOGICAL SYSTEMS AND DYNAMICS OF SPATIAL INHOMOGENEITIES FROM SATELLITE DATA

The paper discusses the problem of fixing spatial inhomogeneities of the Earth's surface, based on remote sensing data from satellites and unmanned aerial vehicles. The intensive development of remote sensing methods makes it possible to evaluate the spatial variability of surface parameters to obtain gradient characteristics of various properties. The problem of gradient field calculation based on data measured by the equipment of different spatial and temporal resolutions is discussed. The paper also shows the capabilities for ecosystems analysis of different levels of complexity: agricultural territories, lake ecosystems, ocean areas by gradient parameters.

Keywords: surface inhomogeneities, temperature gradients, chlorophyll concentrations, frontal zones, numerical models.

УДК 528.88:235.41

Л.В. Катковский¹, Б.И. Беляев¹, Ю.С. Давидович²

¹Доктор физико-математических наук, ²Студент

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко,

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

e-mail: katkovskyl@bsu.by; remsens@mail.ru; geo.davidoviYU@bsu.by

ДИСТАНЦИОННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ УСЫХАНИЙ ХВОЙНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Представлены результаты определения усыхания хвойных насаждений тестовой лесной территории на юге Беларуси по мультиспектральным изображениям различного пространственного разрешения с помощью классификации методом максимального правдоподобия. Предметом исследования являются территории усыхающих хвойных лесов. Цель работы состоит в улучшении идентификации усыхания хвойных насаждений на мультиспектральных изображениях. Для мультиспектральных изображений съемочных систем *Landsat-8 OLI* и белорусского космического аппарата в каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов проведена процедура паншарпенинга. Предложены два варианта преобразования исходных мультиспектральных изображений для улучшения детальности и точности классификации. Произведена оценка точности классификации как визуально, так и с помощью статистических показателей, позволяющая сделать общий вывод о эффективности примененных преобразований.

Ключевые слова: усыхания хвойных насаждений, классификация максимального правдоподобия, преобразования мультиспектральных изображений.

Выявление на ранних стадиях повреждений хвойных насаждений различными видами вредителей (короед в центральной и восточной части Европы и шелкопряд

в Сибирских лесах) является актуальной задачей современного лесного хозяйства. Предпочтительным является определение усыханий методами аэрокосмического зондирования, обеспечивающими оперативность и широту покрытия. Этому направлению посвящено ряд работ отечественных [1–3] и зарубежных [4] специалистов.

Для определения усыханий хвойных лесов в работе использовались следующие материалы дистанционных съемок: аэрофотоснимок (пространственное разрешение 1 м), мультиспектральное изображение (МСИ) белорусского космического аппарата (БКА) (10,5 м), МСИ *Landsat-8 OLI* (30 м), МСИ *Sentinel-2* (10 м). Для улучшения визуализации и точности выделения объекта исследований предварительно был произведен паншарпенинг МСИ БКА и *Landsat-8 OLI* и далее выполняются преобразования изображений в спектральном пространстве для усиления их отличительных признаков.

Если рассматривать МСИ в N -мерном пространстве с осями, представляющими каналы МСИ, то оно представляется в нем N -мерным «облаком» точек. Чем больше отличие яркостей в каналах, тем дальше удаляются точки «облака» от биссектрисы N -гранного угла, образованного координатными плоскостями. Преобразование множества точек, приводящее к удалению их от биссектрисы, должно приводить, по нашему мнению, к усилению различий в каналах изображения, уменьшению их коррелированности и улучшению разделимости. Новое N -канальное изображение рассчитывается следующим образом:

$$\bar{I}_{k,ij} = T_{ij} I_{k,ij} + (1/N)(1 - T_{ij}) \left(\sum_{n=1}^N I_{n,ij} \right). \quad (1)$$

Здесь $I_{n,ij}$, $\bar{I}_{k,ij}$ – исходное и преобразованное изображения; k – номер канала; (i, j) – номер пикселя (строки и столбца). Параметр-изображение T задает степень усиления исходных межканальных различий мультиспектрального изображения. Предложено два варианта для T . В первом варианте

$$T_{ij}(d_{ij}) = (T_{\max} d_{\max}) / (d_{\max} + d_{ij} ((T_{\max} / T_{\min}) - 1)), \quad (2)$$

где

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n>m=1}^N (I_{m,ij} - I_{n,ij})^2}. \quad (3)$$

Здесь d_{ij} – расстояние текущей точки (i, j) N -мерного пространства от биссектрисы N -гранного угла; d_{\max} – максимальное значение d_{ij} ; T_{\max} , T_{\min} – задаваемые параметры преобразования, соответственно, максимальное и минимальное значения T_{ij} . Легко показать, что отклонение точки нового МСИ от биссектрисы равно $\bar{d}_{ij} = T_{ij} d_{ij}$. Из формулы (2) следует, что $T_{ij}(d_{\max}) = T_{\min}$ и $T_{ij}(0) = T_{\max}$ (если есть точки, лежащие на биссектрисе), т.е. точки, лежащие ближе к биссектрисе, удаляются от нее максимально, а лежащие дальше – минимально. При этом облако точек группируется внутри некоторой цилиндрической области вокруг биссектрисы [5].

В качестве второго варианта предлагается использовать пропорциональную зависимость $T_{ij}(d_{ij})$ следующего вида:

$$T_{ij}(d_{ij}) = T_{\min} \left[1 + \frac{d_{ij}}{d_{\max}} \left(\frac{T_{\max}}{T_{\min}} - 1 \right) \right]. \quad (4)$$

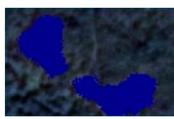
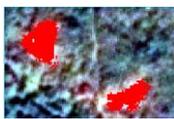
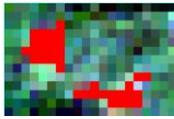
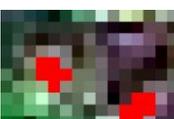
При этом $T_{ij}(d_{\max}) = T_{\max}$ и $T_{ij}(0) = T_{\min}$, т.е. более далекие от биссектрисы точки удаляются сильнее, чем более близкие. Применительно к МСИ относительно небольшие различия в каналах (точки, лежащие вблизи биссектрисы) нет смысла зна-

чительно усиливать, поскольку эти различия будут, как правило, обусловлены погрешностями измерений (шумом). В то же время заметные различия, еще более усиленные, должны давать лучшую дискриминацию объектов, основанную именно на значениях яркостей в отдельных каналах. Значения параметров преобразований (2), (4), T_{\max} и T_{\min} подбираются эмпирически путем пробных расчетов. Следует заметить, что на значения T_{ij} не накладывается никаких ограничений, в частности T_{ij} может быть больше единицы. Преобразование МСИ и классификация производились в программе ENVI.

Наилучшие результаты при использовании первого варианта преобразования были получены при значении параметров T_{\max} и T_{\min} , равном 20 и 10 соответственно. При выделении областей интереса по преобразованным МСИ было выявлено: у БКА – 5 классов, у *Sentinel-2* – 5 классов, у *Landsat-8 OLI* – 4 класса. По исходным и преобразованным МСИ была произведена классификация методом максимального правдоподобия. Результаты классификации по аэрофотоснимку использовались в качестве эталона. Для 2-го варианта преобразования наилучшие результаты были получены при значении параметров T_{\max} и T_{\min} , равном 50 и 45 соответственно. При выделении областей интереса по преобразованным МСИ было выявлено: у БКА – 6 классов, у *Sentinel-2* – 5 классов, у *Landsat-8 OLI* – 5 классов. Результаты классификации МСИ и оценка их точности представлены в таблице.

Таблица

Результаты определения усыханий растительности по преобразованным МСИ методом максимального правдоподобия

Съемочная система	Результаты классификации (исходные МСИ)	Точность (общая, %; коэффициент Каппа)	Результаты классификации (преобразование, 1-й вариант)	Точность (общая, %; коэффициент Каппа)	Результаты классификации (преобразование, 2-й вариант)	Точность (общая, %; коэффициент Каппа)
БКА		83.4320; 0,7337		97.7341; 0.9673		87.25; 0.8413
<i>Sentinel-2</i>		100; 1		89.9225; 0.8710		85.0932; 0.8113
<i>Landsat-8 OLI</i>		100; 1		86.7925; 0.8314		91.3043; 0.8696

Исходя из изложенного, можно сделать вывод об улучшении детальности классификации максимального правдоподобия после обоих преобразований МСИ. По статистическим показателям точности после преобразования МСИ БКА она выросла (наиболее – в 1-м случае – 97,7341 %), у остальных МСИ она формально ухудшилась, однако значения исходной точности в 100 % для *Sentinel* и *Landsat*, выдаваемое ENVI, не являются достоверными, скорее всего ввиду низкого пространственного разрешения этих снимков.

Список литературы

1. Харук В.И., Им С.Т., Двинская М.Л. Усыхание ели (*Picea Abies*) в лесах Беларуси // Экология. 2016. № 3. С. 189–196.
2. Сайгин И.А., Барталев С.А., Стыщенко Ф.В. Метод детектирования долгосрочных усыханий темнохвойных лесов России на основе спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 11–15 ноября 2019. ИКИ РАН, 2019.
3. Давидович Ю.С., Катковский Л.В. Распознавание усыханий древесной растительности на аэрокосмических снимках // ГИС-технологии в науках о Земле: материалы респ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых, Минск, 13 ноября 2019 г. БГУ, 2019. С. 108–113.
4. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar properties of early stage bark beetle (*Ips typographus*, L.) infestation / H. Abdulah, R. Darvishzadeh, A.K. Skidmore, M. Heurich // Remote Sensing. 2019. 11. 398. P. 1–22.
5. Беляев Б.И., Катковский Л.В. Оптическое дистанционное зондирование. Минск: БГУ, 2006. 455 с.

L.V. Katkovsky, B.I. Belyaev, Yu.S. Davidovich

Institute of Applied Physics Problems named by A.N. Sevchenko,
Belarus State University, Minsk, Republic of Belarus

e-mail: katkovskyl@bsu.by; remsens@mail.ru; geo.davidoviYU@bsu.by

REMOTE SPECTRAL METHODS FOR DETECTING CONDITIONS OF CONIFEROUS TREES

The results of drying coniferous areas determination at the test forest territory in the South part of Belarus from multispectral images of different spatial resolution by maximum likelihood classification method have been presented. The subject of the research is the drying coniferous forests territories. Purpose of the study is to improve the identification of dry coniferous areas on multispectral images. For multispectral images obtained from Landsat-8 OLI and Belarusian Spacecraft for visible and near-infrared channels pansharpening procedure has been performed. Aiming to improve the spatial resolution and accuracy of classification two options of processing for the original multispectral images have been proposed. The accuracy of classification both visually and by statistical indicators is evaluated which allow us to make a conclusion about the effectiveness of the performed multispectral image processing.

Keywords: coniferous stands drying, maximum likelihood classification, multispectral image transformations.

П.А. Ким

Кандидат физико-математических наук, Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: kim@oii.sccc.ru

О ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТКЕ ТРЕХМЕРНОЙ ГИПЕРСФЕРЫ

Согласно доказанной Григорием Перельманом (2002–2003) гипотезе Пуанкаре (1904) о том, что всякое односвязное компактное трехмерное многообразие без края гомеоморфно трехмерной гиперсфере [1], для решения вопросов визуализации четырехмерных объектов в трехмерном пространстве [2] предлагается выбрать подходящее многообразие, в данном случае – шар, устанавливая гомеоморфизм между объектами, находящимися в разных пространствах, технологическими средствами картографии. В результате проведенной работы представляется возможным построение динамического видеоролика процесса распределения народонаселения на карте земного шара, что информационно обеспечивает четырехмерный поток данных, следуя идеям, заложенным в *4D-Anatomy* [3]. Предлагаемая технология открывает новые пути визуализации четырехмерного пространства.

Ключевые слова: визуализация четырехмерного пространства, гипотеза Пуанкаре, видеоряд трехмерных объектов.

Формула гиперсферы может выглядеть следующим образом, где R – ее радиус:

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 + H^2,$$

тогда, после небольшого преобразования, мы можем увидеть в правой части параметрически заданный шар:

$$R^2 - H^2X = Y^2 + Z^2.$$

Таким образом, каждой точке на гиперсфере отвечает внутренняя точка на одном из двух, склеенных по внешним поверхностям, шаров, в зависимости от положительности или отрицательности параметра $-R \leq H \leq +R$. Схема такого соответствия, поясняющая взаимодействие гомеоморфных многообразий, изображена на рис. 1 для меньших по размерности двумерных пространств. В левой части рисунка карты Северное и Южное полушария склеены по экватору и составляют плоскую двустороннюю карту. Возвращаясь к гиперсфере, отметим, что центры каждого генерируемого шара представляют собой полюсы гиперсферы, и соответственно, радиусы будут образовывать направляющие «меридианы» гиперсферы, наподобие соцветия одуванчика (рис. 2). Сечение меридиана с параллелью-подсферой, выбранной внутри произвольного шара, однозначно определяет местоположение точки как внутри этого шара, так и на поверхности гиперсферы. Итак, координата точки будет определяться набором географических координат (гиперпараллелью H , естественной параллелью, естественной медианой), т.е. точка на гиперповерхности гиперсферы будет определяться тройкой координат, при этом непрерывная линия, проводимая в шаре, также непрерывно отображается на поверхности гиперсферы.

В работе [4] рассматриваются бесконечномерные пространства, в связи с чем можно вывести итерационную формулу расчета географических координат при переходе к пространствам большей размерности – $(H, \dots, (H3, (H2, (H1, параллель, ме-$

ридиан))). Посмотрим, как выглядит каркас симплекса на гиперсфере. Любые пять точек внутри 3D-шара образуют на гиперсфере каркасные точки, формирующие симплекс-пятыгеечник.

Картографическая сетка – это изображение на карте географических меридианов и параллелей в той или иной картографической проекции. Она служит для построения картографического изображения и позволяет определять по карте координаты точек. При пользовании картой такой сетки возможно определять координаты любой точки (географические или прямоугольные, в зависимости от вида сетки) и азимуты линий, а также судить о величине искажений картографической проекции в различных частях карты. Задавая внутри шара соседние картографические поверхности сфер картами изменений географии Земли во времени, получим послойные параллели в четырехмерном пространстве, которые могут быть отслежены в виде кинокартины, отображающей процесс изменения мира (рис. 3), последовательно переходя к следующей по порядку слоев географической карте. При этом на поверхности гиперсферы графическое изображение не будет связано с существующими форматами киноотображения напрямую, и можно считать, что речь ведется об ином прочтении или ином способе визуализации четырехмерной информации.

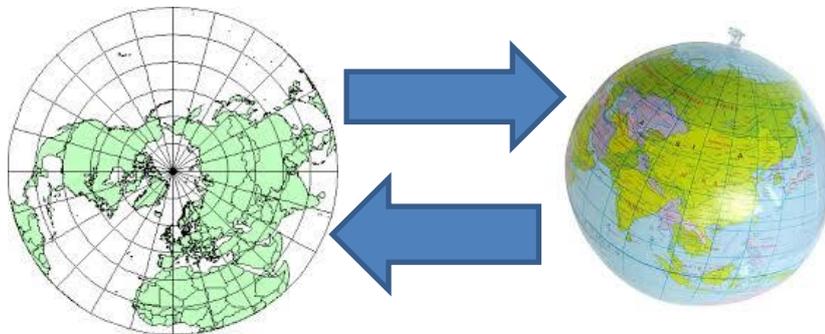


Рис. 1. Географическая карта и глобус представляют собой информационно одну и ту же систему, но визуализированную в разных пространствах



Рис. 2. Схема расположения меридиан в форме строения соцветия одуванчика

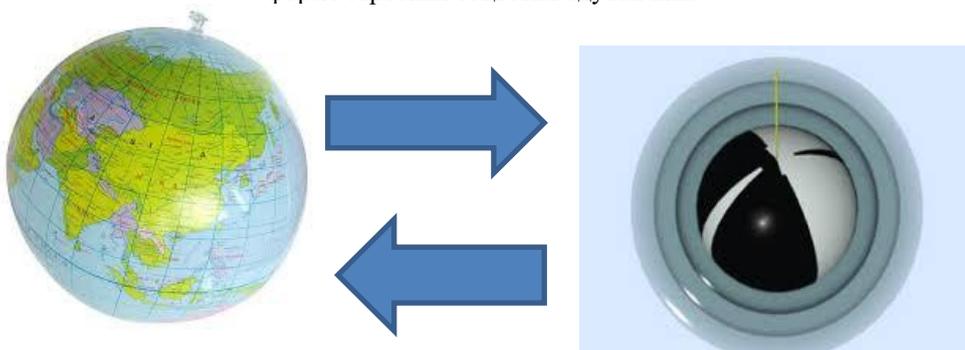


Рис. 3. Динамическое развитие во времени картографического изображения Земли может быть представлено многослойными схемами его изменений

Согласно экспертизе Федеральной службы по интеллектуальной собственности ФИПС России (№ 2016138924/12(062081) от 30.01.2018), понятие четырехмерного тела (объекта) не может быть признано относящимся к объекту изобретения, поскольку характеризует только не подтвержденную официальным источником РАН научную теорию, в то время как важным мировым индикатором вновь формирующего технологического тренда следует выделить 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. Другим примером развития новейших информационных технологий, является виртуальный учебник «4D-Анатомия» – это облачный, интерактивный, ресурс для моделирования рассеечения физического тела, а также современная образовательная платформа. Создатели программы реализовали мощный интерактивный ресурс по анатомии человека. Вы получаете не просто изображение, но можете вращать его и даже увидеть, как бьется человеческое сердце [3]. Легко представить себе, насколько полезны такие возможности в кардиологии, в условиях повышения мирового внимания к все возрастающей роли цифровой экономики. Если вспомнить, что появившаяся более полутора веков тому назад фотография, всегда воспринимавшаяся как двумерный объект, была развита в киноиндустрию, которая породила существенно более сложный объект, нежели простая «двумерность». Находящиеся в стадии развития голографические объекты выводят нас в четырехмерный мир.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект 0315-2016-0003).

Список литературы

1. Гипотеза Пуанкаре. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Гипотеза Пуанкаре](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гипотеза_Пуанкаре) (дата обращения: 09.07.2020).
2. Kim P.A., Kalantaev P.A. Four-dimensinal visualization // The 11th International Conference «Pattern recognition and image analysis: new information technologies» PRIA-11-2013, Samara. The Russian Federation, September 23–28. 2013. Vol. II. P. 604–606.
3. 4D Anatomy. URL: <https://www.4danatomy.com/> (дата обращения: 09.07.2020).
4. Ким П. Алексеевич О радиусе описанной сферы бесконечномерного симплекса // XIX Междунар. конф. по науке и технологиям. Россия – Корея – СНГ. 2019. С. 111–113.

P.A. Kim

Science Institute of Computational Mathematics
and Mathematical Geophysics, FRC KSC SB RAS , Novosibirsk, Russia
e-mail: kim@ooi.sccc.ru

ABOUT THE GEOGRAPHIC GRID OF THE THREE-DIMENSIONAL HYPERSPHERE

According to the Poincaré conjecture (1904) proved by Grigory Perelman (2002-2003) that any simply connected compact three-dimensional manifold without edges is homeomorphic to a three-dimensional hypersphere [1], to solve the problems of visualizing four-dimensional objects in three-dimensional space [2], it is proposed to choose a suitable manifold, in in this case, a ball, establishing a homeomorphism between objects located in different spaces by technological means of cartography. As a result of this work, it seems possible to build a dynamic video of the population distribution process on a map of the globe, which provides informational four-dimensional data flow, following the ideas embodied in 4D Anatomy [3]. The proposed technology opens up new ways of visualizing four-dimensional space.

Keywords: visualization of four-dimensional space, Poincare's hypothesis, video sequence of three-dimensional objects.

А.А. Колесников

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: alexeykw@mail.ru

ЭТАЛОННЫЕ ТЕСТЫ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДАМИ АКТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Развитие программных и технических средств привело к увеличению объемов такого типа данных, как облако точек. Но в исходном варианте эти данные подходят для использования далеко не всегда и требует предварительной обработки. Рассмотрен один из способов обработки – семантическая сегментация и эталонные тесты для нее. Эталонные тесты могут быть использованы как для оценки точности и производительности тех алгоритмов, которые планируется использовать, так и для подбора новых вариантов на основе рейтингов. Для выбора наиболее оптимального теста, исходя из специфики определенного облака точек, предложена блок-схема.

Ключевые слова: семантическая сегментация, облако точек, эталонный тест, benchmark.

Сегодня, во все большем числе отраслей промышленности и сельского хозяйства находят свое применение данные, получаемые методами активного дистанционного зондирования. К примерам актуальных задач, для решения которых стали активно использоваться данные этого типа, можно отнести: анализ цифровой модели рельефа местности, построение и анализ трехмерных моделей городской среды, управление рисками наводнений, мониторинг дамб, картирование лесов. Но для эффективного использования и проведения аналитических работ данные активного дистанционного зондирования (практически всегда) требуется предварительно обработать.

Одной из наиболее важных и в то же время наиболее сложных задач этапа предобработки этих данных является семантическая сегментация облака точек. Под семантической сегментацией в данном случае подразумевается присвоение отдельной точке определенного класса с учетом ее соседей. Для решения указанной задачи сейчас предлагается большое число алгоритмов и методов, реализованных в виде модулей геоинформационных систем и специализированного программного обеспечения.

Такое разнообразие приводит к проблеме выбора наиболее подходящего варианта для обработки облака точек, содержащего конкретные объекты определенного типа территории. Одним из критериев выбора могут послужить эталонные тесты (англ. *benchmark*) семантической сегментации облаков точек. Они могут быть использованы как для оценки точности и производительности тех алгоритмов, которые планируется использовать, так и для подбора новых вариантов, поскольку на сайтах разработчиков этих тестов обычно всегда приводятся рейтинги, содержащие результаты обработки данных тем или иным алгоритмом или методом.

Далее представлено описание и критерии выбора определенного эталонного теста в зависимости от содержимого облака точек, представляющего определенный

тип анализируемой местности и объекты на ней. Тип облака точек указывается исходя из четырех основных методов: на основе наборов изображений (*IDM*), *LiDAR*, на основе камер глубины (*RGB-D*), на основе систем радиолокатора с синтезированной апертурой (*SAR*).

- *Paris-Lille-3D*. Данные были получены с помощью мобильной *LiDAR* системы (*MLS*) в двух разных городах Франции (Париж и Лилль). Облако точек размечено полностью вручную и является очень детальным с точки зрения типовых городских объектов, поскольку разделено на 50 различных классов, которые относятся к девяти категориям. Основной критерий оценки *Intersect over Union (IoU)* [1].
- *Semantic3D – semantic-8*. Является эталонным тестом для классификации облаков точек, полученных с помощью *LiDAR*, городской территории с восьмью метками классов. Кроме основного, присутствует вариант с пониженным до 0,01 м разрешением (*Semantic3D – reduced-8*). Для сравнения оценки точности приведены значения общей точности и *IoU*. Этот набор данных выделяется более детальной классификацией объектов ландшафта и растительности, а также тем, что разделен на блоки по типу главного объекта (церковь, стадион, транспортная развязка и т.д.) [2].
- *SYNTHIA (The SYNTHetic collection of Imagery and Annotations)*. Этот набор данных и тест в большей степени ориентирован на сценарии автономного вождения. *SYNTHIA* состоит из наборов фотореалистичных кадров, визуализированных на основе модели виртуального города, и содержит семантические аннотации для 13 классов. Особенности является то, что поскольку набор данных полностью синтетический, то возможно получить изображения с одной и той же точки обзора для любого времени года и суток.
- *Varcity 3D*. Набор данных состоит из единого облака точек, содержащего фасады улицы, протяженностью более чем в 700 м, полученного методами *IDM*. Он лучше всего подходит для выделения классов элементов зданий, поскольку содержит разметку для классов деталей фасада, таких как окна, двери, балконы, крыша и т.д. Эталонный тест оценивается по *IoU*.
- *Vaihingen urban classification and 3D reconstruction benchmark*. Этот набор данных относится к городской территории и содержит точки (полученные с помощью *LiDAR*), относящиеся к девяти классам типовых городских объектов. Результаты обработки оцениваются с помощью матрицы ошибок.
- *SynthCity*. Синтетический набор данных и тест ориентированный на системы автономных транспортных средств. Содержит девять классов точек и оценивается по метрике *IoU*.
- *Semantic KITTI*. Наряду с более известным основным набором *LiDAR*-х данных *KITTI*, предназначенным для выделения границ объектов, важных для автономных транспортных средств, содержит семантическую классификацию точек, относящихся к автомобилям, дорогам, тротуарам, общественному транспорту, растительности, столбам, строениям. Результаты оцениваются с помощью *IoU* [3].
- *CSPC-Dataset*. Набор данных *LiDAR*, содержащий классы поверхностей, автомобилей, зданий, растительности, мостов и столбов. Его особенностью является то, что фрагменты облаков точек получены из нескольких городов на территории Китая. Эталонный тест оценивается с помощью *IoU*.
- *TerraMobilita/iQmulus 3D*. Содержит облака точек, разделенные на 11 групп, полученные на территории Парижа с помощью *LiDAR*, суммарной протяжен-

ностью в 10 км. Эталонный тест оценивает результаты обработки с помощью матрицы ошибок.

Эталонные тесты для внутренних помещений в зданиях:

- *ScanNet* – это набор видеоданных полученных методом *RGB-D*, снабженный семантической сегментацией на уровне экземпляра (вокселя), оцениваемый с помощью *IoU*. Содержит обозначения 12 классов мебели и элементов помещений. Также присутствует дополнительная классификация по типу комнаты на основе всего облака в целом.
- *2D-3D-S* – набор данных, собран методом *RGB-D* в шести крупных внутренних помещениях, которые находятся в трех различных зданий, в основном образовательных и офисных. В самом наборе дополнительно представлены трехмерные модели всего здания в виде текстурированных сеток, а также соответствующие семантические сетки для классификации [4].

Для выбора наиболее оптимального теста, исходя из специфики определенного облака точек, предлагается блок-схема, представленная на рисунке.

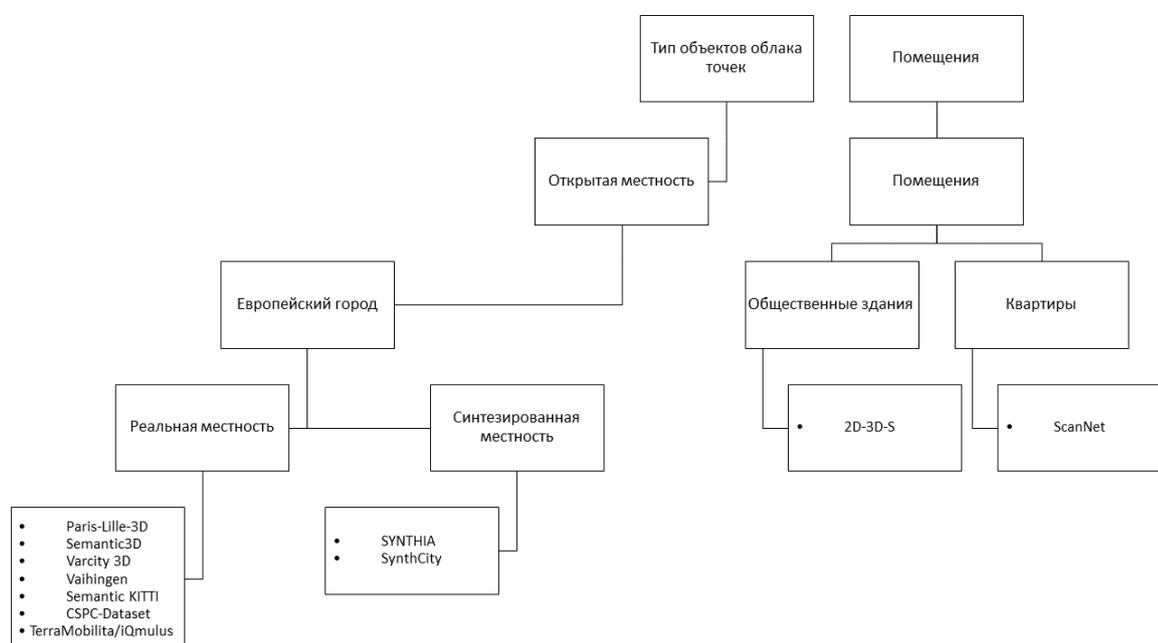


Рисунок. Блок-схема выбора оптимального эталонного теста

Таким образом, использование эталонных тестов для обработки облаков точек позволяет подобрать наиболее подходящий алгоритм обработки для конкретной задачи, либо оценить используемый по сравнению с аналогами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

Список литературы

1. Xavier R., Deschaud J., Goulette F. Paris-Lille-3D: A large and high-quality ground-truth urban point cloud dataset for automatic segmentation and classification // The International J. of Robotics Research. 2018. Vol. 37, № 6. P. 545–557. DOI: 10.1177/0278364918767506.
2. SEMANTIC3D.NET: A new large-scale point cloud classification benchmark / T. Hackel, N. Savinov, L. Ladicky [et al.] // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. IV-1-W1. P. 91–98.

A.A. Kolesnikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: alexeykw@mail.ru

BENCHMARKS OF SEMANTIC DATA SEGMENTATION OBTAINED BY ACTIVE REMOTE SENSING METHODS

The development of software and hardware has led to an increase in the amount of this type of data as a point cloud. But in the initial version, these data are not always suitable for use and requires preliminary processing. The article discusses one of the processing methods – semantic segmentation and benchmarks for it. Benchmarks can be used to assess the accuracy and performance of the algorithms that are planned to be used, and to select new options based on ratings. To select the most optimal test, based on the specifics of a certain point cloud, a block diagram is given.

Keywords: semantic segmentation, point cloud, benchmark, benchmark.

УДК 528.8

А.А. Колесников¹, П.М. Кикин², А.Д. Нунгессер¹

¹Сибирский государственный университет геосистем
и технологий, Новосибирск, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: alexeykw@mail.ru; it-technologies@yandex.ru; lady.anastasya29@yandex.ru

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В РЕКЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ

Рассмотрены возможности прогнозирования площади водной поверхности (и тем самым уровня воды) в реке на основе только открытых данных дистанционного зондирования. В качестве исходных параметров используется площадь и глубина снежного покрова, интенсивность осадков по данным *Landsat* и *Sentinel*, мониторинговым показателям *MODIS*, *Copernicus*, *REMSS*. Для выбранных параметров была выполнена оценка степени влияния на итоговый прогноз.

Ключевые слова: прогнозирование уровня воды, параметры снежного покрова, интенсивность осадков, открытые данные.

Тематика прогнозирования уровня воды в реках остается актуальной и существует ряд подходов к решению этой задачи. Поскольку сейчас в открытом доступе представлено большое количество разнообразных данных дистанционного зондирования на достаточно большом временном интервале, то становится возможным исследовать практически любую территорию с точки зрения объектов гидрографии и их взаимосвязей с климатическими факторами [1; 2]. Для решения этой задачи были выбраны методы машинного обучения, что сделало необходимым тщательную подготовку массива данных для «обучения» релевантных алгоритмов.

Сегодняшние источники открытых данных дистанционного зондирования позволяют ежедневно собирать десятки параметров окружающей среды, что, с одной стороны, дает возможность построить максимально комплексную модель, с другой же стороны – может привести к ненужному усложнению модели и переобучению [3; 4]. На начальном этапе выполнялось исследование достаточности только наиболее логически обоснованных данных для построения прогноза уровня воды и оценки его точности. Для примера была выбрана территория Иркутской области. С точки зрения механики процесса, были собраны данные по снежному покрову в участках горных массивов, с которых формируется сток Байкала и, соответственно, реки Ангара (*MODIS*), информация об осадках в этот период на территории интересующих участков водосборных бассейнов (*Copernicus, REMSS*), а также сами параметры водной поверхности (*Landsat, Sentinel*). В результате были выполнены следующие шаги: собраны данные из открытых источников, преобразованы таким образом, чтобы можно было сформировать общую таблицу, на основании которой построить математическую модель прогноза и оценить ее качество (схема выполнения представлена на рис. 1).

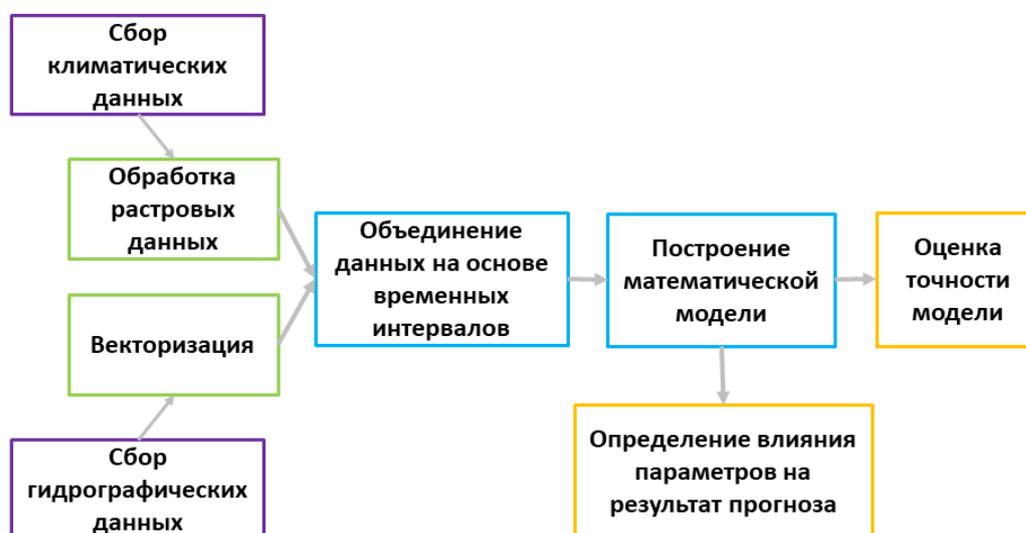


Рис. 1. Схема выполнения исследования

Данные собирались на определенных участках (рис. 2), местонахождение которых было выбрано исходя из гидрологического описания реки Ангары и озера Байкал, для которого основным источником является река Селенга. Для анализа были взяты временной интервал 2014–2019 гг.

Поскольку большая часть обучающей выборки дана в растровом виде, то нужно было выбрать способ представления каждого растра в виде одной строки таблицы (для сопоставления с соответствующим значением площади водного покрова). Для этого вычислялись сводные количественные показатели для каждого растра – максимум, минимум, среднее, медиана, стандартное отклонение. Для того чтобы хотя бы сохранить частично информацию о пространственном расположении пикселей исходных растров, для каждого из растров был использован алгоритм *PCA*. Из результатов его вычислений в сводную таблицу брались первые пять компонент.

В качестве средства автоматизации был использован инструмент *ArcGIS Model Builder*. В результате работы для каждого растра выполнялась обрезка по району сбора данных и вычислялись статистические показатели, которые сохранялись в файл формат *CSV*. Данный подход позволил сократить время на обработку каждого

растра в отдельности, но достаточно большую часть операций (формирование наборов данных для загрузки, размещение по локальным дискам, объединение результатов в одну таблицу) все равно требовалось выполнять вручную. Вследствие этого для дальнейших экспериментов планируется либо расширить скрипты *ArcGIS* с помощью написания дополнительных функций на *Python*, либо перенести большую часть ГИС-операций в какую-либо пространственную базу данных, поскольку их функционал сейчас это позволяет.

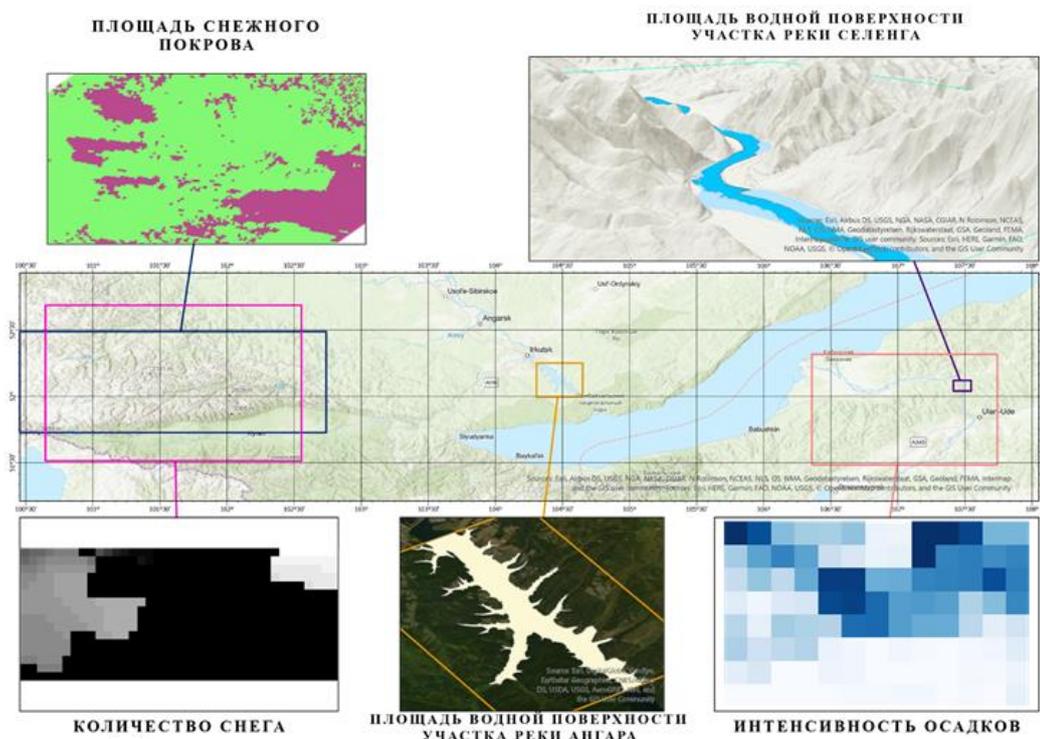


Рис. 2. Участки сбора данных

Оценка важности отдельных параметров выполнялась на основе расчета корреляции и рейтинга вклада каждого параметра в итоговый прогноз с помощью алгоритма *LIME* и *SHAP*, а также встроенного в случайный лес и дерево решений механизма *Feature Importance* [5]. По результатам оценки, наивысший рейтинг получила площадь снежного покрова.

Для построения математических моделей были выбраны алгоритмы линейной регрессии, дерева решений и случайного леса. Выбор обусловлен тем, что эти алгоритмы вычислительно просты и их результат хорошо интерпретируется. Критерием оценки точности была выбрана среднеквадратическая ошибка.

В результате оценки точности было получено что алгоритм случайного леса показал наиболее высокую точность, которая для участка реки Ангары равна $0,31 \text{ км}^2$, а для участка реки Селенги – $0,3 \text{ км}^2$, что составляет около 10 % величины отклонения от истинного значения. Для повышения точности прогноза планируется увеличить число и площади участков сбора данных, что позволит проанализировать результативность выбора мест и временных интервалов сбора данных о снежном покрове и формализовать принципы выбора, основываясь на открытой цифровой модели рельефа и базовом гидрологическом анализе. С точки зрения алгоритмов повысить качество можно использованием ансамблирования с каким-либо вариантом для прогнозирования временных рядов (например, *SARIMAX* или *LSTM*).

Список литературы

1. Ступин В.П., Пластинин Л.А. Возможности использования открытых материалов ДЗЗ для картографирования динамики берегов водохранилищ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 1, № 2. С. 172–177.
2. Андреев Д.В. Применение ГИС-технологий с целью определения затопления в Республике Саха (Якутия) // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 43–47.
3. Прогнозирование и наблюдения экстремальных весенних половодий и дождевых паводков на верхней Оби / А.Т. Зиновьев, Н.А. Балдаков, А.В. Дьяченко [и др.] // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: тр. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 4 т. 2017. С. 76–87.
4. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования дождевого и талого стока // Водные ресурсы. 1991. Т. 18, № 4. С. 5–14.
5. Orange: Data mining toolbox in Python / J. Demsar, T. Curk, A. Erjavec [et al.] // J. of Machine Learning Research. 2013. P. 2349–2353.

A.A. Kolesnikov¹, P.M. Kikin², A.D. Nungesser¹

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

²Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
e-mail: alexeykw@mail.ru; it-technologies@yandex.ru; lady.anastasya29@yandex.ru

BUILDING A MODEL FOR FORECASTING WATER LEVEL IN A RIVER ACCORDING TO OPEN SOURCES REMOTE SENSING DATA

The article discusses the possibility of predicting the water surface area (and thus the water level) in the river based on only open data of remote sensing. The area and depth of snow cover, precipitation intensity according to Landsat and Sentinel data, MODIS, Copernicus, REMSS monitoring indicators are used as initial parameters. For the selected parameters, the degree of influence on the final forecast was assessed.

Keywords: water level forecasting, snow cover parameters, precipitation intensity, open data.

УДК 550.812, 528.88

С.Л. Лещенко

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: lsl24@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ

Модернизирована математическая модель трассы прохождения светового пучка лидара в атмосфере. Разработана программная модель лидара и выполнена ее отработка в пакете прикладных программ Matlab. Проведен анализ полученных результатов, который показал, что с учетом введенных коэффициентов имеется возможность достигнуть чувствительности прибора в единицы ppm. Разработаны функциональная схема лидара, алгоритмическое и программное обеспечение устройства управления лазерной установкой, программное обеспечение приема-передачи устройства управления лазерной установкой.

Изготовлен лабораторный демонстратор, на базе которого были проведены предварительные испытания. Получено свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Ключевые слова: экологический мониторинг, комплекс лидарного зондирования, концентрация низших октанов в приземном слое, резонансное взаимодействие на селективных частотах.

Введение. На сегодняшний день доминирующей проблематикой экологического мониторинга является необходимость автоматизации процессов селективного, комплексного исследования атмосферного состава. Так, в условиях мегаполисов жизненно важно осуществлять автоматизированный мониторинг за фоновыми значениями концентраций и выбросами метаносодержащих веществ, поскольку они характеризуются токсичным действием на организм человека (класс опасности – четвертый). При этом метан среди парниковых газов занимает второе место после CO₂ и является одним из основных антропогенных воздействий при введении режима «черного неба» в условиях мегаполисов. Как частный случай, в 2018–2019 гг., в Красноярском крае это обеспечило сочетание природно-климатических факторов, приведших к возникновению чрезвычайной ситуации, связанной с возникновением и распространением лесных пожаров, приведших к экологической катастрофе на федеральном уровне.

Кроме того, проблематика оценки роли метана в развитии парникового эффекта приобрела международную значимость и актуальность. Например, создана Глобальная инициатива по метану [1].

Описание технологии. Структуры, состоящие из наночастиц, показывают ряд интересных свойств, которые зависят от состава и формы исходных частиц и могут резонировать на селективных частотах лазерного излучения. Объем исследований подобных структур существенно увеличился в последние годы, чему способствуют их свойства и возможное применение в качестве химических и биологических сенсоров. Кроме того, они могут выступать как базовые элементы более сложных структур и устройств [2]. Использование традиционных методов не позволяет создавать такие структуры по ряду причин, в первую очередь из-за дифракционного предела. Предлагаемый метод позволяет формировать структуры значительно меньшими длинами волн лазерного излучения. Селективное взаимодействие с лазерным излучением может лечь в основу дифференциального метода дистанционного зондирования метана. Сущность данного метода заключается в выборе двух близлежащих длин волн зондирующего лазерного излучения, сечения поглощения которых сильно отличается [3]. Кроме того, незначительное различие между ними позволяет считать, что их условия распространения до местонахождения метана будут одинаковыми. Такой подход позволяет создать распределенную систему экологического мониторинга, интегрированную в действующие комплексы по линии Министерства экологии и рационального природопользования, для развертывания и эффективного применения на базе больших мегаполисов. При использовании дистанционного комплекса зондирования приземного слоя появляется возможность определять выходы природного газа на земную поверхность с топографической привязкой к местности. Это позволяет локализовать предполагаемые местоположения нефте- и газоносных жил при осуществлении поисковых мероприятий, и, как следствие, существенно сократить временные и финансовые затраты на выполнение геологоразведочных работ [4].

Для мониторинга атмосферы на наличие низших октановых составляющих был создан математический аппарат, при расчете которого учитываются параметры излучателя (лазера), приемного фотоэлемента и зондируемой атмосферы [5]. Далее

на его основе была протестирована модель в программном обеспечении Matlab Simulink и доработана за счет выявленных ранее критических помех [6].

Для гелий-неонового лазера с заданными длинами волн 3,3922 и 3,3912 мкм известны параметры пятен засветки на отражающей поверхности. Оба пятна имеют диаметры 30 см на удалении 50 м, следовательно, расстояние между центрами пятна составит 7,5 см. Расстояние, которое самолет пролетит над пятнами засветки, будет 0,375 м. Крейсерская скорость самолета равна 450 км/ч, или 125 м/с. Таким образом, самолет преодолет расстояние смещения над пятнами засветки за 3 мс. Для исключения рассогласования приемник лидара должен принять не менее 10 импульсов, следовательно, период модуляции лазерного импульса должен быть не менее 300 мкс, что соответствует частоте модуляции 3 400 Гц.

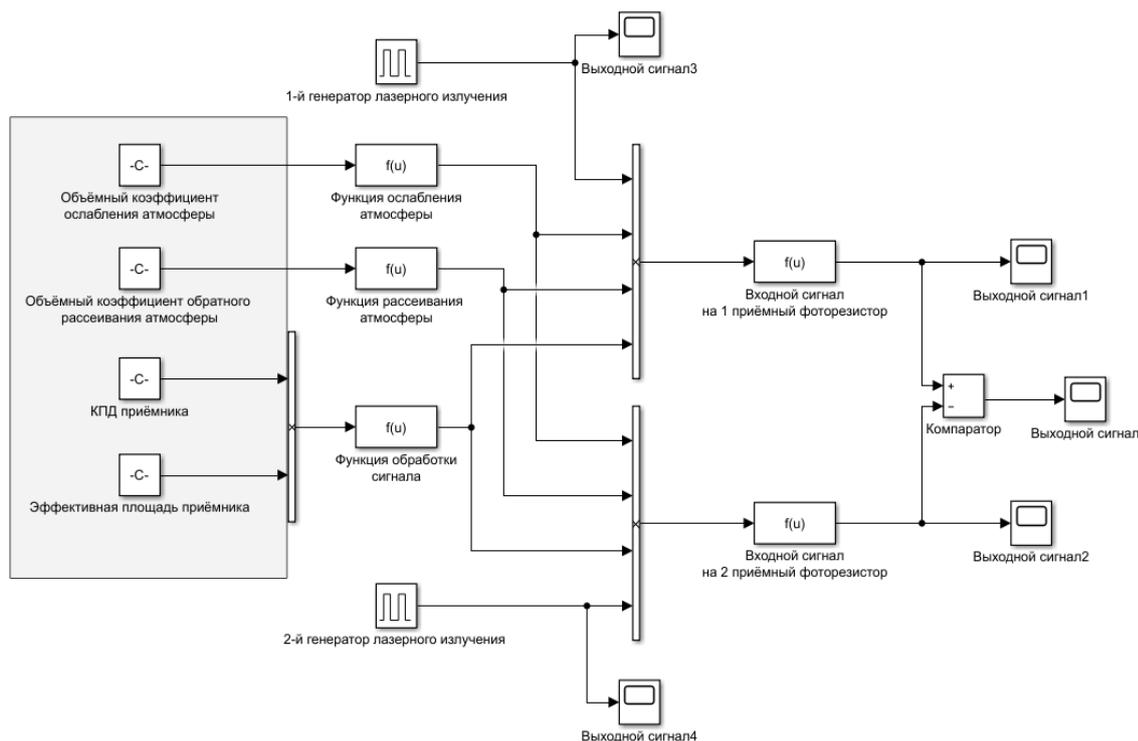


Рисунок. Модель лидара в среде Matlab Simulink

В состав данной модели входит:

- два генератора лазерного излучения с длинами волн $\lambda_1 = 3,3922$ мкм и $\lambda_2 = 3,3912$ мкм соответственно;
- константное значение объемного коэффициента ослабления атмосферы;
- константное значение объемного коэффициента обратного рассеивания атмосферы;
- константное значение КПД приемника;
- константное значение эффективной площади приемника;
- функция ослабления атмосферы, рассчитывающая погрешность изменения излучения при ослаблении сигнала, проходящего через атмосферу;
- функция рассеивания атмосферы, предназначенная для расчета погрешности изменения излучения при рассеивании сигнала, проходящего через атмосферу;
- функция обработки сигнала, рассчитывающая параметры фоторезистора, учитывая его КПД и эффективную площадь работы;
- входные сигналы на 1-й и 2-й фоторезисторы, имитирующие результат, полученный на фоторезисторы через пройденную среду атмосферы;

- компаратор, принимающий на свои входы два аналоговых сигнала с фоторезисторов и выдающая сигнал высокого уровня, если сигнал на неинвертирующем входе («+») больше, чем на инвертирующем (инверсном) входе («-»), и сигнал низкого уровня, если сигнал на неинвертирующем входе меньше, чем на инверсном входе. Выход компаратора показывает определенное соотношение метана.

Заключение. В результате, на основе проведенной ранее работы и научно-технического задела, была получена расширенная модель трассы лазерного пучка, разработана программная модель лидара в среде Matlab Simulink. Написана архитектурно-независимая программа для приема-передачи информации с фотоэлементов и получено свидетельство о государственной регистрации ПО для ЭВМ [7].

Список литературы

1. Global Methane Initiative // GMI. URL: <https://www.globalmethane.org/> (дата обращения: 28.05.2020).
2. Materials Today / L. Xu [et al.]. 2016. Vol. 19, № 10.
3. Лещенко С.Л., Попов Д.В. Метод дистанционного авиационного зондирования атмосферы для поиска залежей углеводородного сырья // V Междунар. конф. «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019: сб. науч. тр. Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 342–344.
4. Лещенко С.Л., Непомнящий Д.О., Попов Д.В. Лидар для поиска предельно малых концентраций углеводородного сырья // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки». 2019. С. 359–361.
5. Лещенко С.Л., Попов Д.В., Непомнящий Д.О. Математический аппарат трассы лидара для определения предельно малых концентраций углеводорода // Робототехника и искусственный интеллект: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. 2018. С. 60–66.
6. Лещенко С.Л., Попов Д.В., Непомнящий Д.О. Способы компенсации помех при дистанционном лидарном зондировании земной поверхности на наличие малых концентраций метана // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2019. С. 53–55.
7. Архитектурно-независимая программа управления комплексом лидарного зондирования: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019614255 Российская Федерация / О.В. Непомнящий, С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий. № 2019612762; заявл. 19.03.2019; опубл. 01.04.2019, Бюл. № 4.

S.L. Leshchenko

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: lsl24@mail.ru

ENVIRONMENTAL MONITORING TECHNOLOGY FOR PREVENTION OF ATMOSPHERIC POLLUTION

The mathematical model of the lidar light beam path in the atmosphere has been modernized. A software model of the lidar was developed and tested in the Matlab application package. An analysis of the results is carried out, which showed that taking into account the entered coefficients, it is possible to achieve the sensitivity of the device in units of ppm. A functional diagram of the lidar, algorithmic and software for a laser unit control device has been developed. The software for the reception and transmission of the laser control device was developed. A laboratory demonstrator was made, on the basis of which preliminary tests were carried out. Received a certificate of registration of computer programs.

Keywords: environmental monitoring, complex of lidar sensing, lower octane concentration in the surface layer, resonant interaction at selective frequencies.

Н.Г. Марков¹, К.А. Маслов², И.А. Керчев³, О.С. Токарева⁴

¹Доктор технических наук, ²Студент, ⁴Кандидат технических наук,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия

³Кандидат биологических наук, Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

e-mail: markovng@tpu.ru; kam20@tpu.ru; ivankerchev@gmail.com; ost@tpu.ru

СВЕРТОЧНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ПОРАЖЕННЫХ ДЕРЕВЬЕВ ПИХТЫ НА СНИМКАХ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Разработана модель сверточной нейронной сети, основанная на архитектуре полно-сверточной нейронной сети *U-Net*. С ее помощью решена задача сегментации снимков с беспилотных летательных аппаратов пихтовых насаждений, поврежденных уссурийским полиграфом. Результаты исследований предложенной модели сверточной нейронной сети показали ее достаточно высокую эффективность при сегментации на снимках деревьев пихты классов «Живые», «Свежий сухостой» и при распознавании пикселей фона.

Ключевые слова: уссурийский полиграф, деревья пихты, беспилотный летательный аппарат, семантическая сегментация изображений, сверточная нейронная сеть, *U-Net*.

Введение. В последние годы в лесах Южной Сибири, Байкальского региона и Предуралья возникают обширные очаги усыхания пихтарников из-за распространения инвазивного короеда – уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus Blandf*). Для своевременного выявления очагов инвазии с целью предотвращения экологического и экономического ущерба необходимо проводить оперативный мониторинг пихтовых насаждений с использованием дистанционных методов зондирования Земли. При этом могут быть использованы беспилотные летательные аппараты (БПЛА), обеспечивающие достаточно высокое пространственное разрешение получаемых снимков и позволяющие оценивать состояние отдельных деревьев [1].

Данная работа посвящена разработке и исследованию модели сверточной нейронной сети (СНС) при решении задачи семантической сегментации деревьев пихты, поврежденных уссурийским полиграфом, на снимках с БПЛА. В отличие от других моделей СНС, используемых, например, в работе [2], эта модель позволяет выполнять попиксельную классификацию пораженных деревьев пихты.

Исходные данные и разведочный анализ эталонных карт сегментации. В качестве исходных данных для анализа состояния деревьев пихты использованы два снимка участков пихтового леса в Томской области, заселенных уссурийским полиграфом. Снимки получены с помощью фотокамеры, установленной на квадрокоптере *DJI Phantom 3 Standart* и ведущей съемку в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Съемка проводилась с высоты 300 м в период с 7 по 28 августа 2017 г. На одном из снимков был выбран тестовый участок для исследования эффективности предложенной СНС.

В работе [1] подробно описаны категории состояния деревьев пихты, поврежденных уссурийским полиграфом. Так как некоторые категории практически не-

возможно различить на изображениях при визуальном экспертном анализе данных, то они были объединены следующим образом: в класс «Живые» попали категории «здоровые» и «ослабленные деревья», а в класс «Отмирающие» – категории «сильно ослабленные» и «усыхающие». В результате разметки изображений экспертом были построены эталонные карты сегментации с выделением сегментов, отображающих кроны деревьев пихты, относящихся к следующим классам состояния деревьев, 1 – «Живые», 2 – «Отмирающие», 3 – «Свежий сухостой» и 4 – «Старый сухостой». Все остальные пиксели изображений были отнесены к нулевому классу «Фон». Эталонные карты сегментации использовались в дальнейшем для обучения и тестирования модели СНС. Анализ полученных эталонных карт сегментации показал значительную несбалансированность классов в обучающей выборке. Наименьшее количество деревьев и пикселей было отнесено к классу «Отмирающие», в целом преобладали пиксели класса «Фон». Разведочный анализ исходных данных с использованием УМАР-вложений и коэффициентов силуэта показал, что поставленная задача семантической сегментации снимков не является тривиальной. В связи с этим необходимо использовать достаточно сложные модели, способные учитывать текстуры объектов и их формы, например, модели СНС, позволяющие решать задачи попиксельной классификации.

Разработанная модель СНС. В качестве базовой была выбрана архитектура СНС U-Net, относящаяся к классу полносверточных нейронных сетей [3]. Эта модель имеет две составляющие: энкодер и декодер. Энкодер, используя последовательность сверточных слоев (англ. *convolutional*) и слоев подвыборки (англ. *pooling*), преобразует исходное изображение в представление скрытого пространства. Декодер преобразует представление скрытого пространства в итоговую карту сегментации с помощью слоев масштабирования и сверточных слоев. В последнем слое к картам признаков применяется свертка 1×1 с необходимым для конкретной задачи количеством фильтров. Также характерной особенностью архитектур сетей подкласса *U-Net* является наличие операций конкатенации, соединяющих карты признаков из энкодера с картами признаков в декодере с целью повышения детальности результирующих карт сегментации [3]. Предлагаемая модель СНС отличается от базовой модели следующими характеристиками: входное изображение СНС представлено тензором с числом компонентов $256 \times 256 \times 3$ (соответствует фрагменту трехканального *RGB*-снимка); операции свертки не уменьшают размер выходных карт признаков; после каждого вычисления функции активации *ReLU* следует операция пакетной нормализации; выходной тензор формируется с помощью пяти сверток с ядрами размером 1×1 , что позволяет сразу получить карты сегментации с пятью классами пикселей.

Результаты исследования модели СНС. Для формирования обучающих и валидационных примеров для СНС снимки из обучающей выборки были нарезаны на фрагменты 256×256 пикселей со сдвигом 128 пикселей. Также осуществлялась аугментация данных путем поворота исходных снимков. Всего было получено 4 116 обучающих и 288 валидационных примеров. С целью улучшения обобщающей способности модели СНС была использована техника аугментации «на лету», позволяющая расширить обучающую выборку путем случайных преобразований данных: увеличение масштаба, затемнение и осветление снимков, а также отражение фрагментов снимка относительно вертикальной оси. При обучении СНС использовался алгоритм оптимизации Adam, а при определении ее оптимальных гиперпараметров – метод сеточного поиска. На рисунке приведены результаты сегментации изображения тестового участка с помощью обученной модели СНС. Оценка качества сегментации проводилась с использованием известных метрик *Precision*, *Recall*, *F1*-мера и *IoU*, значения которых приведены в таблице.

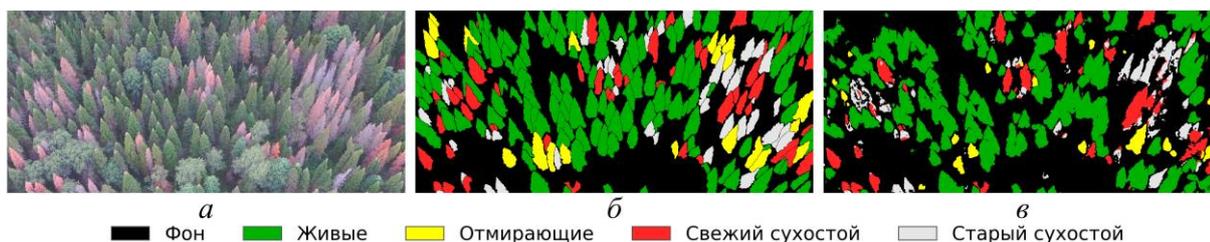


Рисунок. Изображение тестового участка: *а* – исходный участок снимка; *б* – эталонная карта сегментации; *в* – результат сегментации с помощью модели СНС

Таблица

Результаты оценки качества сегментации изображения тестового участка

<i>Класс</i>	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>F1-мера</i>	<i>IoU</i>
Фон	0,72	0,90	0,80	0,66
Живые	0,84	0,70	0,77	0,62
Отмирающие	0,66	0,25	0,37	0,22
Свежий сухостой	0,84	0,62	0,71	0,55
Старый сухостой	0,67	0,44	0,53	0,36

Значения метрики IoU для классов «Фон», «Живые» и «Свежий сухостой» превышают 0,5, что свидетельствует о достаточно высоком качестве сегментации снимков деревьев пихты этих классов и фона. Для классов «Отмирающие» и «Старый сухостой» получены невысокие результаты из-за малого количества деревьев класса «Отмирающие» в обучающей выборке и из-за искажений изображения тестового участка, связанных с углом съемки.

Заключение. Разработана модель СНС для сегментации снимков с БПЛА пихтовых насаждений, поврежденных уссурийским полиграфом. Показана достаточно высокая эффективность этой модели при сегментации деревьев пихты классов «Живые», «Свежий сухостой» и при распознавании пикселей фона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке по гранту РФФИ № 18-47-700010 р_а. Наземные мониторинговые наблюдения и съемка с БПЛА лесных массивов проводились в рамках выполнения базового проекта ИМКЭС СО РАН (проект VI.52.2.6).

Список литературы

1. Технология мониторинга пихтовых лесов в зоне инвазии уссурийского полиграфа в Сибири: метод. пособие / С.А. Кривец, Э.М. Бисирова, Е.С. Волкова [и др.]. Томск: Изд-во УМИУМ, 2018. 74 с.
2. Detection of fir trees (*Abies sibirica*) damaged by the bark beetle in unmanned aerial vehicle images with deep learning / A. Safonova, S. Tabik, D. Alcaraz-Segura [et al.] // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, № 6. 643. DOI: 10.3390/rs11060643.
3. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // arXiv preprint arXiv:1505.04597. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf> (дата обращения: 15.07.2020).

N.G. Markov¹, K.A. Maslov¹, I.A. Kerchev², O.S. Tokareva¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

e-mail: markovng@tpu.ru; kam20@tpu.ru; ivankerchev@gmail.com; ost@tpu.ru

A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR SEGMENTATION OF DAMAGED FIR TREES IN UAV IMAGERY

In this paper, we propose a convolutional neural network model based on the architecture of the fully convolutional network U-Net. The model has been applied to the problem of semantic segmentation of unmanned aerial vehicle images of fir forests damaged by *Polygraphus proximus*. Results of the evaluation of the proposed model have shown its relatively high performance while doing segmentation of fir trees of the classes «Living trees», «Recently dead trees» and classifying background pixels.

Keywords: Polygraphus proximus, fir trees, unmanned aerial vehicle, semantic image segmentation, convolutional neural network, U-Net.

УДК 004.932.2

Д.А. Перфильев

Кандидат технических наук, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: perfiliev7775@yandex.ru

СЕГМЕНТАЦИЯ ЧАСТОТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Предложена математическая модель сегментации области напряженности сплава на основе механизма формирования радиуса частотной функции $f(\xi_r)$. В качестве ограничения предлагается использовать признак выпуклости контура сегментированной области.

Ключевые слова: сегментация свойств, правило сегментации, стратегия сегментации.

Введение. Математическая постановка задачи сегментации, учитывающая частотную характеристику $f(\xi_r)$ аналитической функцией $f(z)$ [1; 2], имеет следующий вид.

Пусть задано $f\{z_i\}$ – множество отношений соседства, которые представлены аналитической функцией $f(z)$, а также предикат $Lp(s_i^{\text{Sem}})$, определяющий радиус однородности r_i^{Sem} .

Для детерминированной модели решением задачи сегментации является разбиение множества $f\{z_i\}$ на N классов, для которых $Lp(s_i^{\text{Sem}})$ принимает истинные значения, удовлетворяющие цели.

В этом случае сегментация рассматривается как стратегия восходящего и нисходящего анализа:

$$\text{Seg: } f(z) \xleftrightarrow[r_i^{\text{Sem}}]{Lp(s_i^{\text{Sem}})} n_i^{(\text{Sem})}, \quad (1)$$

где $n_i^{(Sem)} \in N$ – семантическое отношение (имя класса), определенное при анализе радиуса $r_i^{(Sem)}$ однородности области.

Сложность сегментации определяется рядом концептуальных аспектов:

- цель интерпретации – (феноменология объекта);
- адекватностью отображения – (феноменологических свойств или существенных признаков принятой аналитической модели: $f(z)$).

Для детерминированной модели решением задачи сегментации аналитической функции $f(z)$ является разбиение изображения на непустые связные области на $f\{z_i\}$, для которых правило Lp принимает истинные значения тогда и только тогда, когда любая пара элементов $[z_i - z_{i-1}]$ из любого подмножества $z_i \in f(z)$ удовлетворяет концептуальной цели интерпретатора вида

$$\oint_p f(z)dz = \lim_{\max[z_i - z_{i-1}] \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f'(s_i)(z_i - z_{i-1}),$$

где $f'(s_i)$ – характеризует динамику изменения физического признака (семантические отношения, имя области – s_i^{Sem}); $Lp [z_i - z_{i-1}]$ – указание на модель «соседства», определяемого радиусом $r_i^{(Sem)}$ однородности физического признака.

Математическая модель «соседства» для любой точки аналитической функции $f(z)$ в замкнутом контуре описывается интегральной формулой Коши

$$f^{(i)}(z) = \frac{i!}{2\pi i} \oint_{s_i} \frac{f(z)}{(z_0 - z)^{i+1}} dz. \quad (2)$$

Если путь в положительном направлении (против часовой стрелки) определен гладким параметрическим заданием $z = z(t)$ ($\alpha \leq t \leq \beta$), причем $z(\alpha) = a$ и $z(\beta) = b$ (a, b – начальные точки интегрирования дуги), то вычисление осуществляется по формуле

$$f(z)dz = \oint_{\beta\alpha} f(z(t))z'(t)dt = \int_{\alpha}^{\beta} \text{Re}[f(z(t))z'(t)]dt + i \int_{\alpha}^{\beta} \text{Im}[f(z(t))z'(t)]dt. \quad (3)$$

Выражение (2) позволяет сегментировать контур односвязной области изображения, а (3) – характеризовать динамику свойств.

Обычно в задаче интерпретации феноменологии объекта выполняется анализ динамики изображения частотной характеристики. Пример сегментации областей напряженности ленты из сплава АМгб представлен на рисунке.

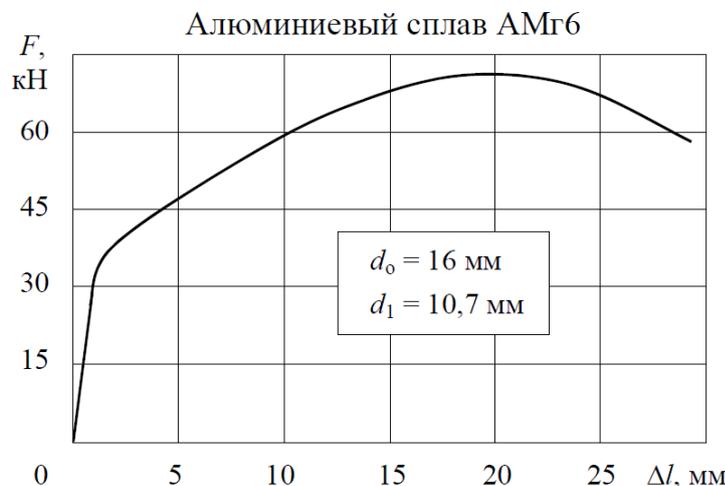


Рисунок. График напряженности ленты сплава АМгб

Для более сложных систем сплавов используется описание контуров много-связных областей, т.е. с учетом обхода в отрицательном направлении (почасовой стрелки):

$$f^{(i)}(z) = \frac{i!}{2\pi i} \oint_{s \subset S_i} \frac{f(z_0) - f(z)}{(z_0 - z)^{i+1}} dz. \quad (4)$$

Соответственно вычисление осуществляется по формуле

$$f(z) dz = \int_{\alpha}^{\beta} \text{Re}[f(z(t))z'(t)] dt + i \int_{\alpha}^{\beta} \text{Im}[f(z(t))z'(t)] dt + \sum_{s=1}^n \int_{s_i} \text{Re}[f(z(t))z'(t)] dt + i \int_{s_i} \text{Im}[f(z(t))z'(t)] dt. \quad (5)$$

Проблема возникает в определении особой точки z_0 . Обычно точка интегрирования устанавливается эмпирически. В статье предлагается модель вычисления особой точки, сходя из анализа частотной функции $f(\xi_r)$.

Сегментация частотной характеристики изображения. Модель динамики частотной характеристики наиболее точно отображает феноменологию объекта. В этом случае сегментация частотной характеристики односвязной области аналитической функции $f(z)$ описывается интегральной формулой вида

$$f^{(i)}(z) = \frac{i!}{2\pi i} \oint_{S_i} \frac{f(\xi_r)}{(\xi_r - z)^{i+1}} d\xi_r, \quad (2a)$$

где ξ_r – частотная оценка на интервале $[z_i - z_{i-1}]$; $f(\xi_r)$ – частотная характеристика аналитической функции.

Вычисление интеграла, характеризующего динамику изменения частотной характеристики сегментированной области, осуществляется по формуле

$$f(\zeta_r) dz = \oint_{\beta\alpha} f(\zeta_r(t)) \zeta_r'(t) dt = \int_{\alpha}^{\beta} \text{Re}[f(\zeta_r(t)) \zeta_r'(t)] dt + i \int_{\alpha}^{\beta} \text{Im}[f(\zeta_r(t)) \zeta_r'(t)] dt. \quad (3a)$$

Выражение (3a) позволяет сегментировать контур односвязной области изображения с заданными частотными свойствами. Как пример, для сплава АМгбМ обычная напряженность на интервале $[z_i - z_{i-1}]$ составит $\sigma_{0,2} = 17$ кгс/мм² при $K = 1,0$.

С физической точки зрения изображение представляет собой отображение частотных свойств объекта ξ_r , которые удобно упорядочить, выделяя верхние и нижние значения. Область изображения $f(\xi_r)$ является однородной, если для всех ξ_r , представляющих область, существует единственное верхнее и нижнее значение. При этом свойства объекта в признаковом пространстве ограничены радиус-вектором $Lp(s_i^{\text{Sem}})$, а производное множество $f(\xi_r)$ представляет собой дополнение (3a) для однородной и односвязной области.

Для классификации однородности сегментированной области используется признак выпуклость формы характеристики вида

$$Q = \frac{1}{S_i} \int_{\alpha}^{\beta} f(r_i^{\text{Sem}}) dt. \quad (5)$$

Анализ выпуклости выполнялся в соответствии с правилом обхода контура методом Р. Грехам.

Эксперимент. Целью эксперимента является сегментация области изображения, представляющей феноменологию объекта. В качестве данных эксперимента использовались эталонные модели стандартной напряженности деформируемого алюминиевого сплава АМгбМ $\sigma_{0,2} = 17$ кгс/мм² при $K = 1,0$:

$$\sigma = \frac{2}{3} \sigma_{0,2} \cdot K \left(1 - \frac{1}{3} A^2\right),$$

где

$$A = \frac{\sigma_{0,2} \cdot K}{\sigma_{0,2} \cdot K + [0,04 \div 0,2] \cdot 10^{-2} E}$$

(E – модуль продольной упругости (модуль Юнга для АМг6М равен 7 000 кгс/мм²)).

В работах [11; 22] отмечается, что микроструктура деформируемого сплава листов (плит) алюминия от 30 до 60 мм, вырезанная на расстоянии 300–500 мкм от микротрещин, отличается от микроструктуры стандартного раствора до 80 %. Отмечено, что по мере приближения к микротрещине происходит изменение напряженности раствора. Для определения динамики частотной характеристики изменения напряженности области применялась следующая стратегия вычисления разности площади выпуклого контура и контура микротрещины.

Вычисление частотной характеристики:

$$f(\zeta_r) = P(\omega) + jQ(\omega) = f(\omega)e^{j\phi(\omega)} = f(\omega)[\cos\phi(\omega) + j\sin\phi(\omega)],$$

где $P(\omega) = \operatorname{Re} f(j\omega)$; $Q(\omega) = \operatorname{Im} f(j\omega) = f(\omega)\sin\phi(\omega)$; $\phi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{P(\omega)}{Q(\omega)}$.

Вычисление площади контуров:

$$f(z)dz = \int_{\alpha}^{\beta} \operatorname{Re}[f(z(t))z'(t)]dt + i \int_{\alpha}^{\beta} \operatorname{Im}[f(z(t))z'(t)]dt + \sum_{s=1}^n \int_{s_i} \operatorname{Re}[f(z(t))z'(t)]dt + i \int_{s_i} \operatorname{Im}[f(z(t))z'(t)]dt.$$

В результате сегментации выделяется контур области изображения соответствующий заданной частотной характеристике функции $f(\xi_r)$.

Вычисление радиуса однородности класса r_i^{Sem} от особой точки ω_0 :

$$f^{(i)}(\omega_0) = \frac{i!}{2\pi i} \oint_{s_i} \frac{f(\omega_r)}{(\omega_r - \omega_0)^{i+1}} d\omega_r.$$

В результате характеристика $f(\xi_r)$ позволила сформировать классы областей изображения с характерными свойствами изменения напряженности.

Заключение. Предлагается математическая модель сегментации (2а), учитывающая относительно более сложную модель соседства, выраженную функцией $f(\xi_r)$. Для детерминированной модели решением задачи сегментации однородности является разбиение изображения на N классов, для которых $Lp(s_i^{\text{Sem}})$ принимает истинные значения, удовлетворяющие цели.

В этом случае сегментация объекта является комбинированной стратегией

$$\text{Seg: } f(\xi_r) \xleftrightarrow{\frac{Lp(s_i^{\text{Sem}})}{r_i^{\text{Sem}}}} n_i^{(\text{Sem})},$$

где $r_i^{(\text{Sem})} \in N$ – семантическое отношение (имя объекта), определенное при анализе частотной однородности напряженности области [3–12].

Список литературы

1. Perfil'ev D. segmentation object strategy on digital image // J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. Vol. 11 (2). P. 213–220.
2. Перфильев Д.А. Сегментация объекта на цифровом изображении // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. научн. конф. / науч. ред. Е.А. Ваганов; отв. за вып. А.В. Машукова. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. 366 с.
3. Денисов Д.А. Компьютерные методы анализа видеoinформации: монография. Краснояр. гос. техн. ун-т. Красноярск, 1993. 192 с.
4. Борисенко В.И., Златопольский А.А., Мучник И.Б. Сегментация изображений (состояние проблемы) // Автоматика и телемеханика. 1987. № 7. С. 3–56.
5. Перфильев Д.А. Классификация сегментов металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов. // Вестн. СибГАУ. 2007. № 1 (14). С. 118–122.

6. Чочиа П.А. Пирамидальный алгоритм сегментации изображений // Информационные процессы. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. Т. 10, № 1. С. 23–35.
7. Коулмен Г.Б., Эндрюс Х.С. Сегментация изображений при помощи автоматической классификации // ТИИЭР. 1979. № 5. С. 82–97.
8. Brian L. DeCost, Elizabeth A. Holm A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data // Computational Materials Science. 2015. № 110. P. 126–133.
9. 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.
10. Segmentation of dual phase steel micrograph: An automated approach / S. Banerjee, S.K. Ghosh, S. Datta, S.K. Saha // Measurement. 2013. P. 2435–2440.
11. 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 61. 2013. P. 4559 – 4571.
12. 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. 2013. A 585. . P. 480–487.

D. A. Perfilyev

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: perfilyev7775@yandex.ru

SEGMENTATION OF FREQUENCY HETEROGENEITY OF THE IMAGE

The article offers a mathematical model of segmentation of the alloy stress region based on the mechanism of forming the radius of the frequency function $f(\xi, \gamma)$. As a limitation, it is proposed to use the characteristic of convexity of a contour of a segmented region.

Key words: segmentation properties, the rule of segmentation, segmentation strategy.

УДК 630.005

Ю.А. Полевщикова

Кандидат сельскохозяйственных наук, Поволжский государственный
технологический университет, Йошкар-Ола, Россия
e-mail: polevshikovaya@volgatech.net

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕМНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Изучение изменения земного покрова и его движущих сил является одной из наиболее важных областей устойчивого развития региона в связи с экологической обстановкой и загрязнением окружающей среды в Республике Марий Эл. Изменения в землепользовании могут напрямую изменять ландшафты территорий, влиять на биоразнообразие и экологическую продуктивность. Технологии дистанционного мониторинга занимают важное ме-

сто в таких исследованиях. Дистанционное зондирование и методы геоинформационных систем широко используются для мониторинга земного покрова в условиях изменения климата и антропогенного воздействия, но отсутствие надежной информации об изменениях в землепользовании остается серьезной проблемой на сегодняшний день. Исследование охватывает оценку изменения земного покрова, вызванного различными типами естественных нарушений (лесные пожары, вырубки и усыхания древостоев) в Республике Марий Эл Российской Федерации. В данной статье рассмотрена оценка динамики земного покрова с использованием спутниковой информации и проведения мониторинга нарушений лесного покрова, результаты которого могут быть полезны для дальнейших исследований в рамках различных временных масштабов.

Ключевые слова: земной покров, изменение землепользования, дистанционное зондирование, ГИС, моделирование, Республика Марий Эл.

Современные подходы к изучению изменений в землепользовании в значительной степени основаны на долгосрочном мониторинге и пространственно-временном анализе динамики земного покрова [1–3]. С развитием геоинформационных технологий увеличивается роль спутниковых снимков и программного обеспечения для получения информации и создания современных методов мониторинга глобальных изменений в земном покрове [4; 5]. Созданные базы данных ГИС обеспечивают необходимую платформу для анализа большого количества данных, обновления и прогнозирования результатов тематического картографирования [6; 7].

Целью данной статьи является оценка динамики изменения земного покрова с использованием технологий дистанционных методов и геоинформационных систем. Основное внимание уделено ретроспективному анализу спутниковых снимков *Landsat* на территории Республики Марий Эл.

Территория исследования. Республика Марий Эл общей площадью 23 375 км² (рис. 1) была выбрана в качестве территории исследования для проведения оценки динамики земного покрова. Южная часть республики покрыта преимущественно лесными землями, северная часть – сельскохозяйственными угодьями.

Методы исследования. Основными методами для обработки данных были следующие:

- тематическое картографирование спутниковых изображений;
- оценка точности;
- оценка динамики земного покрова.

Тематическое картографирование земного покрова для исследуемой территории проводилось с использованием метода неуправляемой классификации способа IsoData. Этот метод основан на оценке критериев близости точек в пространстве признаков.

Оценка точности созданной тематической карты проводилась методом пост-классификационной обработки данных, включающей в себя:

- сравнение с наземными данными (полевые исследования);
- построение «матрицы ошибок» (*confusion matrix*);
- расчет общей точности и коэффициента Каппа.

Оценка динамики земного покрова была выполнена на основе полученных тематических данных и геоинформационных систем с использованием метода *Map algebra*, включающего пространственно-временные изменения в земном покрове Республики Марий Эл.

Результаты исследования. В исследовании применялась методика интегрированного взаимодействия данных дистанционного зондирования и геоинформационных систем за период 1985–2018 гг. для территории Республики Марий Эл.

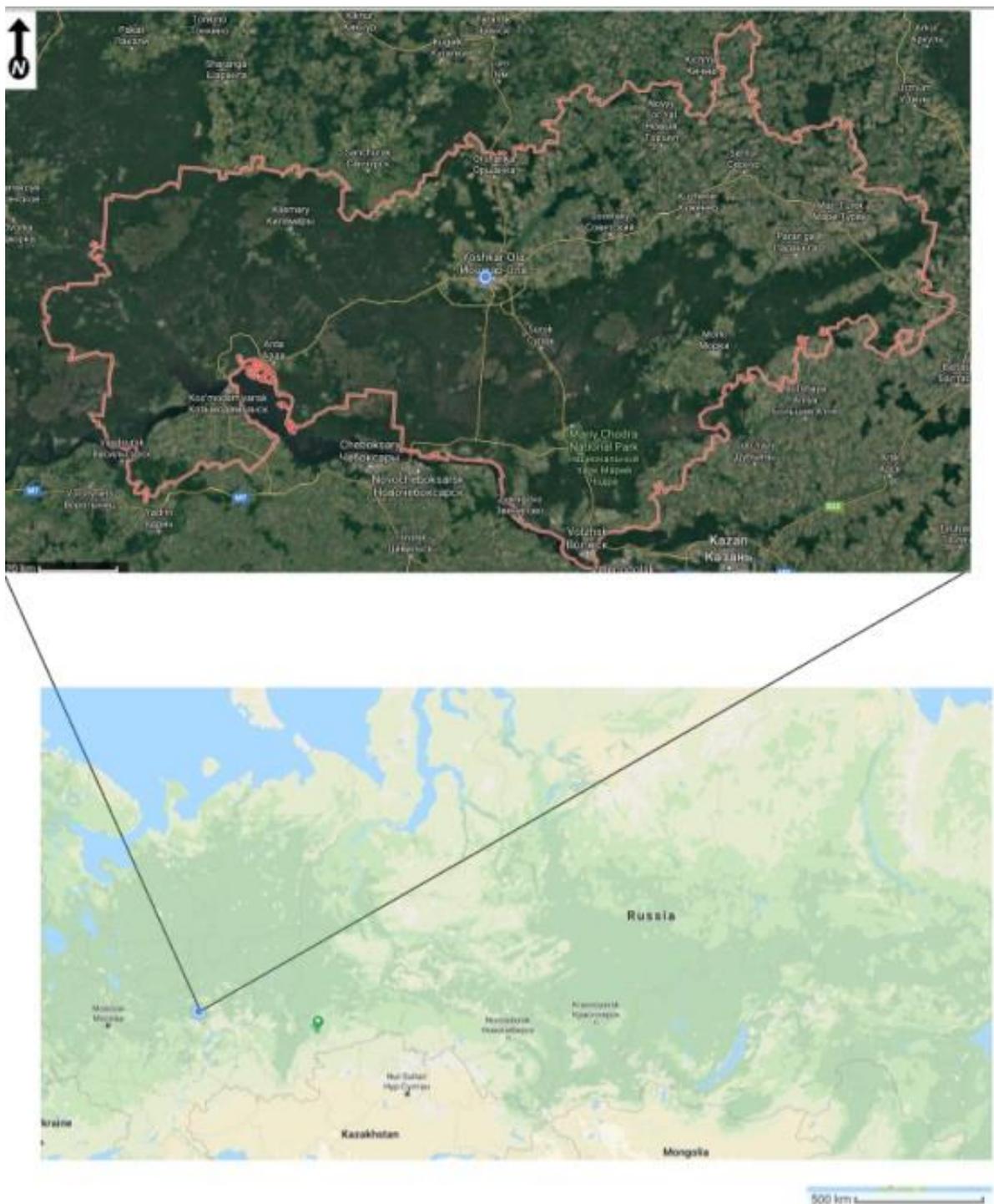


Рис. 1. Местоположение территории Республики Марий Эл

Результатом неуправляемой классификации спутниковых данных *Landsat* стали тематические карты, отражающие пространственное распределение земного покрова. Флора изучаемого региона включает границы южной тайги и смешанного лесного покрова (хвойные и широколиственные леса).

Общая точность классификации тематической карты в 2018 г. (рис. 2) составила 84 % с коэффициентом Каппа 0,82.

Полученная карта динамики изменения земного покрова отражает распределение тематических классов на территории исследования: площадь лесного покрова без изменений, ее увеличение или уменьшение в течение изучаемого периода, а также площадь нелесного покрова.

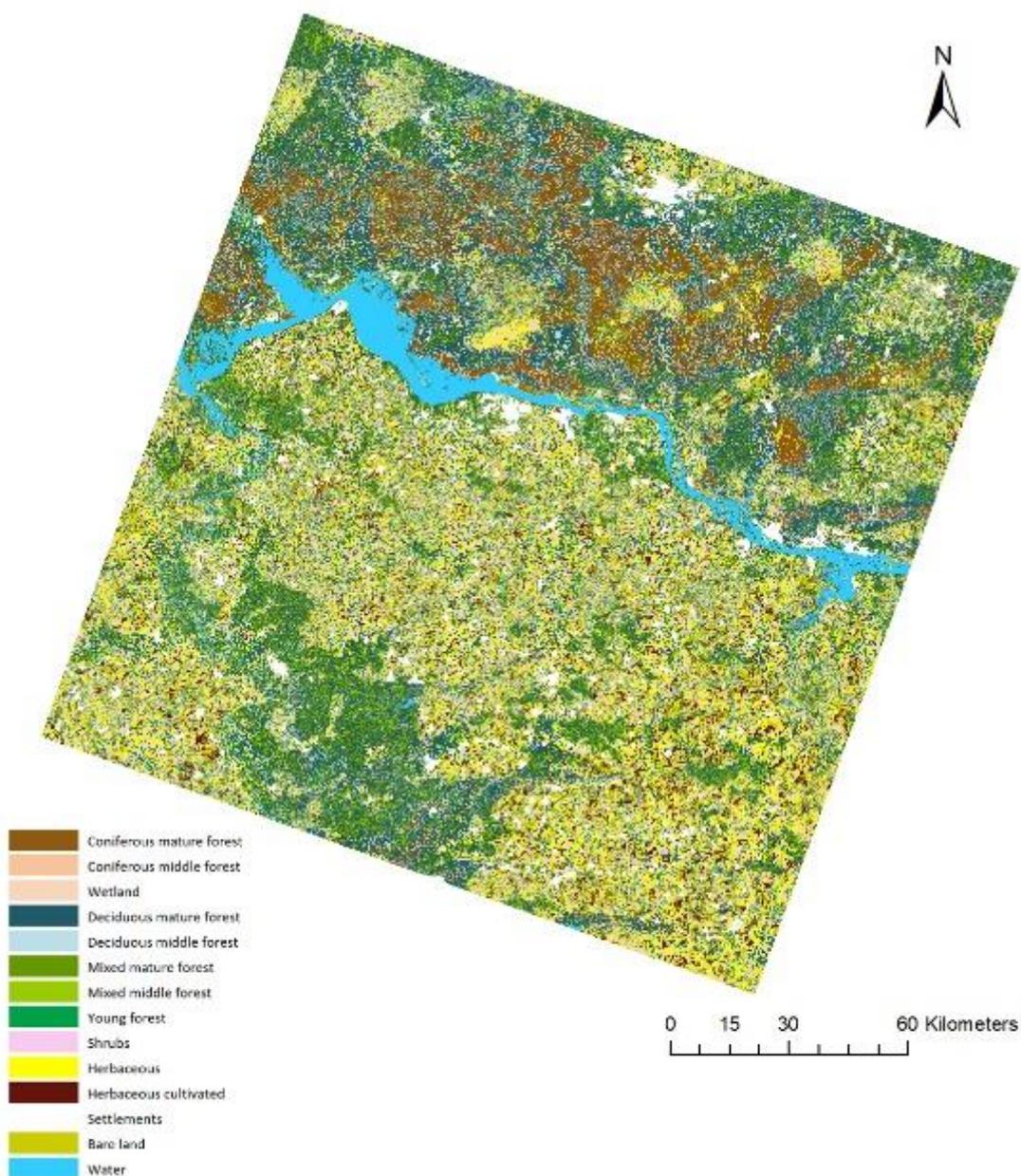


Рис. 2. Тематическая карта 2018 г.

Основные изменения в лесном покрове, связанные с заготовкой древесины, лесными пожарами и усыханием еловых насаждений, являются результатом засухи 2010–2012 гг. В основном нарушенные лесные объекты представлены отдельными участками (например, вырубki) или большими площадями (гари 2010 г.). Значительные территории нарушений являются результатом проведения интенсивных рубок.

В данной статье описан подход по оценке динамики изменения земного покрова. Методология основана на оценке нарушенности лесов во времени и пространстве. Анализ данных позволяет выявлять изменения в землепользовании (когда и где происходят изменения). Кроме того, такой метод позволит повысить эффективность научно-исследовательских работ и деятельности лесных предприятий по оценке изменений в лесопользовании, а также качество тематического картографирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-55-80010\19.

Список литературы

1. Li X. Spatiotemporal variations in productivity and water use efficiency across a temperate forest landscape of northeast China // *Forest Ecosystems*. 2019. № 6 (1). P. 22.
2. Koyama C.N. Mapping the spatial-temporal variability of tropical forests by ALOS-2 L-band SAR big data analysis // *Remote Sensing of Environment*. 2019. № 233, 111372.
3. Shahriari M. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran // *Catena*. 2019. № 182, 104149.
4. Jimenez D.L. Forest degradation with remote sensing: How spatial resolution plays a role // *5th International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, EORSA*. 2018. Proceedings, 8598620.
5. Main-Knorn M. Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach // *Remote Sensing of Environment*. 2013. № 139. P. 277–290.
6. Bartalev S.A. Multi-year circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION // *International J. of Remote Sensing*. 2007. № 28(6). P. 1397–1404.
7. Polevshchikova Iu.A. Methods of modeling the state of forest plantations in the Middle Volga region using satellite images // *Proceedings of the V International Scientific Conference «Regional Problems of Remote Sensing of the Earth»*. 2018. P. 165–168.

Iu.A. Polevshchikova

Candidate of Agricultural Sciences, Volga State University of Technology,
Yoshkar-Ola, Russia
e-mail: polevshikovaya@volgatech.net

DYNAMIC ASSESSMENT OF LAND COVER USING REMOTE SENSING DATA

The study of changes in the land cover and its driving forces is one of the most important areas for sustainable development of the region in connection with the ecological situation and environmental pollution in the Republic of Mari El. Land-use changes can directly change the landscapes of territories, affect biodiversity and ecological productivity. Remote monitoring technologies play an important role in such research. Remote sensing and geographic information systems are widely used to monitor land cover in the face of climate change and anthropogenic impacts, but the lack of reliable information on land-use change remains a major problem today. The study covers an assessment of the change in land cover caused by various types of natural disturbances (forest fires, felling and drying out of forest stands) in the Republic of Mari El of the Russian Federation. This article discusses the assessment of the dynamics of the land cover using satellite information and monitoring of forest cover disturbances, the results of which can be useful for further research within different time scales.

Keywords: land cover, land use change, remote sensing, GIS, modeling, Republic of Mari El.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-55-80010\19.

А.А. Прошин, А.М. Матвеев, А.В. Кашницкий
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
e-mail: andry@iki.rssi.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО БЛОЧНОГО ДОСТУПА К ДАННЫМ В АРХИВАХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Рассмотрены вопросы обеспечения блочного доступа к разнородным данным в архивах спутниковых данных с целью проведения их эффективной распределенной обработки. Подтверждена актуальность такого подхода для организации обработки разнородных спутниковых данных, особенно для проведения совместной обработки различных типов спутниковых данных. Предложен вариант динамического формирования данных по ячейкам обработки, не требующий трансформации самих архивов спутниковых данных. Кратко описана разработанная в ИКИ РАН технология, предназначенная для этой цели. Приведен пример внедрения данной технологии.

Ключевые слова: обработка спутниковых данных, архивы спутниковых данных, большие данные, ЦКП ИКИ-Мониторинг.

Введение. В настоящее время для решения многих задач, связанных с изучением и мониторингом различных процессов и явлений, одновременно используются долговременные ряды спутниковых данных, полученных с разных спутников и установленных на них приборов наблюдения. При этом, как правило, схема хранения для каждого из типов спутниковых данных оптимизирована под его специфику и зависит от подходов, используемых конкретными группами разработчиков, обеспечивающих доступ к данным. Разнородность используемых спутниковых данных существенно усложняет разработку новых процедур обработки конкретных данных, но еще больше проблем возникает при необходимости совместного анализа и обработки различных типов спутниковых наблюдений, что позволяет решать многие исследовательские и прикладные задачи на качественно более высоком уровне.

Одним из возможных подходов для устранения вышеописанных проблем может быть реорганизация самих архивов спутниковых данных, которая позволила бы хранить различные спутниковые данные в едином пространственном разбиении и проекции. Это позволило бы реализовать унифицированный блочный доступ к различным данным в архивах и радикально упростить реализацию процедур их анализа и обработки, повысить их эффективность. Однако у такого подхода есть существенные недостатки. Во-первых, любая подобная трансформация данных приводит к потере их качества. Во-вторых, невозможно выработать такое разбиение, которое было бы одинаково эффективно для разных типов спутниковых данных и разных задач по их обработке и анализу. Хранение же сверхбольших объемов спутниковых данных в архивах одновременно в различных представлениях требует чрезмерных материальных затрат. Поэтому наиболее целесообразным, на наш взгляд, подходом является динамическое формирование оптимальных для конкретных типов обработки пространственных разбиений.

Важно отметить, что обработка долговременных рядов спутниковых данных по значительным территориям требует весьма значительных вычислительных ресурсов, а в общем случае требует реализации эффективной распределенной параллельной обработки. Поэтому задача минимизации накладных расходов при обеспечении блочного доступа к данным выходит на первый план. Для этого на этапе подготовки данных для обработки целесообразно использовать прямой доступ к файлам в архивах, позволяющий получать из них и передавать по сети только ту часть информации, которая необходима для проведения конкретной обработки. Еще одним важным направлением снижения накладных расходов является выбор оптимального размера ячеек разбиения, от которого, в частности, зависит скорость чтения файлов данных и время передачи их по сети. Настоящая статья посвящена краткому описанию разработанной в ИКИ РАН унифицированной технологии обеспечения блочного доступа к данным в архивах для проведения их эффективной распределенной параллельной обработки.

Описание технологии. Механизм обеспечения блочного доступа к данным практически невозможно рассматривать в отрыве от реализации самой процедуры проведения распределенной параллельной обработки спутниковых данных. В рамках используемой в ИКИ РАН технологии [1] за управление процессом обработки отвечает выделенный сервер диспетчеризации, на котором формируются задания для выполнения на вычислительных узлах, а на самих вычислительных узлах устанавливается стандартное программное обеспечение, позволяющее выполнять широкий спектр различных типов обработки. Каждое задание содержит описание действий, которые необходимо произвести над набором данных, и информацию о местонахождении требуемых файлов данных, а в некоторых случаях и сами файлы, которые необходимо обработать. При использовании блочного доступа к данным указываются уже не пути к конкретным файлам, а инструкции, необходимые для получения требуемых ячеек разбиения заданных экземпляров спутниковых данных, в качестве которых могут выступать спутниковые пролеты или полученные на их основе композитные изображения. При этом в общем случае хранение данных, относящихся к такому экземпляру данных, реализуется в виде множества файлов данных. Освободившиеся вычислительные узлы в соответствии с централизованно определяемыми приоритетами получают с сервера диспетчеризации очередное задание на обработку, выполняют его, а результаты передают на сервер архивации спутниковых данных, также указанный в задании.

В том случае, когда вычислительные узлы имеют прямой доступ к файлам данных в архивах, например по протоколу NFS, процедура подготовки данных по требуемым ячейкам разбиения может быть выполнена непосредственно на них. Однако архивы спутниковых данных часто являются распределенными, в том числе и территориально, что делает организацию прямого доступа ко всем файлам данных в архиве весьма проблематичной. Более перспективным и гибким вариантом, на наш взгляд, является реализация web-сервисов для подготовки данных по ячейкам разбиений в каждом из центров данных. Ниже приведена схема базового варианта реализации системы обработки по такому принципу.

Серверы обработки спутниковых данных направляют запросы на получение данных по ячейкам разбиения на специальные серверы диспетчеризации запросов, на которых устанавливается сервис, позволяющий оптимально распределять нагрузку по серверам получения данных с учетом их сетевой близости к данным. Полученные на серверах обработки результаты передаются на серверы архивации. На практике могут быть реализованы более сложные схемы организации обработки,

в частности, обеспечивающие кэширование данных по ячейкам разбиения. Выбор конкретной схемы реализации обработки, включая размер ячеек разбиения и размер областей ячеек, обрабатываемых в рамках одного задания, зависит как от специфики обработки, так и от имеющейся аппаратной инфраструктуры.

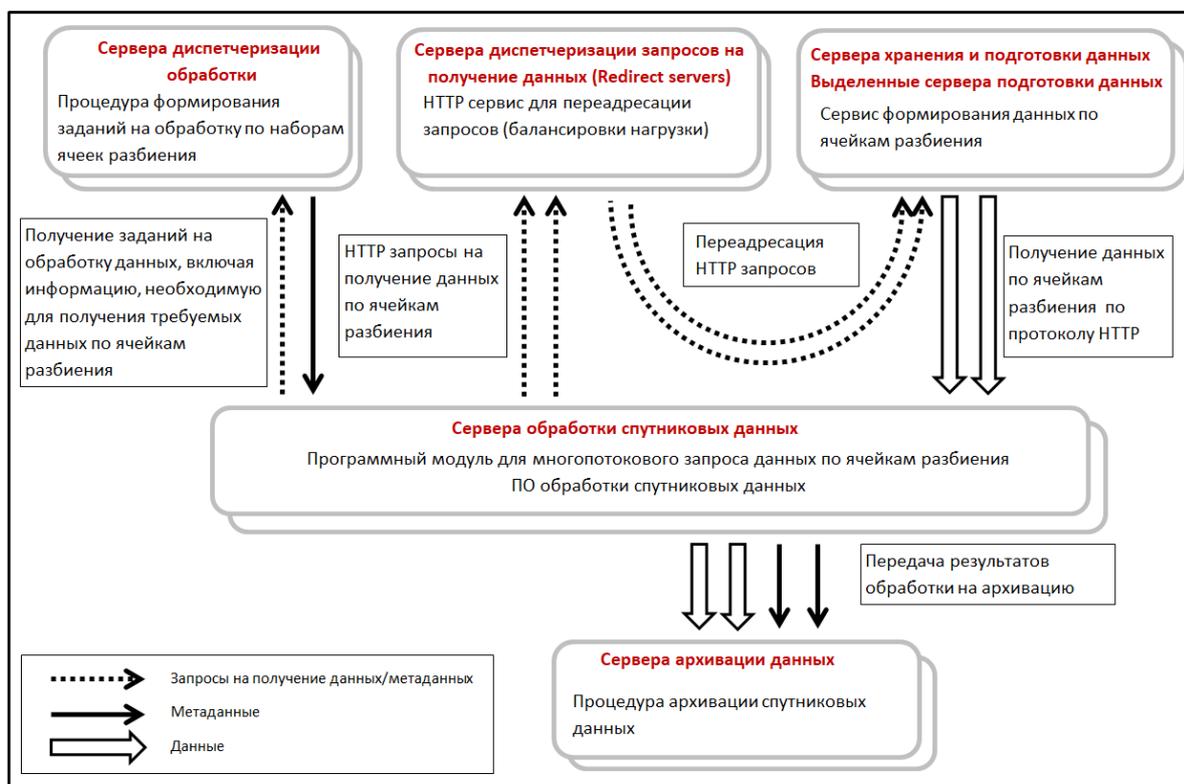


Рисунок. Схема организации обработки данных, получаемых блочным способом

Общие сведения о реализации. Реализация рассматриваемой схемы обработки с использованием блочного доступа к данным базируется на технической и программной инфраструктуре ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [2], построенного на базе технологий, разработанных в ИКИ РАН.

Заключение. Рассматриваемая схема организации обработки применяется нами для получения безоблачных данных по данным прибора КМСС, установленного на российский спутниках серии «Метеор» с использованием данных спутников *Landsat*, *TERRA* и *AQUA*.

Работа выполнена в рамках темы «Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера» (госрегистрация № 0024-2019-0014).

Список литературы

1. Организация автоматизированной многопоточковой обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга / Д.А. Кобец, А.М. Матвеев, А.А. Мазуров, А.А. Прошин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 145–155.
2. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

A.A. Proshin, A.M. Matveev, V. Kashnitskii

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

e-mail: andry@iki.rssi.ru

ORGANIZATION OF DYNAMIC BLOCK ACCESS TO DATA IN ARCHIVES FOR THEIR EFFECTIVE PROCESSING

The article is devoted to the issues of providing block access to heterogeneous data in satellite data archives in order to carry out their efficient distributed processing. The relevance of this approach is considered for organizing the processing of heterogeneous satellite data, and especially for joint processing of various types of satellite data. A variant of the dynamic formation of data by processing cells is proposed, which does not require the transformation of the satellite data archives themselves. The technology developed at the IKI RAN for this purpose is briefly described. In conclusion, an example of the implementation of this technology is given.

Keywords: satellite data processing, satellite data archives, big data.

УДК 528

Д.С. Русин, А.Н. Сафонова

Лаборатория глубокого обучения ДНИИД,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: rusin199812@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Представлено построение архитектуры нейронной сети путем применения различных алгоритмов глобальной оптимизации параметров с использованием библиотеки *Keras*. Предложенная архитектура реализована для решения задачи классификации категорий повреждения дерева по данным дистанционного зондирования Земли. Было проведено сравнения результатов работы архитектуры с двумя искусственно увеличенными наборами данных: один – с предварительной обработкой, другой – с исходным качеством изображения.

Ключевые слова: нейронные сети, методы глобальной оптимизации, дистанционное зондирование Земли, классификация.

Метод. В предыдущей работе [1] была поставлена задача создания модели машинного обучения на основе искусственных нейронных сетей, которая должна автоматически определять наилучшие параметры под каждую задачу индивидуально. Для нахождения данных параметров и обучения тратилось большое количество времени, поэтому было решено разработать архитектуру нейронной сети (НС) с помощью нейросетевой библиотеки *Keras*.

Сам процесс построения архитектуры НС заключается в нахождении количества нейронов на каждом слое. Выбор количество нейронов обусловлен тем, что при большом количестве нейронов модель обычно переобучается [2], поэтому

необходимо получить минимально необходимое количество нейронов. Поиск размерности сети будет осуществляться с помощью генетического алгоритма (ГА). Далее сформированным популяциям присваивались весовые коэффициенты, но не всегда все связи в НС оказывают большое влияние на ошибку предсказания [3], некоторые же, наоборот, эту ошибку усиливают, поэтому их желательно исключить при построении модели. Проблема также заключается в том, что не всегда известно, какие связи являются необходимыми, а какие – нет. После получения размерности сети и ограничения некоторых связей производится подбор весовых коэффициентов. Сначала происходит случайная инициализация весов и далее подбор более эффективных весов с использованием дифференциальной эволюции (ДЭ). Алгоритм ДЭ применяется для того, чтобы во время обучения самой модели снизить риск попадания в локальный минимум функции ошибки обучения. После получения весовых коэффициентов производится локализация ошибки обучения с применением классического метода вычисления градиента обратного распространения ошибки (ОРО). Весь описанный выше подход представлен на рис. 1.

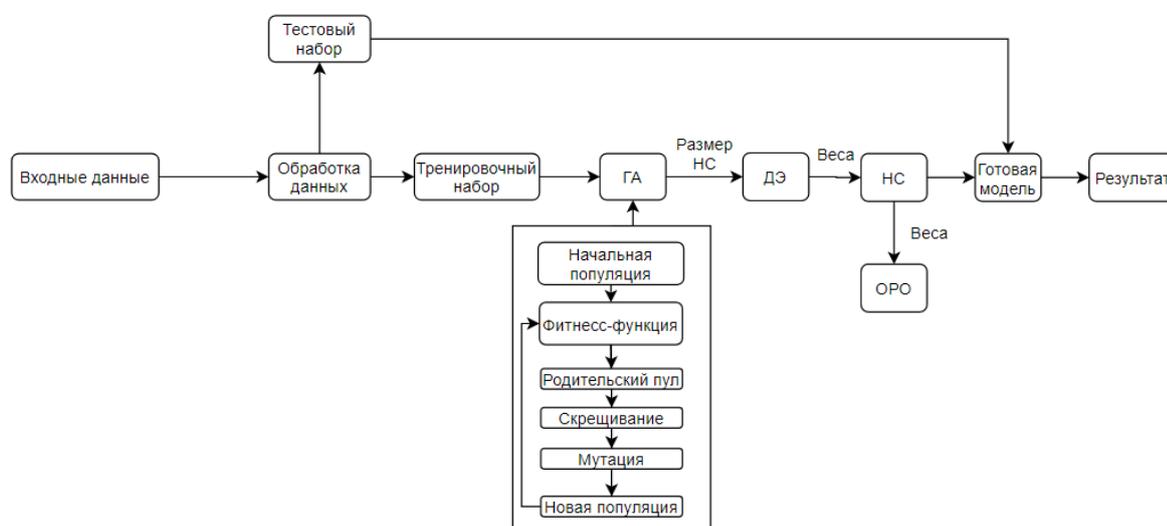


Рис. 1. Алгоритм предложенного подхода

Предложенный подход был использован на задаче классификации категорий повреждения дерева по данным ДЗЗ. Набор данных представляет из себя 400 фотографий, полученных с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Объектом исследования выступают четыре категории повреждения дерева (рис. 2).

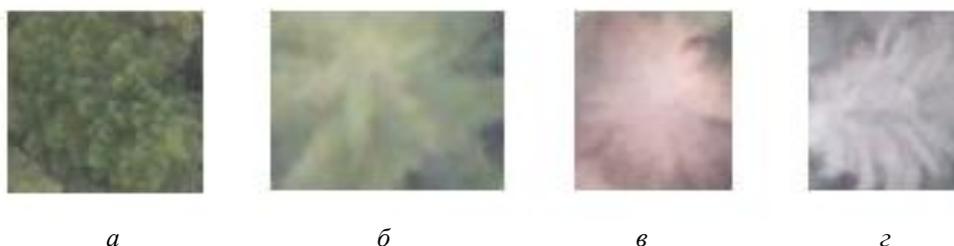


Рис. 2. Категории повреждения дерева: *a* – полностью здоровое дерево или повреждено на 25 %; *б* – поврежденное дерево на 50 %; *в* – умирающее дерево, повреждено на 75 %; *г* – сухостой

Количество данных на каждом классе отображено на рис. 3.

Как видно, выборка является не совсем равномерной, поэтому были использованы популярные функции для искусственного увеличения набора данных (аугмен-

тация). Применение аугментации хорошо показало себя в задаче классификации изображений [4]. Аугментация данных осуществлялась с применением библиотеки *Keras*. Настройки для аугментации представлены в табл. 1.

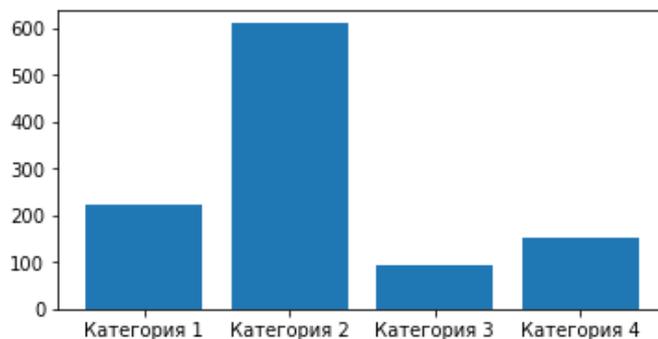


Рис 3. Распределение категорий повреждения дерева

Таблица 1

Функции искусственного преобразования набора данных

Наименование преобразования	Значение
Вращение изображения (rotation_range)	40
Сдвиг по ширине (width_shift_range)	0.2
Сдвиг по высоте (height_shift_range)	0.2
Сдвиг пикселей (shear_range)	0.2
Режим заполнения (fill_mode)	Nearest
Масштабирование (zoom_range)	0.2
Горизонтальное смещение (horizontal_flip)	True
Коэффициент масштабирования (rescale)	1./255
Размер изображения (target_size)	300,300

Таким образом, в результате применения искусственного увеличения набора данных, из одного изображения можно получить 21 изображение (рис. 4).

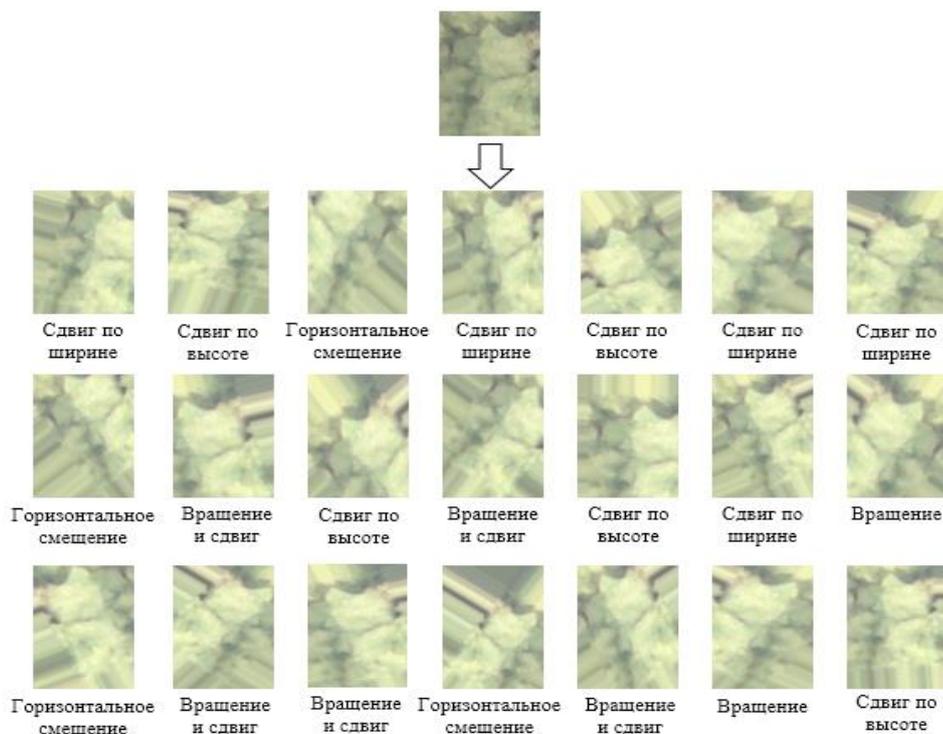


Рис. 4. Искусственное увеличение набора данных изображений на примере 1-й категории повреждения дерева до 25 %

Параметры, при которых происходило обучение архитектуры НС, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Настройка архитектуры НС

Параметры ГА для связей	
Наименование	Значение
Коэффициент мутации	0.1
Популяция	20
Количество итераций	50
Selection size	3
Параметры ГА для кол-ва нейронов	
Коэффициент мутации	0.2
Популяция	100
Количество итераций	200
Количество скрытых слоев	2–5
Минимальное количество нейронов на слое	1
Максимальное количество нейронов на слое	256
Параметры ОРО	
Скорость обучения	0.01
Разделение данных	0.2
Количество итераций	500

Для сравнения результатов был сформирован дополнительный набор данных изображений путем изменения контрастности пикселей (рис. 5).

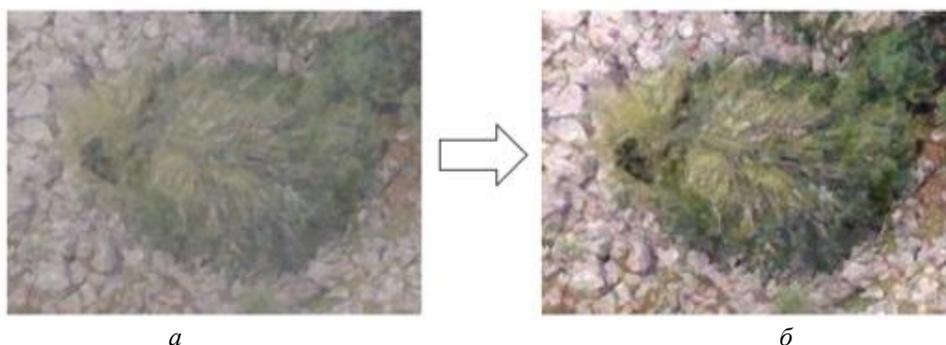


Рис. 5. Результат применения предварительной обработки изображений:
a – исходное изображение; *б* – изображение с повышенной контрастностью пикселей

Для оценки качества модели используется метрика, основанная на матрице ошибок *F*-мера (3), она же представляет из себя баланс между двумя метриками *Precision* (1) и *Recall* (2):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}; \tag{1}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}; \tag{2}$$

$$F_score = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}. \tag{1}$$

Результаты. Обучение архитектуры НС производилось с помощью бесплатной облачной вычислительной машины *Google Colab* [5]. Итоговая архитектура НС, сформированная с помощью эволюционных алгоритмов, представлена на рис. 6.

Основные результаты эксперимента на тестовых данных представлены в табл. 3.

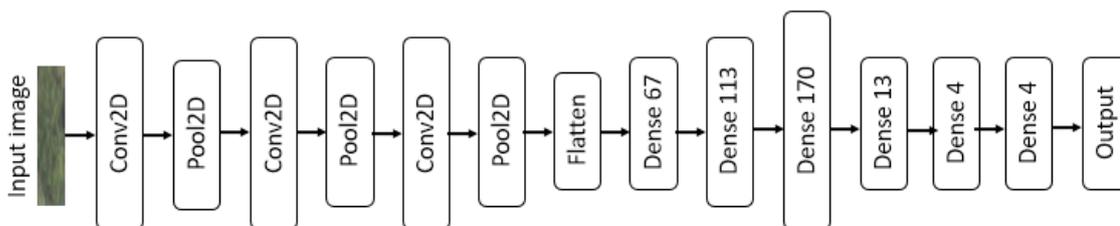


Рис. 6. Архитектура НС

Таблица 3

Результаты работы

Наименование метрики	До предобработки	После обработки
<i>F</i> -мера	0.7038	0.7450
<i>IoU</i>	0.6034	0.6259
Время, затраченное на обучение (1 итерация, мин)	40	

Как видно, эволюционные алгоритмы позволяют строить эффективные модели машинного обучения, но требуют большого количества времени для обучения сети. Также качество модели сильно зависит от качества входных изображений, незначительное увеличение качества повышает точность на 4 %. В дальнейшем планируется автоматизировать процесс настройки алгоритмов для построения архитектуры и реализовать различный подбор функции активации на каждом слое.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00370 «Фундаментальные проблемы повышения информативности обработки данных оптоэлектронных авиакосмических устройств высокого пространственного и спектрального разрешения».

Список литературы

1. Русин Д.С., Сопов Е.А. Гибридный метод обучения нейронной сети на основе дифференциальной эволюции // Решетневские чтения. 2019. № 2. С. 211–213.
2. Нейроинформатика: науч. изд. / А.Н. Горбань [и др.] // Сибирское предприятие РАН. 1998. С. 311–313.
3. Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы // Горячая линия – Телеком 2006. С. 254–255.
4. Google Research, Brain Team / B. Zoph, E.D. Cubuk, G. Ghiasi [et al.] // Learning Data Augmentation Strategies for Object Detection.

D.S. Rusin, A.N. Safonova

Deep Learning Laboratory, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: rusin199812@mail.ru

USING AN EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR CONSTRUCTING NEURAL NETWORKS IN THE PROBLEM OF CLASSIFICATION OF REMOTE SENSING DATA

This paper presents the construction of a neural network architecture by applying various algorithms for global parameter optimization using the Keras library. The proposed architecture is implemented to solve the problem of classifying categories of tree damage according to Earth remote sensing data. A comparison was made of the results of the work of the architecture with two artificially increased data sets: one with pre-processing, the other with the original image quality.

Keywords: neural networks, global optimization methods, remote sensing, classification.

С.А. Рылов

Кандидат технических наук, Федеральный исследовательский центр
информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия
e-mail: RylovS@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Предложен автоматизированный метод выделения водных объектов на мультиспектральных спутниковых изображениях с использованием активного обучения, позволяющий учитывать не только спектральные, но и пространственные характеристики. Классификация осуществляется на уровне заранее сегментированных объектов с помощью специального алгоритма автоматического построения дерева решений. В процессе активного обучения алгоритм интерактивно просит пользователя указать класс для определенных объектов, что позволяет многократно сократить объем обучающей выборки, необходимый для получения качественной классификации. В статье представлены результаты экспериментальных исследований на спутниковых снимках, демонстрирующие эффективность предлагаемого метода.

Ключевые слова: мультиспектральные спутниковые изображения, выделение водной поверхности, активное обучение, классификация, дерево решений, объектная сегментация.

Введение. Мониторинг водных объектов является весьма актуальной задачей [1; 2]. Особенно остро она возникает при наводнениях [3], которые порой способны вызвать катастрофические последствия, например, сильные паводки в Иркутской области летом 2019 г. [4].

Единственным источником объективной и актуальной информации для мониторинга паводковых ситуаций или изменения площадей и береговых линий водных объектов является спутниковая съемка [1; 6]. В настоящее время известные методы автоматизированного выделения водной поверхности [1; 3; 6] по данным оптической спутниковой съемки. Используют спектральные характеристики пикселей: водные индексы (NDWI, MNDWI, AWEI и др.) или деревья решений с заранее заданными порогами. Однако эти методы нередко приводят к ошибкам, относя к воде близкие по спектральным характеристикам классы (сильно увлажненные почвы, тени и некоторые антропогенные объекты) [3]. Кроме того, на снимках высокого пространственного разрешения, а также при отсутствии должной предварительной коррекции, спектральные характеристики водной поверхности и других классов, таких как тени от зданий, могут пересекаться [7], что делает невозможным успешное выделение воды лишь по спектральным признакам [1].

В таких условиях повысить качество выделения водных объектов возможно с помощью привлечения дополнительных признаков [2; 7]: геометрических (форма, размер) и контекстных (взаиморасположение объектов). Использование таких признаков возможно в рамках объектной модели сегментации изображений (OBIA) [8], которая предполагает предварительную сегментацию изображения на однородные объекты с последующим расчетом различных признаков для этих объектов.

Кроме того, в условиях малого объема обучающей выборки (ОВ) повысить ее качество с минимальными затратами возможно с помощью активного обучения [9],

когда алгоритм в процессе классификации может спрашивать у пользователя, к какому классу принадлежит тот или иной элемент данных. В последние годы активное обучение применялось для попиксельной классификации спутниковых изображений, однако его использованию в рамках объектного подхода уделено крайне мало внимания [10].

В данной работе предлагается новый метод автоматизированного выделения водных объектов на мультиспектральных спутниковых изображениях с использованием активного обучения и объектного подхода, позволяющий учитывать не только спектральные, но и пространственные характеристики. Для сочетания разнотипных признаков были разработаны специальный алгоритм классификации типа «дерево решения» и стратегия выбора представителей для активного обучения. Также представлены результаты экспериментальных исследований предлагаемого метода на спутниковых снимках.

Метод выделения водных объектов с использованием активного обучения и объектного подхода. На первом этапе происходит сегментация изображения и автоматическое выделение водных пикселей по спектральным признакам с помощью алгоритма ECCA-Water [6], в основе которого лежит непараметрическая кластеризация. В отличие от других методов, этот алгоритм не допускает типичных ошибок, связанных с сильно увлажненными почвами, тенями от облаков и пр. Однако в случае сложных сцен вместе с водными объектами могут быть выделены и другие, схожие по спектральным характеристикам, объекты.

На втором этапе пиксели, предварительно выделенные как водные по спектральным признакам, разделяются на пространственно связные объекты, для которых рассчитываются спектральные и геометрические признаки. Наши исследования показали, что наиболее удачными признаками являются размер и среднее значение яркости в красном канале.

Затем осуществляется классификация выделенных объектов на «водные» и «неводные» с помощью имеющейся обучающей выборки. В условиях разнотипных признаков предпочтительно использовать алгоритмы классификации, которые рассматривают признаки объектов независимо друг от друга, такие как деревья решений. Однако известные алгоритмы автоматического построения деревьев решений испытывают сложности при применении активного обучения, особенно в случае малого объема ОБ. Поэтому нами был разработан новый алгоритм классификации, который в отличие от методов построения деревьев решений действует «снизу вверх», начиная с минимальных окружающих прямоугольников для элементов ОБ в пространстве признаков с дальнейшим их итеративным расширением.

В случае активного обучения пользователю последовательно предоставляется текущий результат классификации и запрос на задание класса для следующего незамеченного объекта. После того как пользователь задает класс для указанного объекта, классификация происходит заново и процесс повторяется. При этом объект для ручной классификации необходимо выбирать таким образом, чтобы максимально усилить классификатор.

Для этого мы реализовали следующую стратегию: определяются диапазоны возможных сдвигов всех текущих границ классов, из них выбирается наиболее влиятельный вариант (изменение которого может повлечь наибольшие изменения результатов классификации), затем выбирается элемент, ближайший к средневзвешенной середине области сдвига. Процесс заканчивается, если закончились возможные варианты сдвига границ или если пользователь на некотором шаге одобрил результат классификации.

Экспериментальные исследования. Предложенный метод применялся к двум спутниковым снимкам, содержащим сотни объектов, которые по спектральным признакам классифицируются как водные. Первый снимок (рис. 1) получен со спутника «Метеор-М № 2» в период паводковой ситуации 2019 г. в Иркутской области, имеет разрешение 50 м. Из-за плохого качества изображения водная поверхность и часть полей не разделяются по спектральным признакам. На втором снимке со спутника *WorldView-3*, имеющим разрешение 1,4 м, спектральные характеристики водных объектов пересекаются с многочисленными тенями от зданий.

Предложенный метод позволил успешно отделить водоемы от других спектрально-схожих объектов в обоих случаях. Ошибка выделения воды (к общей площади водной поверхности) составила 0,96 % для первого снимка и 0,65 % – для второго.

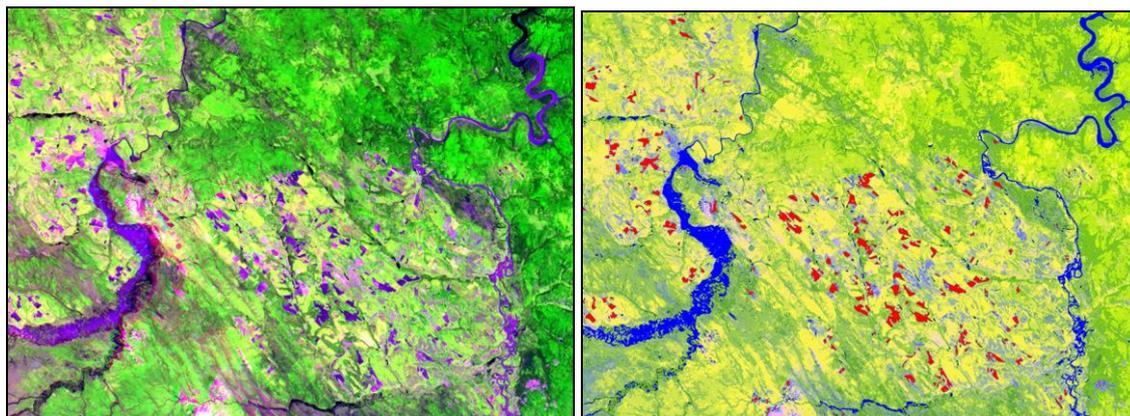


Рис. 1. Спутниковый снимок с КА «Метеор-М» (паводок в г. Тулун, 29.06.2019) и эталонная картосхема (вода выделена синим, поля – красным цветом)

На рис. 2 представлены графики ошибки классификации водных объектов в зависимости от объема обучающей выборки при использовании разработанной стратегии активного обучения и при случайном выборе элементов ОБ (результаты усреднены по 10 запускам). Графики демонстрируют, что с использованием активного обучения алгоритм достигает высокой точности классификации на очень малом объеме ОБ.

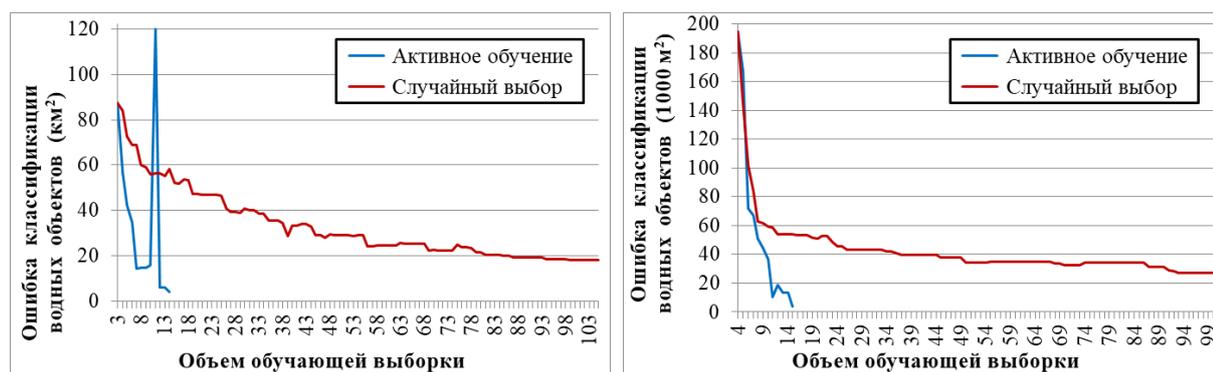


Рис. 2. Графики зависимости ошибки классификации водных объектов от объема обучающей выборки для снимка «Метеор-М» (слева) и *WorldView-3* (справа)

Заключение. В данной работе предложен новый метод выделения водных объектов на мультиспектральных спутниковых изображениях с использованием активного обучения и объектного подхода. Возможность учета геометрических признаков позволяет успешно выделять водную поверхность в тех ситуациях, где ис-

пользование лишь спектральных характеристик оказывается недостаточным. Был разработан алгоритм классификации по типу дерева решений, позволяющий сочетать разнотипные признаки и работать в условиях крайне малого объема ОБ. В рамках этого алгоритма предложена стратегия выбора неразмеченных представителей выборки для процесса активного обучения.

Представлены результаты экспериментальных исследований предложенного метода на спутниковых снимках «Метеор-М» и *WorldView-3*. Сравнение зависимости точности классификации от объема обучающей выборки показало, что применение концепции активного обучения позволяет многократно сократить объем ОБ, необходимый для получения высокой точности классификации. Кроме того, разработанный алгоритм обладает высоким быстродействием, что позволяет проводить обработку изображений в интерактивном режиме.

Таким образом, предложенный метод способен эффективно выделять водные объекты в сложных условиях с минимальными временными затратами со стороны пользователя.

Список литературы

1. Nath R.K., Deb S.K. Water-body area extraction from high resolution satellite images - an introduction, review, and comparison // *IJIP*. 2010. Vol. 3, is. 6. P. 353–372.
2. Combining pixel-and object-based machine learning for identification of water-body types from urban high-resolution remote-sensing imagery / X. Huang, C. Xie, X. Fang, L. Zhang // *IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. Vol. 8, № 5. P. 2097–2110.
3. Антонов В.Н., Новгородцева О.Г. Мониторинг и картографирование паводковой ситуации в Сибирском федеральном округе // *Образовательные ресурсы и технологии*. 2014. № 8. С. 81–86.
4. Спутниковый мониторинг экстремального наводнения в Иркутской области 2019 года / И.А. Соловьева, И.В. Рублев, А.Е. Воронова [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 123.
5. Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // *Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники*. 2017. Т. 20, №. 4. С. 105–108.
6. Технология обработки данных с космических аппаратов «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации / С.А. Рылов, О.Г. Новгородцева, И.А. Пестунов [и др.] // *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. С. 207–212.
7. Рылов С.А., Новгородцева О.Г., Пестунов И.А. Мониторинг паводковой ситуации по спутниковым изображениям высокого разрешения с учетом наличия теней // *Информационные технологии, системы и приборы в АПК: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. «АГРОИНФО-2015»*. Новосибирск, 2015. С. 434–439.
8. Hossain M.D., Chen D. Segmentation for object-based image analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective // *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. Vol. 150. P. 115–134.
9. Tuia D., Volpi M., Copa L., Kanevski M., Munoz-Mari J. A survey of active learning algorithms for supervised remote sensing image classification // *IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing*. 2011. Vol. 5, is. 3. P. 606–617.
10. Ma L., Fu T., Li M. Active learning for object-based image classification using predefined training objects // *IJRS*. 2018. Vol. 39, is. 9. P. 2746–2765.

S.A. Rylov

Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russia
e-mail: RylovS@mail.ru

ACTIVE LEARNING FOR WATER EXTRACTION ON MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES

We propose a new method for water bodies extraction on multispectral satellite images using active learning. In addition to spectral features spatial features are also utilized. Classification is performed at object level using a new algorithm for decision tree automatic construction. During active learning process the algorithm interactively asks user to specify a class for certain objects. This approach leads to substantial training sample amount reduction and classification accuracy increase. The experimental studies on satellite images demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: multispectral satellite images, water extraction, active learning, classification, decision tree, object-based segmentation.

УДК 004.627

А.Ж. Сарина

Кандидат технических наук, PhD, Торайгыров университет,
Павлодар, Республика Казахстан
e-mail: assiya_prog@mail.ru

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПРИМЕНИМЫХ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Работа посвящена описанию методики построения разработки алгоритмов сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений (АИ) аппаратной реализации с целью последующего применения в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве алгоритмов сжатия, необходимого для сокращения объема передаваемой информации, предлагается использование разработанных методов сжатия на основе разностных и дискретных преобразований. Рассмотрена методика разработки алгоритмов сжатия, с учетом которой создан адаптивный алгоритм для сжатия гиперспектральных АИ использованием программируемых устройств. Проведенные исследования показали, что предложенные алгоритмы имеют эффективность, достаточную для использования, и могут быть применены на борту космических аппаратов (КА) при передаче гиперспектральных данных ДЗЗ в условиях ограниченной емкости буферной памяти и пропускной способности канала связи.

Ключевые слова: алгоритмы сжатия, гиперспектральные изображения, космические аппараты, степень сжатия, адаптивный алгоритм, микроконтроллер.

Постановка задачи. Гиперспектральные АИ ДЗЗ важны для наблюдения и исследований изменений поверхности Земли, мониторинга природных ресурсов и последствий чрезвычайных ситуаций и т.д. В настоящее время разработка

программных систем передачи таких является актуальной задачей. В решении данной задачи существуют два направления исследования: разработка алгоритмов сжатия, используемых в наземных центрах приема и обработки данных ДЗЗ; применяемых на борту КА. Активно ведутся исследования в области разработки алгоритмов сжатия первого направления, при которых имеются множество публикаций [1–10]. Во втором направлении исследования имеется потенциал для разработки алгоритмов, диктуемый необходимым перечнем проблем для решения задачи сжатия.

Предлагается сформулировать некоторые проблемы разработки алгоритмов сжатия гиперспектральных АИ, применимых на борту.

- *Объем поступающих данных.* Гиперспектральные АИ имеют диапазон в несколько сотен и тысяч спектральных каналов. При этом размер каналов достигает сотни тысяч пикселей.
- *Ресурсы памяти.* Технические характеристики аппаратного обеспечения, которое принимает, хранит и передает такие данные, ограничены в объеме памяти и вычислительной мощности.
- *Передача данных.* Огромные объемы формируются на борту КА с определенной скоростью, превышающей возможности передаваемого канала связи, имеющего фиксированную пропускную способность, недостаточную для передачи несжатых гиперспектральных АИ.
- *Качество данных.* Требования к качеству данных очень высокие, так как поступающая информация уникальна.

Использование сжатия в таких условиях невозможно. Перечисленные выше проблемы, возникающие при разработке программных систем, применимых на борту КА, порождают следующий спектр требований к алгоритму сжатия:

- скорость формирования потока сжатых данных;
- низкая вычислительная сложность;
- высокий коэффициент сжатия;
- контроль ошибок при сжатии с потерями.

В настоящий момент существуют и используются для сжатия гиперспектральных АИ известные алгоритмы на основе усеченного блочного кодирования [1], дифференциально-импульсной модуляции [1], дискретно-косинусного преобразования [2], дискретное вейвлет-преобразование [2]. Данные алгоритмы на борту КА, требующие больших вычислительных ресурсов, не всегда удовлетворяют вышеперечисленным требованиям к сжатию. Поэтому необходима разработка новых методов сжатия гиперспектральных АИ, не уступающих по своей эффективности известным методам, но требующих меньших вычислительных ресурсов.

Таким образом, в данной работе предлагается рассмотреть методику разработки алгоритмов сжатия гиперспектральных АИ, удовлетворяющих указанным требованиям.

Описание методики разработки алгоритмов сжатия. Методику построения разработки алгоритма аппаратной реализации сжатия следует разделить на три этапа.

Первым этапом является выбор и обоснование аппаратного и программного обеспечения для сжатия гиперспектральных АИ.

Вторым этапом является разработка алгоритмов сжатия без потерь и с потерями на программируемых интегральных схемах.

Третий этап – тестирование и проведение экспериментов разработанных алгоритмов в сравнении с известными алгоритмами по производительности скорости и эффективности в степени сжатия.

Имеются два программных продукта, которые реализуют функциональность для выполнения прошивки без использования среды разработки: *STM32 ST-LINK Utility* и *ST Visual Programmer*.

Эксперименты разработанных алгоритмов аппаратной реализации. Для определения эффективности предлагаемого адаптивного алгоритма с точки зрения степени сжатия и вычислительной эффективности, а также пределов его применимости проведен ряд экспериментов на гиперспектральных АИ (система ДЗЗ *Aviris*), (рисунок).

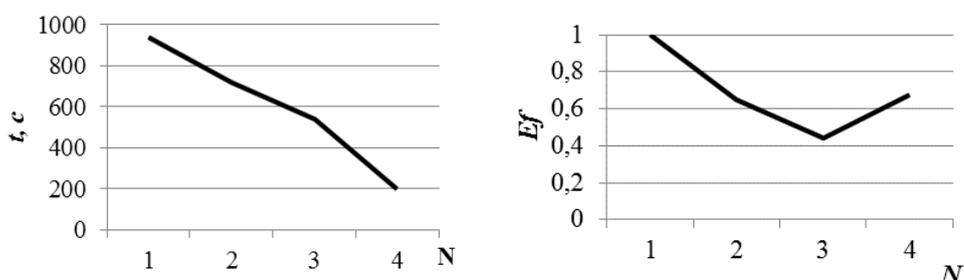


Рисунок. Адаптированный алгоритм сжатия гиперспектральных АИ:
 a – время вычисления; b – эффективность выполнения

Эксперименты выполнены на ПЭВМ с процессором *IntelCore i5 2,5 ГГц* и объемом оперативной памяти 4 Гб под управлением операционной системы *Windows 8.1*.

В качестве аналогов взяты алгоритмы сжатия *JPEG Lossless/Lossy*, архиватор *7Z*, *Winrar*. Результаты экспериментов сжатия предложенной методикой представлены в табл. 1, 2. Для сравнения взяты усредненные по всем экспериментам показатели степени сжатия и скорость обработки.

Таблица 1

Сравнение алгоритмов сжатия без потерь

Алгоритм сжатия	Коэффициент сжатия	Время вычисления, с
JPEG Lossless	3,5	221 452
7z	3,8	205 146
Winrar	3,9	220 738
Адаптивный алгоритм	5,9	74 816

Эксперименты проводились на ПЭВМ с процессором *IntelCore i5 2,5 ГГц* и объемом оперативной памяти 4 Гб под управлением операционной системы *Windows 8.1*.

Таблица 2

Сравнение алгоритмов сжатия с потерями

Алгоритм сжатия	Коэффициент сжатия	Время вычисления, с
JPEG Lossy	5,7	225 672
Адаптивный алгоритм	9,2	78 235

Следует отметить, что в данных экспериментах адаптивный алгоритм показывает результаты по степени сжатия выше по сравнению с известными решениями более чем на 55 %, в скорости обработки существенно превосходит в три раза.

Заключение. По результатам исследования показано, что предложенная методика разработки алгоритмов сжатия без потерь и с потерями на основе аппаратной реализации обладает высокой эффективностью в степени сжатия и скорости обработки. Это объясняется тем, что для такой реализации алгоритмы были адаптированы с целью возможности применения на борту КА. Данная методика построения алгоритмов обладает высоким быстродействием за счет перехода на оборудование,

оперирующее битами, обеспечивая увеличение быстродействия в разы. Адаптивные алгоритмы могут быть использованы как в системах ДЗЗ, так и в любых других приложениях обработки и сжатия гиперспектральных АИ.

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. С. 55–67.
2. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Цифровая обработка аэрокосмических изображений // Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. 278 с.
3. Гашников М.В., Глумов Н.И. Бортовая обработка гиперспектральных данных в системах дистанционного зондирования Земли на основе иерархической компрессии // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 4. С. 543–551.
4. Петров Е.П., Харина Н.Л., Сухих П.Н. Метод сжатия многозарядных спутниковых снимков без потерь // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 203–210.
5. Fernando García-Vilchez, Jordi Muñoz-Marí, Maciel Zortea, Ian Blanes, Vicente González-Ruiz, Gustavo Camps-Valls, Antonio Plaza. On the Impact of Lossy Compression on Hyperspectral Image Classification and Unmixing. IEEE Geoscience and remote sensing letters, VOL. 8, № 2, 2011.
6. Meena B. Vallakati, Dr. R.R. Sedamkar. Low complexity DCT-based DSC approach for hyperspectral image compression with arithmetic code // IJCSI International J. of Computer Science Issues, Vol. 9, is. 5, № 1, September 2012.
7. Yongjian Nian, Mi He, Jianwei Wan. Low-Complexity Compression Algorithm for Hyperspectral Images Based on Distributed Source Coding. Hindawi Publishing Corporation. Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2013, Article ID 825673, 7 p.
8. Ganeshraj P., Sivasankar A. Scalable compression method for hyperspectral images // Research J. of Engineering Science. 2013. Vol. 2(3). P. 1–5.
9. Diego Valsesia, Enrico Magli. A novel rate control algorithm for onboard predictive coding of multispectral and hyperspectral images. 2014.
10. Analysis of lossy hyperspectral image compression techniques / Dr. S.M. Ramesh, P. Bharat, J. Anand, J. Anbu Selvan // International J. of Computer Science and Mobile Computing, Vol. 3, is. 2, February – 2014. P. 302–307.

A.Zh. Sarinova

Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

e-mail: assiya_prog@mail.ru

METHODOLOGY FOR DEVELOPING ALGORITHMS FOR COMPRESSING HYPERSPECTRAL AEROSPACE IMAGES APPLIED ON BOARD SPACE VEHICLES

The work is devoted to the description of the methodology for constructing the development of compression algorithms for hyperspectral aerospace images (AI) hardware implementation for the purpose of subsequent application in Earth remote sensing systems (ERS). As the compression algorithms required to reduce the amount of transmitted information, it is proposed to use the developed compression methods based on difference and discrete transformations. The paper considers a method of developing compression algorithms, taking into account which an adaptive algorithm for compressing hyperspectral AI using programmable devices has been developed. The studies have shown that the proposed algorithms have an efficiency sufficient for use and can be applied on board spacecraft (SC) when transmitting hyperspectral ERS data in conditions of limited buffer memory capacity and communication channel bandwidth.

Keywords: compression algorithms, hyperspectral images, spacecraft, compression ratio, adaptive algorithm, microcontroller.

А.В. Сенин

Институт космических и информационных технологий,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: shurik.19.12.1996@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

Рассмотрены проблемы и возможности применения данных ДЗЗ для инженерно-экологических изысканий (ИЭИ). Проанализированы типы данных ДЗЗ и средства их обработки, которые целесообразно использовать для выполнения работ по ИЭИ, особо выделены применимые к большинству объектов изысканий классы данных ДЗЗ и программные средства. Реализован частный случай обработки данных для конкретной территории, проанализированы полученные результаты, определены пути повышения качества результатов.

Ключевые слова: инженерные изыскания, экология, дистанционное зондирование, геоинформационные системы.

Введение. Инженерные изыскания являются одним из главных этапов строительства. Важнейшим видом инженерных изысканий являются инженерно-экологические изыскания (ИЭИ). Данные работы необходимы для оценки характеристик экологических компонентов окружающей среды в районе объекта изысканий. Работы в рамках ИЭИ включают создание картографических материалов, процесс формирования которых можно ускорить и простить с помощью данных ДЗЗ и процессов их обработки.

Юридические проблемы применения данных ДЗЗ для ИЭИ. Проблемой применения ДЗЗ в процессе ИЭИ является строгое регулирование процесса нормативными документами. ИЭИ регламентированы тремя основными документами: СП-11-102-97, в котором упоминается, что «в практике инженерно-экологических изысканий наиболее широко используются фото и сканерные съемки. Остальные виды съемок рассматриваются как вспомогательные для решения узкого круга специальных задач». Также упоминается, что в состав работ входит экологическое дешифрирование аэрокосмических материалов [1]. СП 47.13330.2012, в котором озвучивается экологическое дешифрирование авиационных и космических снимков как один из видов работ по ИЭИ [2]. СП 47.13330.2016, в тексте которого обозначено, что в состав ИЭИ входит «дешифрирование аэрокосмических материалов с использованием различных видов съемок (черно-белой, многозональной, радиолокационной, тепловой)». Также сказано, что для установления экологической ситуации следует использовать различные фондовые материалы, в том числе материалы ДЗЗ [3]. Соответственно, нормативная документация не запрещает применять данные ДЗЗ для ИЭИ.

Проблемы, связанные с программным обеспечением, выбором исходных данных и доступом к ним. В публикации «Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений» [4] описывается спектр применения данных ДЗЗ для ИЭИ, однако проблема доступа к данным и программного обеспечения не поднимается.

Основными картографическими материалами ИЭИ являются карты современного экологического состояния, фактического материала, почвенные и ландшафтные карты [1–3]. На практике карты составляют путем синтеза топографической съемки, цифровых (публичных) карт и результатов полевых и лабораторных работ. Картографическое изображение принято строить с помощью ПО *AutoCAD*, которое неприменимо для обработки данных дистанционного зондирования. Существует множество различных программных пакетов для обработки данных ДЗЗ, таких как *Erdas Imagine*, *ArcGIS*, *PHOTOMOD* и др. Однако доступ к ним ограничен. Программный пакет *QGIS* является общедоступной системой управления ГИС, для которой поддерживаются модули обработки данных ДЗЗ, реализована возможность конвертации результатов в формат *dwg* (стандартный формат САПР *AutoCAD*).

В исследованиях земной поверхности широкое применение и информативность имеют мультиспектральные данные ДЗЗ. Наиболее распространенными из них являются снимки космической системы *Landsat*. Самым современным спутником этой группы является *Landsat-8*, данные с которого применяются при оценке антропогенного преобразования территорий [5]. Несмотря на множество достоинств данных этой системы, они обладают недостатками, которые снижают возможность применения для ИЭИ. Наиболее весомый недостаток – это низкое пространственное разрешение, которое составляет 15 м для панхроматического канала и 30 м для остальных [6]. Такое пространственное разрешение не позволяет распознавать на снимках отдельно стоящие строения и контуры небольших скоплений растительности. Большинство объектов ИЭИ имеют небольшую площадь, и для их картирования необходимы данные с пространственным разрешением не менее 5 м. Мультиспектральные данные такого высокого разрешения в большинстве случаев являются ценными и труднодоступными. При проектировании оросительных систем используются картографические web-приложения [7], их можно применить и при инженерных изысканиях. Такие web-приложения, как «Яндекс карты» и *Google Maps* несут в себе данные высокого пространственного разрешения. «Яндекс» для своих картографических приложений использует снимки таких съемочных систем, как *Ikonos*, *QuickBird*, *WorldView-2* и *IRS* [8]. *Google* использует данные с различных съемочных систем [9].

ПО «SAS планета» позволяет извлекать данные ДЗЗ из «Яндекс карт», *Google maps* и некоторых других, при этом результат извлечения сохраняет максимальное пространственное разрешение [10].

Реализация частного случая обработки данных ДЗЗ для построения ландшафтной карты. Рассмотрим результат неконтролируемой классификации фрагмента снимка «Яндекс». Классификация выполнялась с помощью программного пакета *QGIS* и дополнительного общедоступного модуля *Semi-Automatic Classification Plugin*. Фрагмент местности был выбран, поскольку для него имеется ландшафтная карта (рис. 1, а), выполненная по результатам полевых работ. Результат классификации отображен на рис. 1, б.

Точность полученных результатов не позволяет непосредственно использовать их в качестве прототипа ландшафтной карты, так как она не соответствует требованиям, предъявляемым к качеству ландшафтных карт в рамках ИЭИ. Однако сам подход к формированию ландшафтных карт на основе обработки данных ДЗЗ, безусловно, имеет перспективы. В дальнейшем предполагается развивать полученные результаты путем применения более точных методов автоматизированной обработки [11], а также совместного использования данных различных спутниковых систем, имеющих в открытом доступе.

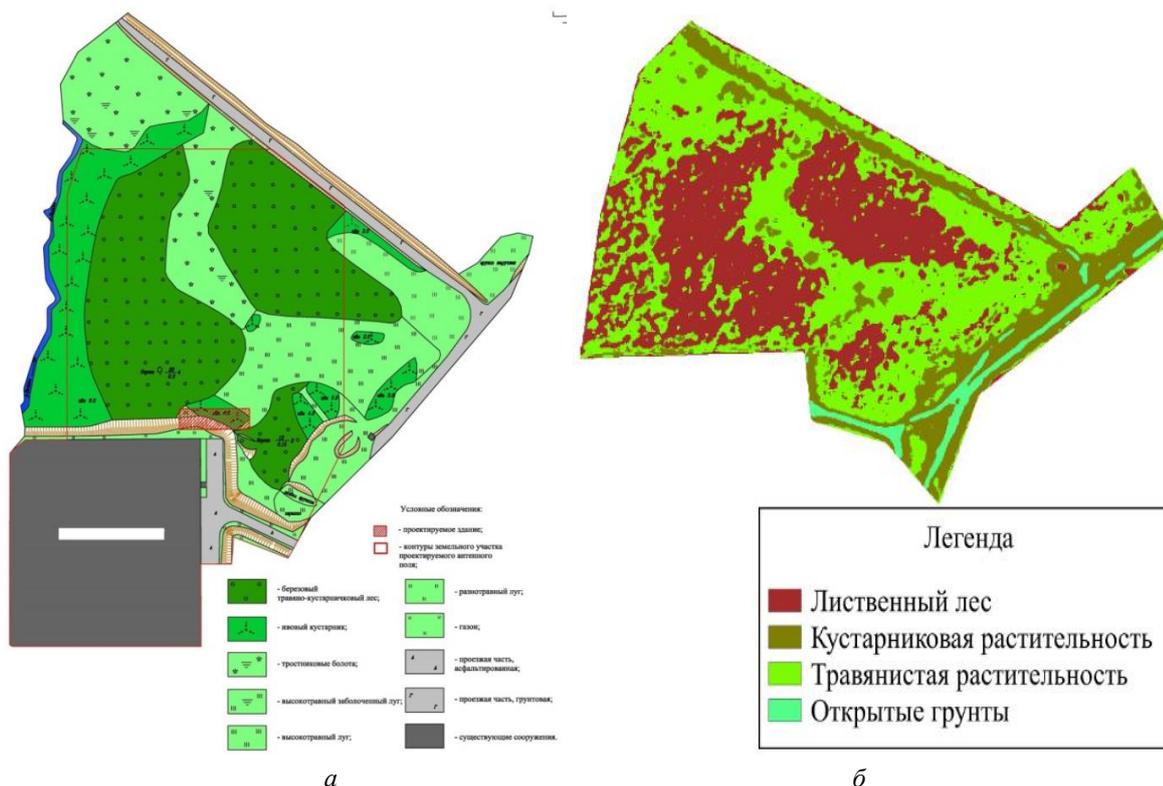


Рисунок. Сравнение результата классификации с эталоном

Кроме того, точность оконтуривания может быть повышена операторскими методами; конечный результат подлежит верификации путем организации наземных измерений, что определяется требованиями действующих нормативных документов [1–3].

Список литературы

- СП-11-102–97. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Введ. 15.08.1997. М.: ПНИИИС Госстроя России, 1997. 38 с.
- СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. Введ. 01.07.2013. М.: Минрегион России, 2013. 115 с.
- СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. Введ. 01.07.2017. М.: Стандартинформ, 2017. 90 с.
- Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений / А.Г. Гендрин, Г.А. Надоховская, Т.Н. Сидоренко [и др.] // Гос. публич. науч.-техн. библиотека СО РАН. Новосибирск, 2005. № 78. С. 1–112.
- Занозин В.В., Бармин А.Н., Валов М.В. Применение ГИС и данных ДЗЗ для оценки антропогенного преобразования территории // Северо-Восточ. федер. ун-т им. М.К. Аммосова. Якутск, 2019. № 2. С. 74–84.
- Сайт американской геологической службы USGS. URL: <https://www.usgs.gov>.
- Ломакин С.В. Использование картографических web-сервисов на стадии предварительного проектирования оросительных систем // Модели и технологии природообустройства / Воронеж. гос. аграр. ун-т им. Императора Петра I. Воронеж, 2019. № 2. С. 114–118.
- Яндекс: сайт. URL: <https://yandex.ru>.
- Google: сайт. URL: <https://about.google/intl/ru>.
- SAS Планета: офиц. сайт. URL: <http://www.sasgis.org>.
- Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2013. 560 с.

A.V. Senin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: shurik.19.12.1996@mail.ru

PROSPECTS AND PROBLEMS OF THE USE OF REMOTE SENSING DATA IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING SURVEYS

The problems and possibilities of using ERS data for engineering and environmental surveys are considered. The types of ERS data and their processing tools that are appropriate for performing engineering and environmental surveys are analyzed, and the classes of ERS data and software tools that are applicable to most survey objects are highlighted. A special case of data processing for a specific territory is implemented, the results obtained are analyzed, and ways to improve the quality of results are determined.

Keywords: engineering surveys, ecology, remote sensing, geoinformation systems.

УДК 004.93

Ю.Н. Синявский, С.А. Рылов, И.А. Пестунов

Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

e-mail: yorikmail@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Работа посвящена экспериментальному сравнению 12 непараметрических алгоритмов автоматической классификации, позволяющих выполнять сегментацию изображений. Для сравнения выбраны алгоритмы, разработанные в лаборатории обработки данных ФИЦ ИВТ, а также алгоритмы, включенные в пакеты ENVI, ELKI и *Smile*. Для оценки точности кластеризации сгенерировано семь модельных наборов данных. Оценка вычислительной эффективности выполнена с использованием цифровых фотографий и мультиспектральных изображений, полученных со спутника *WorldView-2*.

Ключевые слова: непараметрические алгоритмы кластеризации, сегментация мультиспектральных изображений, экспериментальное сравнение.

Введение. Решение целого ряда прикладных задач неразрывно связано с сегментацией цифровых изображений. Это могут быть как мультиспектральные снимки, полученные со спутников, самолетов или беспилотных летательных аппаратов, так и обычные цифровые фотографии (например, данные медицинских обследований). Сегментация преследует две основных цели – разбиение изображения на части, удобные для дальнейшего анализа, и группировка пикселей в более высокоуровневые и информативные структуры [1]. Одним из наиболее распространенных подходов к сегментации изображений является использование алгоритмов кластеризации данных [2]. При этом априорные сведения о вероятностных характери-

ках классов, а также обучающие выборки, как правило, отсутствуют. В этих условиях наиболее подходящими являются непараметрические алгоритмы, которые не накладывают жестких ограничений на функцию плотности распределения и позволяют выделять кластеры сложной структуры [3]. Однако они не получили распространения на практике из-за свойственной им высокой вычислительной трудоемкости. Применение сеточного подхода, при котором пространство признаков разделяется на конечное число ячеек, позволяет добиться высокой вычислительной эффективности, но при этом точность выделения кластеров сильно зависит от сеточной структуры [4]. В лаборатории обработки данных ФИЦ ИВТ разработаны эффективные плотностные и сеточные алгоритмы для сегментации мультиспектральных изображений. В данной работе выполнено экспериментальное сравнение разработанных алгоритмов с шестью наиболее эффективными непараметрическими алгоритмами, реализованными в пакетах программ ENVI, ELKI и *Smile*.

Алгоритмы и данные. Шесть алгоритмов были разработаны в лаборатории обработки данных ФИЦ ИВТ [5–10]. Для сравнения были выбраны непараметрические алгоритмы k -средних [11] и ISODATA [11], которые включены во многие пакеты для обработки спутниковых изображений и поэтому часто используются при решении практических задач. В экспериментах использованы программные реализации алгоритмов из пакета ENVI [12]. Количество итераций было ограничено 10. Центры кластеров, полученные на предыдущей итерации, использовались для инициализации следующей, что позволило получить качественные результаты. Кроме того, в экспериментах использованы программные реализации наиболее эффективных плотностных алгоритмов DBSCAN [13], OPTICS [14] и DENCLUE [15], включенные в пакеты для анализа данных ELKI [16] и *Smile* [17]. В дополнение к этому, авторами была выполнена параллельная реализация эффективного (в плане качества) итеративного плотностного алгоритма *MeanShift* [18]. Количество итераций «среднего сдвига» в экспериментах было ограничено десятью.

Для сравнения алгоритмов использовались семь модельных наборов данных (рис. 1) и восемь тестовых изображений – пять цифровых фотографий (рис. 2) и три фрагмента мультиспектральных снимков, полученных со спутника *WorldView-2* (рис. 3). Указанные данные доступны по ссылке [19]. Обработка цифровых фотографий выполнялась по трем каналам (красный, зеленый и синий), а спутниковых изображений – по четырем (красный, зеленый, синий и ближний инфракрасный). Вычисления производились на ПЭВМ с процессором *Intel Core I7* (2.3 ГГц, 4 ядра, 8 потоков) и 8 Гб оперативной памяти.

Экспериментальное исследование. В первом эксперименте оценивалась точность кластеризации в соответствии со следующим определением. Пусть для набора данных $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ известно эталонное разбиение g^* на классы $\{G_0^*, \dots, G_M^*\}$. Тогда для произвольного разбиения (кластеризации) g на кластеры $\{G_0, \dots, G_K\}$ установим соответствие $\gamma(G): \{G_0^*, \dots, G_M^*\} \rightarrow \{G_0, \dots, G_K, \emptyset\}$, при котором выполняется $\forall (G \neq \bar{G}): \gamma(G) = \gamma(\bar{G}) \Leftrightarrow \gamma(G) = \emptyset$ и достигается наибольшее значение выражения

$$n_\gamma = \sum_{i=1}^M [|G_i^* \cap \gamma(G_i^*)| \cdot I(\gamma(G_i^*) \neq \emptyset)],$$

где $I(\cdot)$ – характеристическая функция. Тогда точность кластеризации (*acc*) определяется по следующей формуле:

$$acc = \frac{n_\gamma}{N} * 100\%.$$

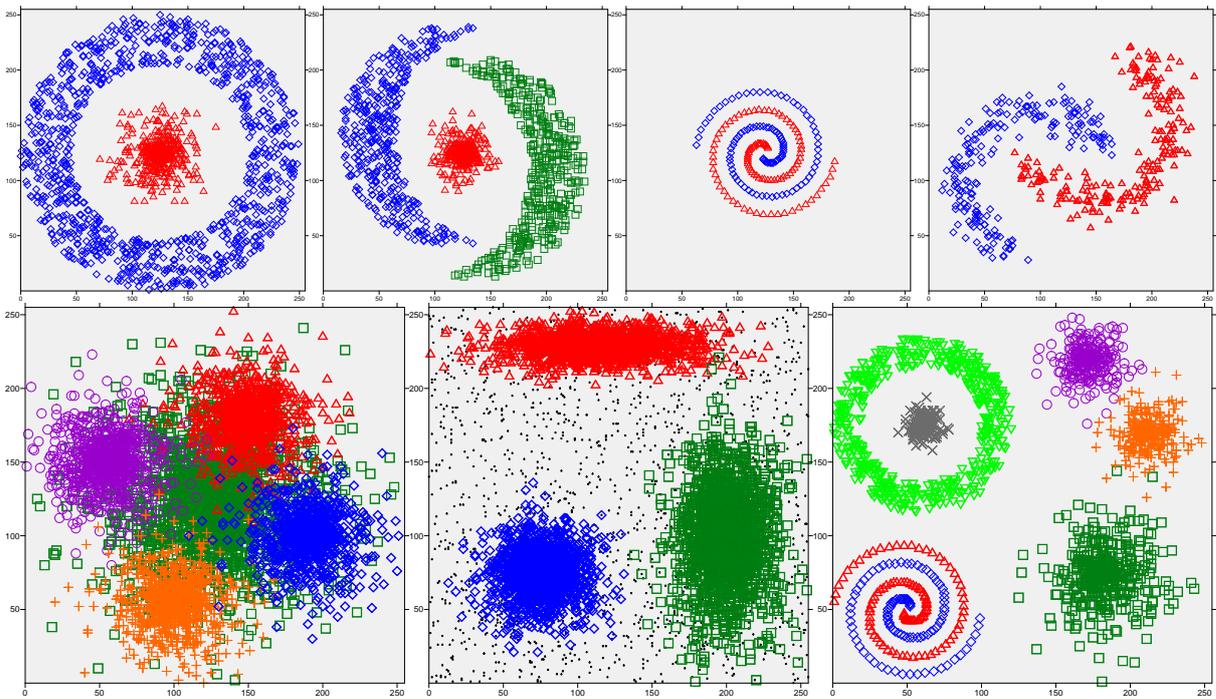


Рис. 1. Модельные наборы данных 1–7
(эталонные разбиения, черными точками отмечен «шум»)



Рис. 2. Тестовые изображения 1–5 (цифровые фотографии).
Размер изображений составляет 0.3, 1, 2.2, 5 и 13.8 млн пикселей соответственно



Рис. 3. Тестовые изображения 6–8 (фрагменты снимков, полученных со спутника WorldView-2).
Размер изображений составляет 4.2, 9 и 12 млн пикселей соответственно

При настройке параметров алгоритмов преследовалась цель получения максимальной точности кластеризации. Некоторые алгоритмы не позволяют выделить «шум» в отдельный кластер, поэтому при вычислении значения *acc* для модельного набора данных *b* точность выделения «шума» не учитывалась. Полученные значения точности и время обработки для модельных наборов данных представлены в табл. 1. При обработке первых трех модельных наборов данных все алгоритмы, кроме DENCLUE, *k*-средних и *MeanShift*, удалось настроить для получения эталонного разбиения. При обработке модельного набора данных 4 алгоритмами *MeanSC*

и *EMeanSC* допущено по одной ошибке. Немного менее точный результат продемонстрировали алгоритмы DBSCAN и OPTICS. Модельный набор данных 5 вызвал трудности у алгоритмов DBSCAN и OPTICS, остальные алгоритмы позволили получить точность кластеризации порядка 85 %. Ошибки при разбиении этого набора данных связаны со значительным пересечением классов модели. Модельный набор данных 6 содержит «шум», который алгоритмы *MeanShift*, *k*-средних и DENCLUE корректно выделить не позволяют, поэтому при вычислении значения *acc* точность выделения «шума» не учитывалась. Остальные алгоритмы не позволили достичь точности выше 80 %. При обработке модельного набора данных 7 только алгоритмы, разработанные в ФИЦ ИВТ, позволили корректно выделить все классы модели, а алгоритмы DBSCAN, OPTICS, DENCLUE и *k*-средних позволили достаточно точно выделить только нормально распределённые классы. Результаты эксперимента демонстрируют, что только алгоритмы, разработанные в ФИЦ ИВТ, позволяют выполнить корректно классифицировать все модельные наборы данных.

Таблица 1

Точность кластеризации (*acc*)
и время обработки модельных наборов данных

Алгоритм	Модельный набор данных						
	1	2	3	4	5	6	7
HCA_MS [5; 6]	100 % 0,378 с	100 % 0,001 с	100 % 0,002 с	100 % 0,001 с	83,13 % 0,003 с	84,43 % 0,004 с	93,26 % 0,001 с
ECCA [7]	100 % 0,003 с	100 % 0,005 с	100 % 0,003 с	100 % 0,003 с	84,83 % 0,001 с	85,65 % 0,028 с	98 % 0,013 с
ССАЕ [7]	100 % 0,386 с	100 % 0,011 с	100 % 0,003 с	100 % 0,008 с	84,83 % 0,002 с	85,65 % 0,15 с	98 % 0,019 с
HECA_MS [8]	100 % 0,006 с	100 % 0,008 с	100 % 0,004 с	100 % 0,003 с	85 % 0,006 с	86,57 % 0,03 с	93,26 % 0,021 с
MeanSC [9]	100 % 0,002 с	100 % 0,005 с	100 % 0,004 с	99,75 % 0,002 с	86,7 % 0,01 с	89,18 % 0,014 с	98,6 % 0,017 с
EMeanSC [10]	100 % 0,018 с	100 % 0,017 с	100 % 0,007 с	99,75 % 0,007 с	86,7 % 0,13 с	89,16 % 0,19 с	98,7 % 0,17 с
MeanShift [18]	51,79 % 0,034 с	90,36 % 0,019 с	50 % 0,003 с	53,75 % 0,005 с	86 % 0,321 с	79,53 % 0,259 с	79,1 % 0,017 с
<i>k</i> -средних [11]	47,79 % 0,016 с	64,73 % 0,015 с	53 % 0,015 с	47,75 % 0,016 с	84,67 % 0,016 с	79,92 % 0,085 с	78,99 % 0,017 с
DBSCAN [13]	100 % 0,031 с	100 % 0,016 с	100 % 0,016 с	99 % 0,016 с	65,2 % 0,374 с	84,56 % 1,17 с	90,63 % 0,031 с
OPTICS [14]	100 % 0,09 с	100 % 0,074 с	100 % 0,048 с	99 % 0,065 с	65,2 % 1,131 с	84,56 % 2,461 с	90,63 % 0,14 с
DENCLUE [15]	65,14 % 0,178 с	99,36 % 0,09 с	50 % 0,06 с	50,5 % 0,14 с	85,9 % 0,184 с	79,92 % 3,26 с	83,8 % 0,721 с

Во втором эксперименте выполнялось сравнение времени работы рассматриваемых алгоритмов при анализе тестовых изображений (табл. 2). Прочерки в таблице соответствуют неприемлемо высокому времени обработки (более 18 часов). Анализ результатов эксперимента показывает, что алгоритмы, включённые в пакеты ELKI и *Smile*, не позволяют оперативно обрабатывать изображения высокого разрешения. Кроме того, время их работы значительно увеличивается с ростом числа каналов. Алгоритмы из пакета ENVI лучше адаптированы к анализу изображений, однако время обработки изображений размером более 9 млн пикселей превышает 5 мин. Алгоритмы, разработанные в ФИЦ ИВТ, позволяют выполнять сегментацию мультиспектральных изображений большого размера в диалоговом режиме.

Результаты обработки тестовых изображений (время в секундах)

Изображение	1	2	3	4	5	6	7	8
Размер изображения (млн пикселей)	0,3	1	2,2	5	13,8	4,2	9	12
Число каналов	3	3	3	3	3	4	4	4
HCA_MS [5; 6]	0,13	0,33	1,04	0,85	4,75	26,3	2,97	666
ECCA [7]	0,17	0,48	0,66	3,1	5,5	6,1	44,04	3
ССАЕ [7]	0,05	0,09	0,15	0,32	0,63	0,56	1,39	1
HECA_MS [8]	0,05	0,23	0,74	0,54	2,74	13,62	9,49	183,3
MeanSC [9]	0,09	0,51	0,86	1,44	8,99	1,44	8,16	4,2
EMeanSC [10]	0,39	2,25	3,16	5,21	31,31	4,97	28,74	10,47
MeanShift [18]	2,91	52	102	67	388	4138	217	62388
<i>k</i> -средних [11]	0,5	36	5	17	1196	75	302	588
ISODATA [11]	1	15	5	9	1178	68	332	337
DBSCAN [13]	194	2731	13098	–	–	39965	–	–
OPTICS [14]	638	5244	40013	–	–	–	–	–
DENCLUE [15]	6934	39849	–	–	–	–	–	–

Заключение. Выполнено экспериментальное сравнение 12 непараметрических алгоритмов, позволяющих обрабатывать мультиспектральные изображения. Показано, что разработанные алгоритмы превосходят известные непараметрические алгоритмы по качеству кластеризации и/или времени обработки. Кроме того, непараметрические алгоритмы, включенные в распространенные пакеты программ и, как следствие, часто используемые при решении практических задач, не позволяют оперативно выполнять обработку изображений большого объема. Кроме того, алгоритмы, разработанные в лаборатории обработки данных ФИЦ ИВТ, дают возможность осуществлять сегментацию в диалоговом режиме.

Исследование выполнено в рамках проекта фундаментальных научных исследований № АААА-А17-117120670141-7.

Список литературы

1. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение / пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
2. Menardi G. Nonparametric clustering for image segmentation // Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science J. 2020. Vol. 13, № 1. P. 83–97.
3. Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Алгоритмы кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений // Вестн. КемГУ. 2012. № 4/2 (52). С. 110–125.
4. Krstinic D., Skelin A.K., Slapnicar I. Fast two-step histogram-based image segmentation // Image Processing, IET. 2011. Vol. 5, № 1. P. 63–72.
5. Пестунов И.А., Рылов С.А., Бериков В.Б. Иерархические алгоритмы кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // Автометрия. 2015. Т. 51, № 4. С. 12–22.
6. Рылов С.А. Непараметрический алгоритм кластеризации для сегментации изображений на основе комбинации сеточного подхода и процедуры среднего сдвига // Тр. Всерос. конф. «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов». 2017. С. 150–155.
7. Подход к построению ансамбля непараметрических алгоритмов кластеризации для сегментации спутниковых изображений / И.А. Пестунов, С.А. Рылов, Ю.Н. Синявский, В.Б. Бериков // Сб. тр. III Междунар. конф. и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). 2017. С. 775–780.
8. Рылов С.А., Пестунов И.А. Ансамблевый непараметрический алгоритм кластеризации для сегментации мультиспектральных спутниковых изображений на основе комби-

нации сеточного подхода и процедуры среднего сдвига // Тез. докл. 15-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 13–17 ноября 2017 г.). М.: ИКИ РАН, 2017. С. 52.

9. Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Непараметрический алгоритм кластеризации данных дистанционного зондирования на основе grid-подхода // Автометрия. 2006. Т. 42, № 2. С. 90–99.

10. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Синявский Ю.Н. Сегментация многоспектральных изображений на основе ансамбля непараметрических алгоритмов кластеризации // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2010. № 5 (31). С. 56–64.

11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. С. 812.

12. ENVI – The Leading Geospatial Analytics Software. URL: <http://www.harrisgeospatial.com/SoftwareTechnology/ENVI.aspx> (accessed at 29.07.2020).

13. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial database / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // Proc. 1996 Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96). 1996. P. 226–231.

14. OPTICS: ordering points to identify the clustering structure / M. Ankerst, M.M. Breunig, H.-P. Kriegel, J. Sander // Proc. 1999 ACM SIGMOD Intern. Conf. on Management of Data. 1999. P. 49–60.

15. Hinneburg A., Keim D.A general approach to clustering in large databases with noise // Knowledge and Information Systems. 2003. Vol. 5, is. 4. P. 387–415.

16. ELKI: Environment for Developing KDD-Applications Supported by Index-Structures. URL: <https://elki-project.github.io> (accessed at 29.07.2020).

17. Smile – Statistical Machine Intelligence and Learning Engine. URL: <https://haifengl.github.io/smile> (accessed at 29.07.2020).

18. Cheng Y. Mean shift, mode seeking, and clustering // IEEE Trans. Patt. Anal. and Mach. Intell. 1995. Vol. 17, № 8. P. 790–799.

19. Синявский Ю.Н. Тестовые данные для обработки. 2020. URL: https://drive.google.com/drive/folders/11r-w_RBC38KEYqFJueQ7tlWh6VndDPUn.

Yu.N. Sinyavskiy, S.A. Rylov, I.A. Pestunov

Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russia
e-mail: yorikmail@gmail.com

EXPERIMENTAL EVALUATION OF NONPARAMETRIC CLUSTERING ALGORITHMS

Experimental evaluation of twelve nonparametric clustering algorithms was made. Algorithms developed in Image processing laboratory of FRC ICT were compared to clustering algorithms from ENVI satellite image processing toolbox and open-source data mining frameworks ELKI and Smile. Clustering accuracy was estimated on artificial model data. Digital photos and multispectral images from WorldView-2 satellite were used for performance evaluation.

Keywords: nonparametric clustering algorithms, multispectral images segmentation, experimental evaluation.

А.В. Тарасов

Пермский государственный национальный
исследовательский университет, Пермь, Россия
e-mail: andrew.tarasov1993@gmail.com

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ МАСКИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОСТИ ПО СНИМКАМ SENTINEL-2 И PLANETSCOPE

Важной задачей при создании систем дистанционного мониторинга является качественная предварительная обработка снимков, в том числе маскирование облачности. В настоящей работе на примере территории Пермского края проведена оценка точности маскирования облачности по снимкам *Sentinel-2* с применением традиционных алгоритмов *Fmask* и *Sen2Cor*, а также алгоритма *S2cloudless*, основанного на машинном обучении. Для данных *Sentinel-2* наилучший результат показал алгоритм *S2cloudless* (средняя точность 83 %), а худший – *Fmask* (70 %). Оценена применимость перечисленных алгоритмов для данных *PlanetScope*, имеющих только видимые и ближний ИК спектральные каналы. Проведены эксперименты по выделению облачности по снимкам *PlanetScope*. В результате установлено, что алгоритм *S2cloudless* может применяться для зимних снимков *PlanetScope* (качество выделения облачности оказалось выше, чем на основе стандартной маски).

Ключевые слова: машинное обучение, маскирование облачности, *Sentinel-2*, *PlanetScope*.

Введение. Облачность является основным фактором, ограничивающим применимость данных космической съемки Земли в оптическом диапазоне спектра, в том числе для решения задач лесного и сельского хозяйства.

Традиционные методы маскирования облачности основаны на последовательном применении нескольких фильтров, в том числе с использованием средних и дальних ИК каналов. Наиболее известны алгоритм *Fmask* [1], разработанный для данных *Landsat* и впоследствии адаптированный к данным *Sentinel-2* [2], и алгоритм *Sen2cor*, разработанный для данных *Sentinel-2* [3].

Однако в последние годы возникло существенное ограничение – новые группировки спутников, обеспечивающие оперативный мониторинг с высокой повторяемостью и детальностью, либо проведение съемки в среднем ИК канале с более низким пространственным разрешением (*Sentinel-2*), либо его вовсе нет (*PlanetScope*). Таким образом, традиционные алгоритмы маскирования облачности имеют ограничения для данных *Sentinel-2* и вообще неприменимы для данных *PlanetScope*. Следовательно, требуется разработка новых алгоритмов, использующих только видимый и ближний ИК диапазоны спектра, а также текстурные и геометрические признаки, значимость которых растет с повышением пространственного разрешения данных. Лучше всего для этого подходят методы машинного обучения.

Существующие методы маскирования облачности. *Fmask* – алгоритм детектирования облачности, который изначально был разработан для съемочной системы *Landsat*, а в последней версии адаптирован для *Sentinel-2* [2]. В основе метода – дерево принятия решений, которое учитывает совместно яркости в спектральных каналах (2, 3, 4, 7, 8, 8А, 10, 11, 12) (табл. 1) и их производных значений (например, индексы

NDVI, NDSI, NDBI, *Whiteness index*). В результате последовательного применения правил дерева решения к входному снимку выделяются несколько классов – облачность, тени, вода, снег и безоблачная территория. Заявленная точность алгоритма 90–95 %.

Sen2Cor – набор инструментов для предварительной обработки снимков *Sentinel-2* (атмосферной коррекции и маскирования облачности), разработанный совместно несколькими университетами Германии при участии Европейского космического агентства [3]. В составе набора есть классификатор, который выделяет на снимке 11 классов, в том числе несколько классов облачности: облачность с высокой вероятностью (*cloud high probability*), средней вероятностью (*cloud medium probability*), перистые облака (*thin cirrus*), тени от облаков (*cloud shadows*). Алгоритм основан на последовательном применении определенных пороговых значений к значениям спектральных каналов *Sentinel-2*. Заявленная точность алгоритма 92–97 %.

Алгоритм *S2cloudless* разработан Европейским космическим агентством (ESA). В его основе лежит метод градиентного бустинга *LightGBM* [4], который относится к ансамблевым методам машинного обучения. *S2cloudless* попиксельно классифицирует изображения и рассчитывает вероятность отнесения пикселя к облачности, на основе нормированных значений яркости в различных каналах. (либо во всех 13 каналах, либо в 10 каналах *Sentinel-2*: 1, 2, 4, 5, 8, 8A, 9, 10, 11, 12). Заявленная точность алгоритма 91–99 %.

Метод описанный в [5] (далее в тексте *CCNN*) отличается от вышеописанных. Во-первых, он не получает точную маску облаков, а определяет наличие или отсутствие облачности в тайлах размером 400×400 м, что может быть обосновано невозможностью абсолютно четкого выделения границ облачности разного типа. Во-вторых, в качестве входных признаков для данного метода используются только 4 спектральных канала: ближний инфракрасный, красный, зеленый, голубой, а также вегетационные индексы NDVI и GNDVI (аналогичный NDVI, но с использованием зеленого канала вместо красного). Таким образом, метод *CCNN* в отличие от всех вышеперечисленных, может быть применен одновременно для снимков *PlanetScope* и для снимков *Sentinel-2*. Заявленная точность алгоритма 78–80 %.

Оценка точности. Для оценки точности были выбраны 12 разносезонных снимков *Sentinel-2* на территорию Пермского края (рис. 1). Процент облачности на выбранных снимках составлял от 0 до 60 %. Для них экспертно была выделена маска облачности. Была построена матрица ошибок результатов автоматизированного выделения облачности в сравнении с результатами экспертного выделения. На ее основе рассчитана *F*-мера, которая служила основным показателем точности [6].

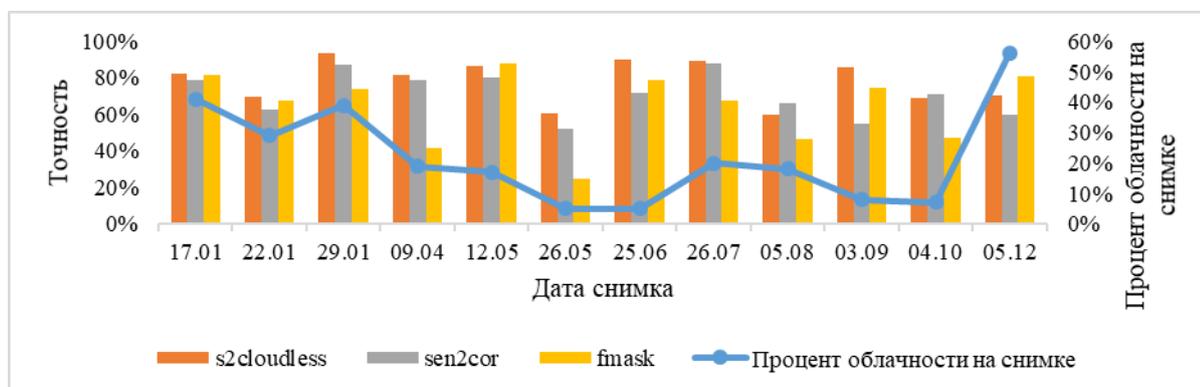


Рис. 1. Точность маскирования облачности с учетом процента облачности на снимках

Наилучший результат при оценке общей точности (F -меры) показал алгоритм *S2cloudless* (средняя F -мера 83 %), на втором месте алгоритм *Sen2Cor* – 75 %, а самый низкий процент точности у алгоритма *Fmask* – 70 %. Низкая точность алгоритма *Fmask* в основном формируется за счет большого объема ложного детектирования. В первую очередь на это оказывают влияние настройки буфера вокруг облачности, поскольку основная часть ошибочно выделенных объектов относится именно к буферным зонам. Также точность данного алгоритма снижается до 40–50 % по снимкам осеннего и весеннего сезонов (апрель, октябрь) за счет большого числа ошибочно выделенных объектов.

Применение алгоритмов маскирования облачности для снимков *PlanetScope*. В рамках данного исследования изучалась возможность адаптирования алгоритмов *FMask*, *Sen2Cor*, *S2cloudless* под снимки *PlanetScope*. Первые два алгоритма используют для расчета метаданные снимка *Sentinel-2*, которые недоступны для снимков *PlanetScope*. В связи с этим возможно адаптировать только алгоритм *S2cloudless*. Для этого снимки *PlanetScope* средствами языка программирования *Python* и библиотеки *gdal* были конвертированы в формат 12-канального растра. В этом растре на место соответствующих каналов *Sentinel* были подставлены каналы *PlanetScope*, значения отсутствующих были заменены нулями.

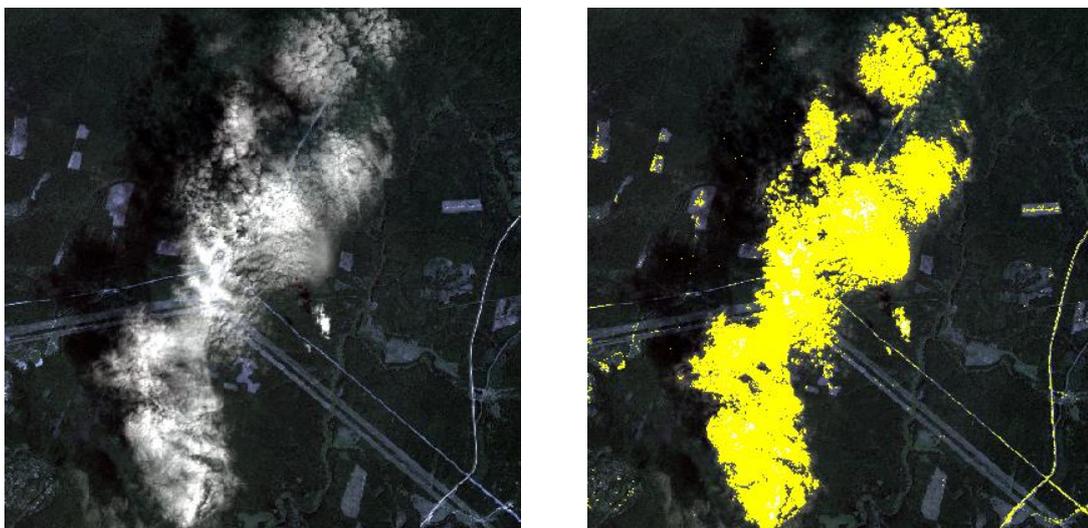


Рис. 2. Пример выделения маски облачности на снимках *PlanetScope* алгоритмом *S2cloudless*. Слева исходное изображение, справа желтым цветом выделенная маска (желтый цвет)

Такой подход показал хороший результат для зимних снимков *PlanetScope* (F -мера ≈ 70 %) и для отдельных летних снимков (рис. 2). Точность маски облачности по летним снимкам оказалась ниже стандартной маски облачности, доступной вместе со снимками *PlanetScope*.

В качестве альтернативы была рассмотрена возможность дообучения алгоритма *CCNN* для зимних снимков *PlanetScope* с помощью искусственного расширения исходной обучающей выборки. Подобная задача успешно решается сегодня, в том числе и с помощью применений технологий машинного обучения, а именно генеративно-сопоставительных сетей (GAN) [7]. Одной из сфер применения таких сетей является трансформация исходных изображений в необходимый стиль, в том числе и преобразование из летнего в зимнее. В 2018 г. инженерами из NVIDIA, а также сотрудниками Корнелльского университета была разработана нейронная сеть (MUNIT), которая способна выполнять это преобразование. Для этого необходимо подать

на вход пары изображений лето – зима одной и той же территории. Подобное преобразование было проделано для всех снимков из исходной обучающей выборки алгоритма *CCNN*. Примеры полученных трансформаций представлены на рис. 3.



Рис. 3. Пример трансформации летнего снимка в зимний (слева направо: исходный снимок *PlanetScope*, трансформированный снимок *PlanetScope*, исходный снимок *Sentinel-2*, трансформированный снимок *Sentinel-2*)

После завершения трансформации с помощью алгоритма *MUNIT*, полученные снимки подавались на вход алгоритму *CCNN* для дообучения модели. График обучения представлен на рис. 4. Данный метод обеспечил точность выделения облачности на уровне 40 %.

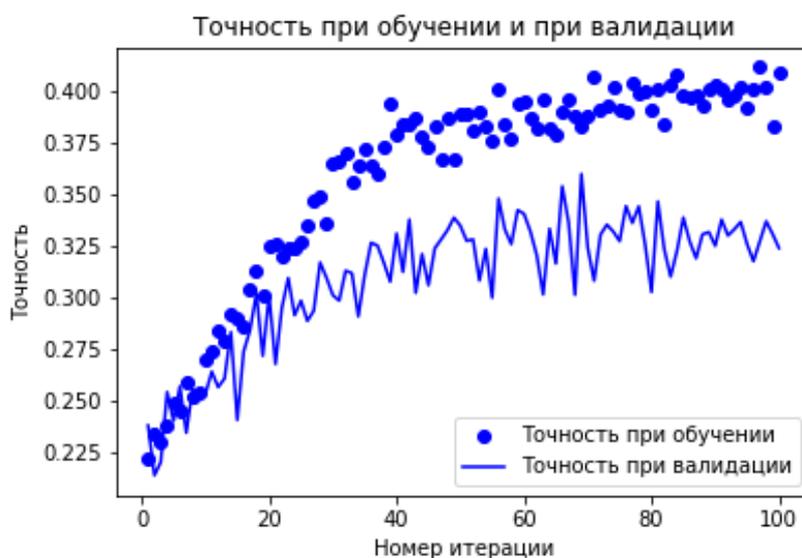


Рис. 4. График точности дообученной модели *CCNN*

Результаты. В данной статье была проанализирована работа нескольких традиционных алгоритмов маскирования облачности (*Fmask*, *Sen2Cor*) и методов, основанных на методах машинного обучения (*S2cloudless*). В качестве контрольного набора было выбрано 12 сцен разных сезонов года на территории Пермского края. Наилучший результат при оценке общей точности (*F*-меры) показал алгоритм *S2cloudless* (средняя *F*-мера 83 %). Для алгоритма, который показал самые высокие значения *F*-меры (*S2cloudless*), была изучена возможность его применения для снимков *PlanetScope*. Такой эксперимент оказался удачным для зимних снимков. Алгоритм успешно выделяет облачность на зимних снимках (*F*-мера $\approx 70\%$), что на 20 % лучше, чем стандартная маска облачности. Что касается летних снимков, точность выделения облачности оказалась меньше, чем у стандартной маски облачности.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-35-90005.

Список литературы

1. Zhe Z., Curtis E.W. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 118. P. 83–94.
2. Qiu S., Zhu Z., Binbin H. Fmask 4.0: Improved cloud and cloud shadow detection in Landsats 4-8 and Sentinel-2 imagery // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 231. P. 83–94.
3. Sen2Cor for Sentinel-2 / M. Main-Knorn, B. Pflug, J. Louis [et al.] // Proceedings. SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII. Warsaw. 2017. Vol. 10427. P. 218.
4. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree / K. Guolin, M. Qi, T. Finley [et al.] // Proceeding of 31st Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). California. 2017. P. 3149–3157.
5. Deep learning for multi-modal classification of cloud, shadow and land cover scenes in PlanetScope and Sentinel-2 imagery / Y. Shendryk, Y. Rist, C. Ticehurst, P. Thorburn // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. Vol. 157. P. 124–136.
6. Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-Score, with implication for evaluation / D.E. Losada, J.M. Fernández-Luna (eds) // Advances in Information Retrieval. ECIR 2005. Lecture Notes in Computer Science. 2005. Vol. 3408.
7. Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville, Yoshua Bengio. Generative Adversarial Nets // arXiv. 2014. P. 1–9.

A. V. Tarasov

Perm State University, Perm, Russia
e-mail: andrew.tarasov1993@gmail.com

APPLICATION OF CLOUD MASKING ALGORITHMS FOR PLANETSCOPE IMAGES

An important challenge in the building of such monitoring systems is high-quality preprocessing of the images, including cloud masking. In this study, we estimated an accuracy of cloud masking on Sentinel-2 images obtained at different seasons with the use of traditional Fmask and Sen2Cor algorithms and machine learning-based S2cloudless algorithm, on the example of the Perm region territory. For Sentinel-2 data, the S2cloudless algorithm showed the best result (average accuracy 83 %), and the lowest accuracy was obtained with Fmask algorithm (70 %). The applicability of the listed algorithms for PlanetScope data having only visible and near-IR spectral bands was also estimated. It was found that the S2cloudless algorithm can be used for PlanetScope images obtained in winter, since the cloud masking accuracy is higher than that the standard cloud mask product delivered with the data.

Keywords: cloud masking, machine learning, PlanetScope, Sentinel-2.

А.Г. Терехов^{1,2}, Н.Н. Абаев^{2,3}, О.П. Архипкин⁴

¹Кандидат технических наук, Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан

²Научно-исследовательский центр, РГП «Казгидромет», Алматы, Казахстан

³Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

⁴Кандидат физико-математических наук, Национальный центр космических исследований и технологий, Алматы, Казахстан

e-mail: aterekhov1@yandex.ru; abayev_n@meteo.kz; oarkhipkin@rambler.ru

СПУТНИКОВАЯ МОРФОМЕТРИЯ КОТЛОВИНЫ САРДОБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (УЗБЕКИСТАН), РАЗРУШЕННОГО 1 МАЯ 2020 ГОДА

Уточнена морфометрия котловины Сардобинского водохранилища (Узбекистан), разрушенного 1 мая 2020 г. из-за прорыва боковой дамбы. Снимки *Sentinel-2A* периода 2015–2020 гг. и *DEM Google Earth Elevation* использовались при создании 3D-модели водохранилища. Набор из 18 вариантов позиций береговых линий, при различной степени наполненности резервуара, формировал морфометрическую основу котловины водохранилища. Объем водохранилища оценивается в 945 млн м³. В результате аварии площадь водного зеркала уменьшилась с 55,5 (на 26.04.2020) до 30,3 км² (на 4.05.2020), а запас воды – с 847 до 163 млн м³, т.е. из водохранилища было потеряно 684 млн м³.

Ключевые слова: водное зеркало, береговая линия, цифровая модель рельефа местности, морфометрия котловины водохранилища.

Сардобинское водохранилище расположено в бассейне трансграничной реки Сырдарья на территории Узбекистана, примерно в 140 км от Ташкента и 20 км от границы с Казахстаном. Оно использовалось для орошения сельскохозяйственных земель в Сырдарьинских и Джизакских областях Узбекистана и работало с 2017 г. [1]. Ложе резервуара представляет собой слабо наклоненный, равнинный участок в центре Голодной степи, площадью 60 км², огороженный с трех сторон специально построенными дамбами (рис. 1). Накапливаемая в холодный период (октябрь – апрель) вода в вегетационный сезон (май – август) подавалась в ирригационную систему Голодной степи. Прорыв боковой дамбы резервуара произошел утром 1 мая 2020 г. (рис. 2, 3). Следствием этого стал паводок на территории в 600 км² и затопление примерно 200 км² части нижерасположенных территорий Сардобинского района, Сырдарьинской области Узбекистана и Мактааральского района, Туркестанской области Казахстана. Затопленными оказались шесть населенных пунктов (все в Казахстане), села Оргебас, Достык, Фирдоуси, Найман Бухарбай и Жантаксай. На территории Узбекистана оказалось затоплено около 20 км автомобильной магистрали Ташкент – Самарканд.

Спутниковые данные позволили быстро дать некоторые оценки произошедшего ЧС [2–4]. Глобальные *DEM (Digital Elevation Model)*, в частности *SRTM-2000* и ее вариант *Google-Earth Elevation*, а также *ASTER V.3* покрывали эту территорию до начала строительства и таким образом была возможность восстановить батиметрию резервуара. Трехмерные модели ложа водохранилища, построенные как

по данным *ASTER V.3* [3], так и по данным *Google Earth Elevation* [4], дают близкие характеристики, оценивая максимальную глубину резервуара в 28 м.

Спутниковый мониторинг Сардобинского водохранилища периода 2015–2020 гг. в оптическом диапазоне с помощью спутника *Sentinel-2A* (разрешение 20 м) позволил накопить достаточное количество конфигураций водных зеркал (115 снимков из [<https://glovis.usgs.gov/>]), чтобы построить уточненную 3D-модель котловины водохранилища. Принцип уточнения заключается в альтиметрической привязке отобранного набора береговых линий при различной степени заполнения водохранилища. Альтиметрически привязанный набор береговых линий более точно отражает рельеф периодически осушающегося дна резервуара, чем глобальная *DEM*, поскольку береговые линии в отсутствии сильного ветра являются высокоточными изогипсами.

Трехмерная модель котловины водохранилища формируется из набора слоев. Каждый слой представляет собой два альтиметрически привязанных водных зеркала, промежуток между которыми заполняется в рамках линейной аппроксимации. Объем слоя, заключенного между соседними изогипсами (водными зеркалами), определяется с помощью формулы для расчета объема усеченной пирамиды, где в качестве площади верхнего и нижнего оснований выступают площади соответствующих водных зеркал. Полученный таким образом набор слоев формирует 3D-модель котловины водохранилища. Для описания Сардобинского водохранилища использовалось набор из 18 вариантов береговой линии (19 слоев). Полный объем чаши водохранилища в рамках такой модели составил 945 млн м³, что близко к официальным данным (922 млн м³) [1] и к оценкам на базе *ASTER V.3* (978 млн м³) [3].

Альтиметрически привязанные изогипсы определили перепад высот дна Сардобинского водохранилища в 28 м, от 277 до 305 м над уровнем моря (БС). В результате разрушения боковой дамбы, основание которой находилось на высоте 288 м над уровнем моря (БС), площадь водного зеркала резервуара уменьшилась с 55,5 (на 26.04.2020) до 30,3 км² (на 4.05.2020), а запас воды с 847 до 163 млн м³, т.е. из водохранилища было потеряно 684 млн м³. Построенная 3D-модель ложа водохранилища позволила реконструировать историю динамики нагрузки на разрушенную секцию дамбы (рис. 3).



Рис. 1. Снимки *Sentinel-2A* Сардобинского водохранилища до (26.04.2020) и после (04.05.2020) аварии (красная линия – удерживающая воду дамба) в сравнении с батиметрией водохранилища, построенной на основе набора береговых линий



Рис. 2. Фотографии места прорыва дамбы (из средств массовой информации Узбекистана)

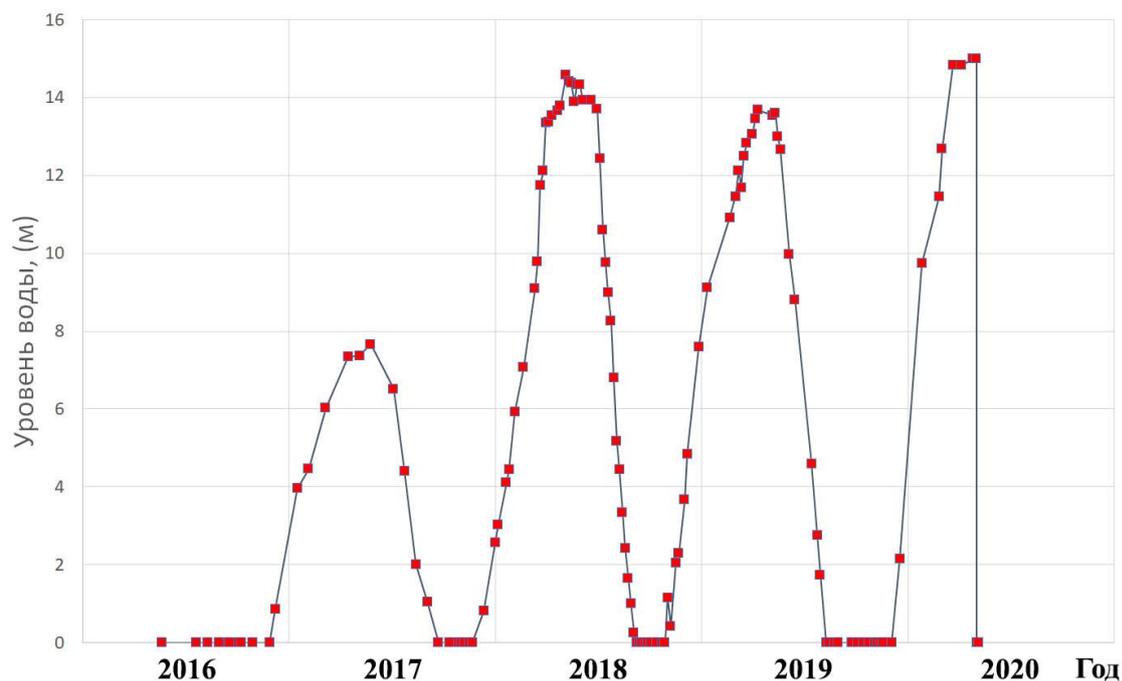


Рис. 3. История нагрузки (высота водного столба) на разрушенную секцию боковой дамбы Сардобинского водохранилища (Узбекистан). Модельный расчет

Таким образом, на базе спутниковых данных *Sentinel-2A* и *DEM SRTM-2000* была создана батиметрическая модель Сардобинского водохранилища. Водохранилище работало в ирригационном режиме, заполнение: октябрь – март; срабатывание: май-сентябрь. Исторический максимум воды в объеме 847 млн м³ был зарегистрирован

стрирован 24 апреля 2020 г., т.е. в последний пролет спутника перед аварией (за 6 дней). В результате прорыва дамбы (см. рис. 1) из водохранилища было потеряно около 684 млн м³, а уровень воды в нем упал на 15 м.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты: AP08957394; AP05134241.

Список литературы

1. URL: <https://uz.sputniknews.ru/society/20200505/14060809/Spravka-cto-izvestno-o-Sardobinskom-vodokhranilische.html>.
2. Гири С., Дончиц Г., Хегнауэр М. Быстрый анализ прорыва плотины на Сардобинском водохранилище в Узбекистане. 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.22899.14885.
3. Константинова А.М., Лупян Е.А. Анализ последствий прорыва дамбы Сардобинского водохранилища 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 3. С. 261–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.
4. Терехов А.Г., Абаев Н.Н., Лагутин Е.И. Спутниковый мониторинг Сардобинского водохранилища в бассейне реки Сырдарья (Узбекистан) до и после прорыва дамбы 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 3. С. 255–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.

A.G. Terekhov^{1,2}, N.N. Abayev^{2,3}, O.P. Arkhipkin⁴

¹Institute Informational and Computing Technology MES, Almaty, Kazakhstan

²RSE Kazhydromet, Almaty, Kazakkstan

³Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

⁴National Center of Space Research and Technology, Almaty, Kazakhstan

e-mail: aterekhov1@yandex.ru; abayev_n@meteo.kz; oarkhipkin@rambler.ru

SATELLITE MORPHOMETRY OF SARDOBA RESERVOIR (UZBEKISTAN) DESTROYED BY MAY 1, 2020

The morphometry of the Sardoba reservoir (Uzbekistan) has been refined. Sentinel-2A images from the period 2015–2020 and DEM Google Earth Elevation were used to create a 3D model of the reservoir. A set of 18 variants of coastlines positions (water mirrors), with varying degrees of reservoir filling, formed the morphometric basis of the reservoir basin. The volume of the reservoir is estimated at 0,945 km³. After reservoir crash the water mirror area decreased from 55.5 km² to 30.3 km² and the water deposit from 0,85 km³ to 0,16 km³.

Keywords: water mirror, coastline, digital elevation model of terrain, morphometry of reservoir bed.

А.Е. Толмачева, А.Н. Сафонова

Лаборатория глубокого обучения ДНиИД,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: a.tolmacheva@solutionfactory.ru

КЛАССИФИКАЦИЯ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЕРЕВА НА АЭРОСЪЕМКАХ С ПОМОЩЬЮ АРХИТЕКТУР YOLO

Мониторинг состояния растительности и своевременное отслеживание негативных процессов является актуальным во всем мире. Одной из основных задач специалистов в области лесного хозяйства является контроль лесовосстановительных работ и мониторинг процессов лесовосстановления вследствие разных причин гибели леса. Основанием последнего могут выступать пожары, насекомые, неблагоприятные погодные условия и др. Отслеживание состояния леса наилучшим образом осуществляется с привлечением данных дистанционного зондирования Земли и разных алгоритмов их обработки. В настоящей работе представлен эксперимент автоматической классификации степени заражения дерева по данным аэросъемки с использованием искусственных нейронных сетей YOLO и их сравнение между версиями.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, нейронные сети, классификация, YOLO, аэросъемка.

Метод. Интеллектуальные системы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) позволяют с успехом решать проблемы распознавания образов, выполнения прогнозов, оптимизации, ассоциативной памяти и управления [1]. Известны и иные, более традиционные, подходы к решению этих проблем, однако они не обладают необходимой гибкостью за пределами ограниченных условий. ИНС дают многообещающие альтернативные решения, и многие приложения выигрывают от их использования.

Современные задачи компьютерного зрения разделяют на четыре вида: *Classification* – классификация изображения по типу объекта, которое оно содержит; *Semantic segmentation* – определение всех пикселей объектов определённого класса или фона на изображении (если несколько объектов одного класса перекрываются, их пиксели никак не отделяются друг от друга); *Object detection* – обнаружение всех объектов указанных классов и определение охватывающей рамки для каждого из них; *Instance segmentation* – определение пикселей, принадлежащих каждому объекту каждого класса по отдельности [2].

На рис. 1 визуализированы результаты решений каждой задачи.

Свёрточная нейронная сеть (от англ. *convolutional neural network, CNN*) – специальная архитектура искусственных нейронных сетей, предложенная Яном Лекуном в 1988 г. и нацеленная на эффективное распознавание образов, входит в состав технологий глубокого обучения (англ. *deep learning*) [3]. СНС является упрощенной математической моделью зрительной коры головного мозга, в которой были открыты простые клетки, реагирующие на прямые линии под разными углами, и сложные клетки, реакция которых связана с активацией определённого набора простых клеток [4]. Название архитектура сети получила из-за наличия операции свертки, суть

которой в том, что каждый фрагмент изображения умножается на матрицу (ядро) свёртки поэлементно, а результат суммируется и записывается в аналогичную позицию выходного изображения.

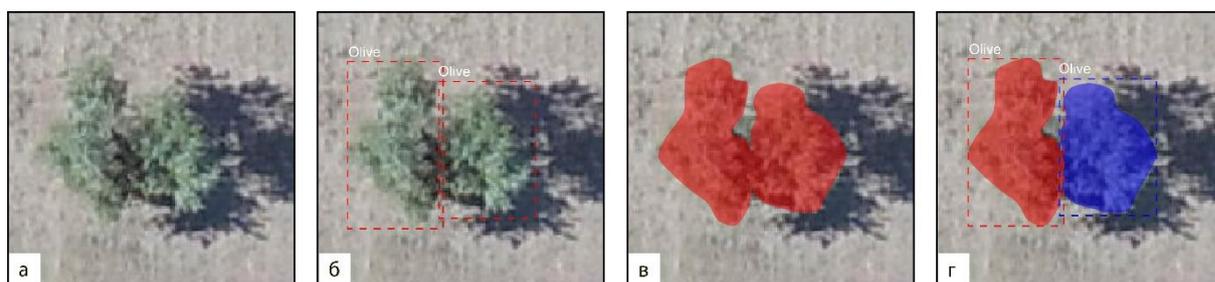


Рис. 1. Пример выполнения задач компьютерного зрения:
a – классификация; *б* – детектирование; *в* – сегментация; *г* – семантическая сегментация

СНС показывают отличные результаты по распознаванию, так, например, в данной работе использовалась архитектура *MobileNet* с целью создания собственной СНС для классификации состояния растений в биологических исследованиях на мобильных устройствах. Разработка небольшой модели позволила им упростить исследователям работу во время анализа образцов растений [5]. Ранее для решения задачи разделения растений на культурные и сорные применялись многослойные нейронные сети [6]. Недосток полученных моделей заключается в том, что методы их обучения требуют наличия экземпляров каждого класса, в том числе и сорных растений. В следующей работе [7] авторы для автоматической классификации определяют классы с помощью спектральных или геометрических, текстур, контекстов, временной информации в сочетании с математической (статистической) группировкой в классы. Цифровая классификация происходит на основе пикселей изображений низкого разрешения, так как высокое разрешение в данном методе повышает ошибку.

YOLO или *You Only Look Once* («смотри только раз») – это очень популярная на текущий момент архитектура СНС, которая используется для распознавания множественных объектов на изображении [8]. Плюсы данного подхода состоят в том, что сеть смотрит на все изображение сразу и учитывает контекст при детектировании и распознавании объекта. Также *YOLO* в 1 000 раз быстрее чем *R-CNN* и около 100 быстрее, чем *Fast R-CNN* [9].

Метрика оценки для измерения точности обнаружения является метрика качества ранжирования *mAP* (от англ. *mean average precision*). Это интегральный параметр, который является средним значением *AP* (от англ. *average precision*) [10] для каждого класса из обучающей выборки (1):

$$AP = \frac{1}{11} \sum_{r \in (0,0...1)} P(r), \quad (1)$$

где *r* – функция *recall*; *P(r)* – точность от значения *recall*.

Основными показателями метрики оценки являются точность (*precision*) и полнота (*recall*), которые основаны на матрице смежности (табл. 1).

Таким образом, исходя из матрицы смежности можно произвести расчет точности, которая показывает, насколько точны предсказания, то есть процент правильно предсказанных классов (2) и полноты, что представляет собой долю найденных сетью объектов, принадлежащих классу, относительно всех объектов данного класса в выборке (3):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (3)$$

Таблица 1

Матрица смежности в качестве примера разбора mAP

	Предсказан класс А: да	Предсказан класс А: нет
Класс А: да	Истинно положительный показатель (<i>True positive</i>)	Ложно положительный показатель (<i>False positive</i>)
Класс А: нет	Ложно положительный показатель (<i>False positive</i>)	Истинно положительный показатель (<i>True positive</i>)

Другим показателем является IoU (*Intersection over Union*), позволяющий измерить покрытие двух границ: предсказанной классификатором и реальной, которая обрамляет объект на изображении (4):

$$IoU = \left(\frac{overlap}{union} \right), \quad (4)$$

где *overlap* – перекрытие, *union* – объединение.

Результаты. В работе использовались данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), полученные с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с трехканальной камерой (*RGB*: красный – зеленый – синий). Набор данных состоял из 404 изображений, где 309 предназначались для обучения, 4 – для тестирования. Объектами выступали поврежденные ели. Съемка осуществлялась на территории Восточно-Сибирских гор, юг Чупрене, Болгария, 25 сентября 2017 г., высота полета 120 м.

Аннотация набора данных производилась в 404, где было выделено четыре класса: здоровое дерево либо повреждено до 25 % (*class0*), дерево с легким повреждением до 50 % (*class1*), поврежденное дерево на 75 % (*class2*), мертвое дерево или сухостой (*class3*).

Для эксперимента и в качестве сравнения использовались архитектуры YOLOv2, YOLOv3, YOLOv4, где номер представляет собой версию алгоритма. Обучение выполнялось на двух учебных выборках. Одна выборка состояла из оригинальных изображений, полученных с квадрокоптера, другая состояла из предварительно обработанных изображений с использованием графических преобразований, таких как усиление контрастности пикселей.

Результатом работы является сравнение качества определения между тремя архитектурами YOLO и зависимость влияния предобработки изображений в решении данной задачи.

Обучение всех трех архитектур проходили на видеокарте *Nvidia 1060*.

Функция потерь (*avg loss*) (5) – это разница между сгенерированным выходом; то, что мы хотим получить и фактическим выходом; то, что мы смогли получить в реальности.

$$-\sum_{c=1}^M y_{o,c} \log(p_{o,c}), \quad (5)$$

где M – номер класса; y – бинарный индикатор (0 или 1), если образец определен корректно значит правда, иначе ложь; p – вероятностный предикат состояния класса.

В работе производилось обучение модели на двух наборах изображений: оригинальных без каких-либо изменений и предварительно обработанных изображений методом повышения контрастности (рис. 2).

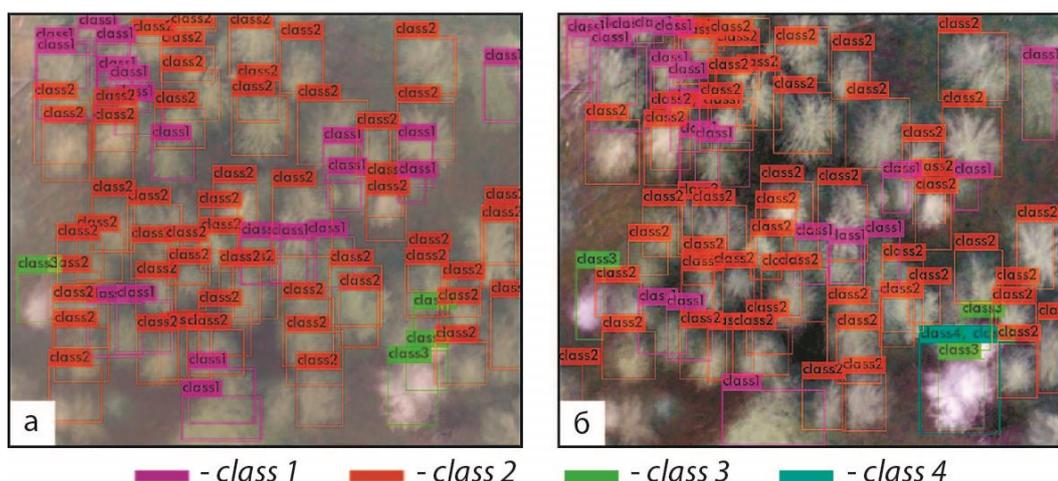


Рис. 2. Результат работы модели архитектуры YOLOv2: *a* – модель, обученная на оригинальных изображениях; *б* – модель, обученная на предварительно обработанных изображениях

Цель данного эксперимента заключалась в проверке релевантности использования преобразованных изображений для данных архитектур. После обучения модели всех трех архитектур был произведен сравнительный анализ по параметрам mAP и avg loss (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение средних значений avg loss и mAP

	YOLOv2		YOLOv3		YOLOv4	
	mAP	Loss	mAP	Loss	mAP	Loss
Исходное изображение	0.903	0.1813	0.905	0.5959	0.996	0.4177
Предобработанное изображение	0.924	0.3319	0.539	1.9085	0.815	5.8953

По результатам, приведенным в табл. 2, можно увидеть, что только для архитектуры YOLOv2 возможно использовать предварительно обработанные изображения для ее обучения, в отличие от более поздних архитектур. В этом случае после применения повышения контрастности точность архитектуры YOLOv3 и YOLOv4 значительно снизилась.

Вывод. Для лучшего результата классификации степени повреждения области леса на изображениях, полученных с камер БПЛА, предпочтительнее использовать архитектуру YOLOv2, обученную на обучающей выборке, прошедшую предварительную обработку с помощью повышения контрастности пикселей. Данная версия модели показала средний mAP 92,4 %, что на 39 % выше YOLOv3 и на 11 % выше YOLOv4.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-01-00215 «Исследование оперативных возможностей гиперспектральных технологий ДЗЗ для решения региональных задач с использованием действующих и перспективных ГСК космического базирования».

Список литературы

1. Hinton G., Sabour S., Frosst N. Dynamic routing between capsules. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1710.09829> (дата обращения: 03.07.2020).
2. Желтов С.Ю. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
3. LeCun Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun, B. Boser, J.S. Denker, D. Henderson [et al.] // Neural Computation, Winter 1989. P. 541–551.
4. David H., Torsten N. Wiesel. Brain and visual perception: the story of a 25-year collaboration. Oxford University Press, 2005. 106 p.
5. Барковский А.В., Жвакина А.В. Использование свёрточных нейронных сетей для анализа состояния растений. 2018. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37092428> дата обращения: 03.07.2020).
6. Дубровин В.И., Морщавка С.В., Пиза Д.М. Распознавание растений по результатам дистанционного зондирования на основе многослойных нейронных сетей. 2000. URL: https://www.researchgate.net/publication/247158278_Raspoznavanie_rastenij_po_rezultatam_distancionnogo_zondirovaniya_na_osnove_mnogoslojnyh_nejronnyh_setej (дата обращения: 03.07.2020).
7. Eli Peli. Contrast in complex images. 1990. URL: <https://www.osapublishing.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-7-10-2032> (дата обращения: 03.07.2020). Текст: электронный.
8. Redmon J., Angelova A. Real-Time Grasp detection using convolutional neural networks. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.3128> (дата обращения: 03.07.2020).
9. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1612.08242> (дата обращения: 03.07.2020).
10. Christopher D., Prabhakar Raghavan, Hinrich Schütze. Chapter 8: Evaluation in information retrieval. Cambridge University Press, 2009. P. 159–161 p.

A.E. Tolmacheva, A.N. Safonova

Deep Learning laboratory,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: a.tolmacheva@solutionfactory.ru

CLASSIFICATION OF THE EXTENT OF DAMAGE TREES ON AERIAL PHOTOGRAPHY THROUGH YOLO ARCHITECTURES

Monitoring the state of vegetation and timely tracking of negative processes is relevant worldwide. One of the main tasks of specialists in the field of forestry is the control of reforestation and monitoring of reforestation processes due to various causes of forest death. The basis of the latter may be fires, insects, adverse weather conditions and more. Tracking the state of the forest in the best way is carried out using data from remote sensing of the Earth and various algorithms for their processing. In this paper, we present an experiment on the automatic classification of the degree of infection of a tree according to aerial survey data using YOLO artificial neural networks and their comparison between versions

Keywords: remote sensing, neural network classification, YOLO, aerial photography.

В.С. Тутатчиков¹, О.В. Дрозд¹, Д.В. Капулин², Н.Н. Овчинников³

¹Старший преподаватель, ²Кандидат технических наук, ³Магистрант
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: vtutatchikov@sfu-kras.ru; odrozd@sfu-kras.ru; dkapulin@sfu-kras.ru

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОТОЧНОЙ НАВИГАЦИИ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Одной из ключевых задач при формировании группировки малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли является обеспечение стабильной во времени конфигурации. Данная задача должна решаться в режиме реального времени с достаточно высокой точностью при значительных ограничениях на потребляемую мощность бортовых спутниковых систем и с минимальным использованием наземных средств мониторинга и слежения. В работе кратко рассмотрен один из вариантов процедуры вторичной обработки навигационных сигналов и решения навигационно-баллистической задачи, предполагающий совместное использование методов кодовых, фазовых измерений, решения целочисленной фазовой неоднозначности и средств межспутниковых измерений.

Ключевые слова: малый космический аппарат (МКА), группировка МКА, высокоточная навигация.

Введение. Можно утверждать, что к настоящему времени сложились условия для создания и развертывания полнофункциональных космических систем на основе орбитальных группировок малых космических аппаратов (МКА), которые рассматриваются не как альтернатива существующим системам на основе средних и тяжелых космических аппаратов, а как дополнение, существенно расширяющее возможности решения прикладных задач в различных сферах деятельности.

МКА открывают широкие возможности по синтезу космических систем, обладающих новыми качественными возможностями. Например, для космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) возможна реализация следующих системных эффектов:

- 1) многопозиционность, многодиапазонность и одновременность наблюдения объекта с нескольких МКА, обеспечение эффекта стереосъемки;
- 2) возможность комплексирования информации, получаемой от разнородных бортовых комплексов специальной аппаратуры МКА, приводящая к повышению информативности наблюдения;
- 3) обеспечение непрерывности наблюдения за счет возможности «передачи эстафеты» наблюдения последовательно входящим в зону видимости объекта другим МКА орбитальной группировки.

Использование МКА для целей ДЗЗ имеет большие перспективы и позволяет существенно улучшить потребительские качества космической информации, но при этом требует решения ряда научных и технических проблем. Наряду с общесистемными задачами поддержания целостности орбитальной группировки, требуется решение задач автономного навигационно-баллистического и частотно-временного обеспечения [1].

В настоящее время для автономного навигационного обеспечения автономных космических аппаратов используются бортовые системы навигации на базе оптико-электронных датчиков небесных тел (Земли, Солнца, навигационных звезд), инерциальные системы ориентации, многоканальные приемники сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [3–5].

Для наземного обеспечения функционирования космических аппаратов используются сети наземных постов радиолокационного и оптического контроля текущего местоположения спутника [6–9]. Одним из ключевых недостатков существующих средств контроля является их зависимость от наземного сегмента управления группировкой и наличие разрывов в навигационном поле, связанных с территориальным размещением контрольных постов. В данной работе предлагается решение задачи высокоточного навигационно-баллистического обеспечения группировки МКА большой численности в автономном режиме без использования наземных средств и с минимизацией стоимости предлагаемых решений [2].

Методика. Предлагаемая методика навигационного обеспечения группировки МКА представляет собой новую комбинацию известных методов вторичной обработки навигационной информации, полученной от ГНСС GPS и ГЛОНАСС. Решение навигационной задачи бортовыми средствами МКА в автономном режиме включает следующие процедуры:

- 1) индивидуальный и групповой расчет абсолютных и относительных координат МКА посредством кодовых и фазовых измерений [10; 11];
- 2) расчет параметров движения центра масс МКА (компонентов вектора скорости) по результатам оценки псевдоскоростей в кодовом и фазовом режимах;
- 3) решение целочисленной неоднозначности фазовых измерений псевдодальности методами, базирующимися на использовании вторых разностей фаз, вычисленных с использованием первых разностей фаз [12; 13];
- 4) обеспечение взаимных навигационных измерений средствами бортовой аппаратуры межспутниковых измерений и межспутниковой линии связи [14; 15].

Результаты экспериментов. Для тестирования теоретических принципов реализации данных процедур применительно к группировке МКА минимального состава: ведущий (лидер) и ведомый спутники, была разработана компьютерная модель навигационного обеспечения. Имитационная модель реализована на языке C++ в среде разработки Qt. Результаты вычисления абсолютных координат и скорости ведущего МКА представлены на рис. 1, относительных координат и скорости ведомого МКА – на рис. 2.

Результаты моделирования показали, что имитационная модель автономного навигационного обеспечения группировки МКА отвечает предъявляемым требованиям к решению навигационно-баллистической задачи, в частности, по среднеквадратической погрешности измерения относительных координат – не более 0,02 м и относительной скорости – не более 0,01 м/с.

Заключение. Разработка методов и средств навигационного обеспечения высокоточной автономной навигации группировок малых космических аппаратов для выполнения задач дистанционного зондирования Земли предполагает комплексирование различных методов обработки навигационных сигналов. В работе кратко рассмотрен один из вариантов подобной комплексной процедуры вторичной обработки навигационных сигналов и решения навигационно-баллистической задачи, предполагающей совместное использование методов кодовых, фазовых измерений, решения целочисленной фазовой неоднозначности и средств межспутниковых измерений.

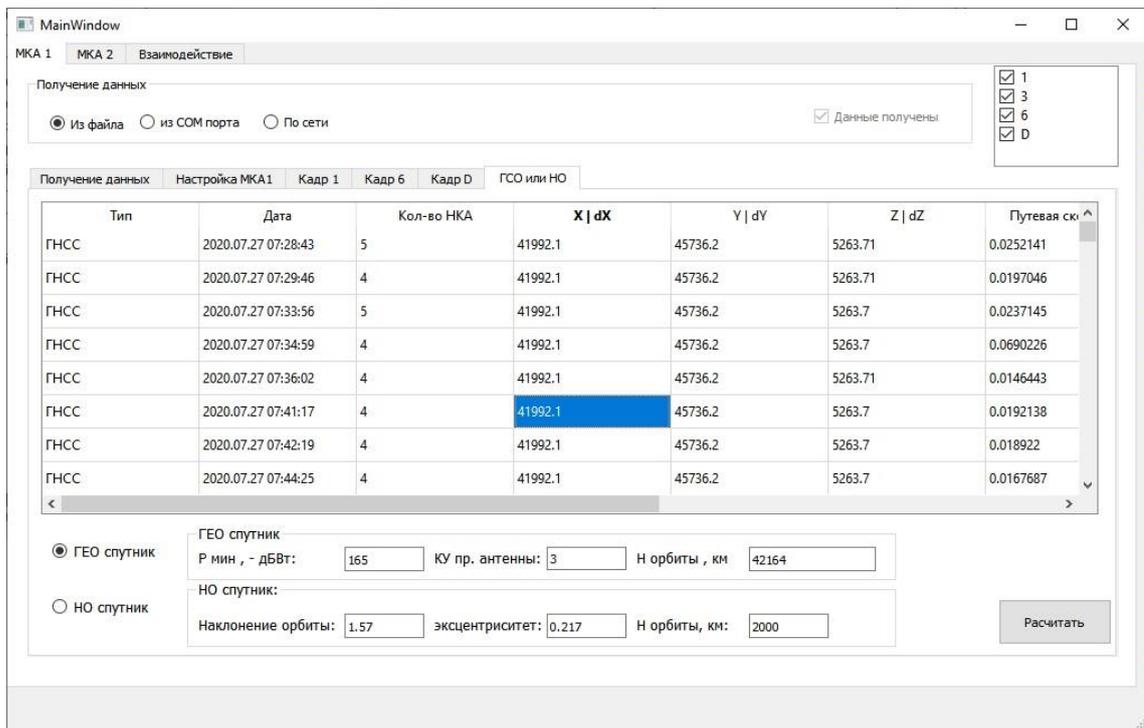


Рис. 1. Абсолютные координаты и скорость ведущего МКА

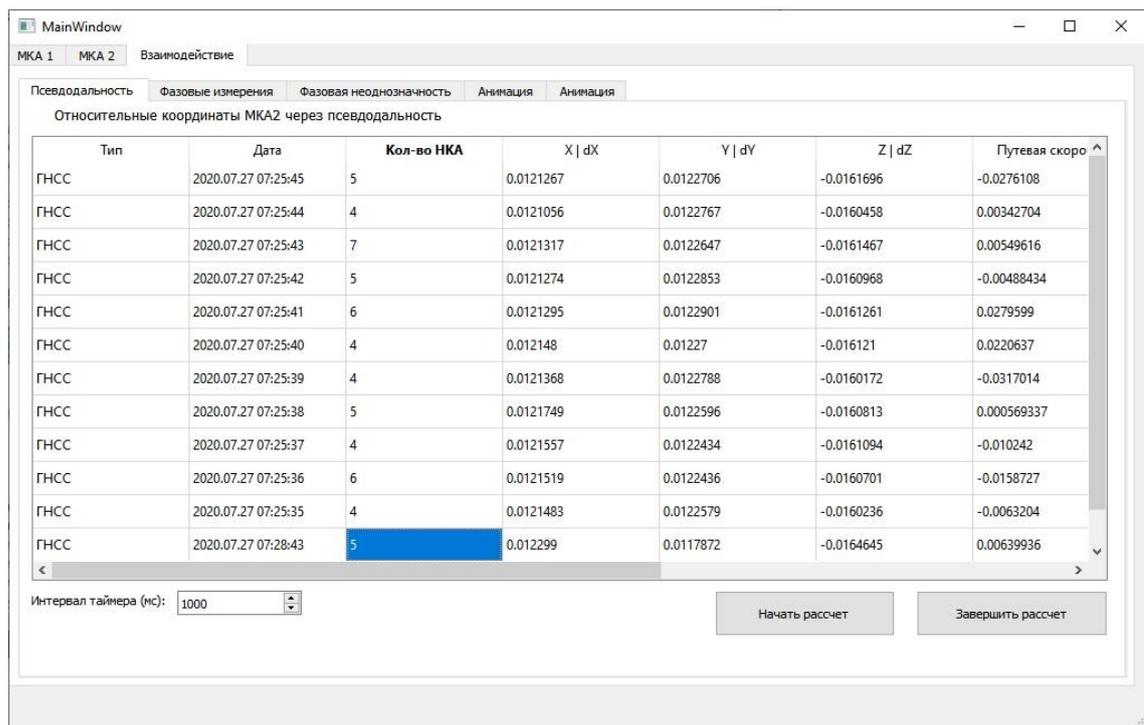


Рис. 2. Относительные координаты и скорость ведомого МКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2019-1684, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60819X0274).

Список литературы

1. Korpacz J.R., Herschitz R., Roney J. Small satellites an overview and assessment // *Acta Astronaut.* 2020. № 170. P. 93–105.
2. Ma X., Fang J., Ning X. An overview of the autonomous navigation for a gravity-assist interplanetary spacecraft // *Prog. Aerosp. Sci.* 2013. № 63. P. 56–66.
3. Sun X., Han C., Chen P. Precise real-time navigation of LEO satellites using a single-frequency GPS receiver and ultra-rapid ephemerides // *Aerosp. Sci. Technol.* 2017. № 67. P. 228–36.
4. Methods of high-precision mutual navigation of small spacecraft / D.D. Dmitriev, V.N. Tyapkin, Y.L. Fateev [et al.] // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) (IEEE). P. 1–5.
5. Advanced technologies for satellite navigation and geodesy / G. Giorgi, T.D. Schmidt, C. Trainotti [et al.] // *Adv. Sp. Res.* 2019. № 64. P. 1256–73.
6. Sgubini S., Palmerini G.B. Ground-based orbit determination for spacecraft formations // 2010 IEEE Aerospace Conference (IEEE). 2010. P. 1–7.
7. A shared satellite ground station using user-oriented virtualization technology / Y. Liu, Y. Chen, Y. Jiao [et al.] // *IEEE Access.* 2020. № 8. P. 63923–34.
8. Riesing K., Yoon H., Cahoy K. A portable optical ground station for low-earth orbit satellite communications // 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) (Naha, Japan: IEEE). 2017. P. 108–14.
9. Strugarek D., Sośnica K., Jäggi A. Characteristics of GOCE orbits based on Satellite Laser Ranging // *Adv. Sp. Res.* 2019. № 63. P. 417–31.
10. Teunissen P., Montenbruck O. Springer Handbook of global navigation satellite systems // Springer International Publishing. 2017.
11. Oxley A. Uncertainties in GPS Positioning. A Mathematical Discourse ed Academic Press. 2017.
12. GNSS-based attitude determination techniques – a comprehensive literature survey / A. Raskaliyev, S.H. Patel, T.M. Sobh, A. Ibrayev // *IEEE Access.* 2020. № 8. P. 24873–86.
13. Dmitriev D.D., Fateev Y.L., Ratushniak V.N. Determination of phase ambiguity in the interferometer using a three-frequency GLONASS signal // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Tomsk, Russia: IEEE). 2019. P. 1–4.
14. Distance estimation in OFDM inter-satellite links / A.M. Crisan, A. Martian, R. Cacoveanu, D. Coltuc // *Measurement.* 2020. № 154. p. 107479.
15. Yu F., He Z., Xu N. Autonomous navigation for GPS using inter-satellite ranging and relative direction measurements // *Acta Astronaut.* 2019. № 160. p. 646–55.

V.S. Tutatchikov, O.V. Drozd, D.V. Kapulin, N.N. Ovchinnikov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: vtutatchikov@sfu-kras.ru; odrozd@sfu-kras.ru; kapulin@gmail.com

COMPUTER MODEL OF HIGH-PRECISION NAVIGATION OF A SMALL SATELLITE CONSTELLATION FOR REMOTE EARTH SENSING TASKS

One of the key tasks in the formation of the small satellite constellation is to ensure its stable configuration in time. The specific of this problem lies in the fact that the task must be solved in real time with sufficiently high accuracy with significant restrictions on the power consumption of onboard satellite systems. The paper briefly discusses one possible approach of secondary signal processing and solving the navigation and ballistic tasks, which involves the joint use of code, phase measurement methods, integer phase ambiguity resolution, and inter-satellite measurements.

Keywords: small satellite (SST), SST constellation, high-precision navigation.

В.С. Тутатчиков¹, М.В. Носков²

¹Старший преподаватель, ²Доктор физико-математических наук, профессор
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: vtutatchikov@sfu-kras.ru; mvnoskov@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ НА СНИМКАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В настоящее время широко распространены методы цифровой обработки снимков дистанционного зондирования Земли для улучшения качества изображения. Например, многие изображения отбраковываются из-за высокой облачности на снимках, скрывающей интересующие объекты. В данной работе рассмотрена возможность применения высокочастотных глобальных фильтров для уменьшения облачности на снимке, показаны результаты улучшения изображения.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, частотная фильтрация, дистанционное зондирование Земли.

Введение. В настоящее время широко распространены методы цифровой обработки снимков дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для улучшения качества изображения. Но многие оригинальные снимки несут в себе искажения, например, высокая облачность, частично или полностью скрывающая интересующие на объекты. Возможность предварительного ранжирования или отбора изображений относительно преобладания и расположения облачности на изображении должна позволить значительно сократить время поиска подходящих снимков для решения прикладных задач [1].

Еще один распространенный способ улучшения подобных снимков – это предварительная обработка данных ДЗЗ: радиометрическая, атмосферная или геометрическая коррекция [2]. Также возможно применение классических методов пространственной фильтрации цифровой обработки изображений [3]. В данной работе рассмотрим возможность применения методов глобальной высокочастотной фильтрации для устранения облачности снимков ДЗЗ.

Описание метода. Рассмотрим в качестве исходных данных снимок дистанционного зондирования Земли окрестностей Тасеевского района Красноярского края (рис. 1). В качестве искажения облачности изображения представлена задымленность на данном участке, причем центральная часть изображения содержит высшую степень искажения, а доковая левая – уже меньшую [4].

Для удобства вычислений зададим размер исследуемой области как степень двойки: 512×512 пикселей (применение преобразования Фурье двумерных сигналов с числом отсчетов, отличным от степени двойки описано в [5–6]). Данное изображение можно представить как функцию $f(x,y)$ яркости пикселя с координатами x и y , принимающую целочисленные значения 0–255 для каждого канала (*red, green, blue*) в цветовой модели *RGB*.

В [3] предлагается домножить все элементы изображения $f(x,y)$ на $(-1)^{x+y}$, а затем вычислить дискретное преобразование Фурье данной функции. В этом случае

мы получим центрированный Фурье-образ $F(u,v)$ в частотной области, в которой высокие частоты (отвечающие за контуры изображения и резкие переходы) окажутся в центре спектра, а низкие частоты (отвечающие за сглаживание изображения и насыщенность цвета) окажутся по краям.

Применим к полученной функции $F(u,v)$ глобальный высокочастотный фильтр, например фильтр высокой частоты (ФВЧ) Гаусса:

$$H(u,v) = 1 - \exp\left(\frac{-D^2(u,v)}{2 \cdot D_0^2}\right),$$

где $D(u,v)$ – расстояние от центра Фурье-образа до точки с координатами (u, v) ; D_0 – частота среза. График ФВЧ Гаусса представлен на рис. 2.



Рис. 1. Снимок поверхности с задымлением

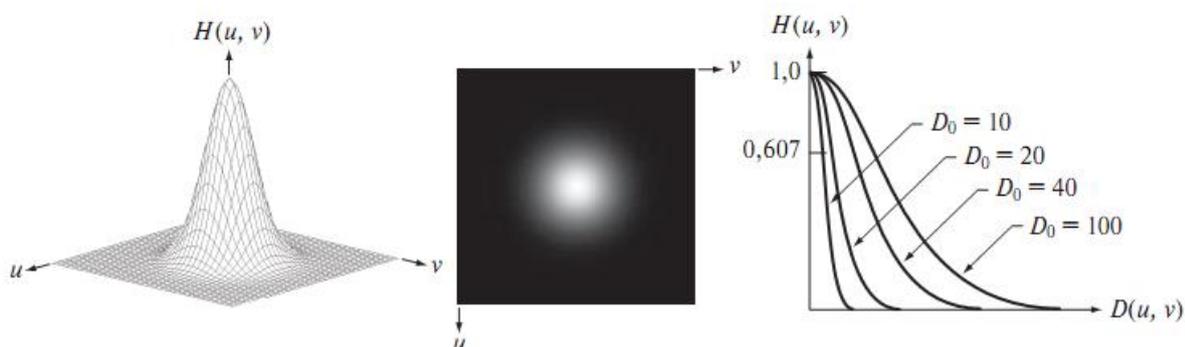


Рис. 2. График функции ФНЧ Гаусса (слева), полутоновое изображение фильтра (в центре), радиальные профили фильтров для различных значений D_0 (справа)

В результате фильтрации высокие частоты останутся без изменений, а низкие частоты за пределом радиуса D_0 будут обнулены. После этого вычисляем двумерное обратное преобразование Фурье, домножаем все отсчеты полученной функции на $(-1)^{x+y}$ для отмены центрирования и получаем обработанное изображение $f_1(x,y)$.

Полученные результаты. Полученный результат фильтрации представлен на рис. 3. На изображении резко очерчены контуры объектов, отсутствует насыщенность цвета. При этом довольно редкая задымленность в левой части снимка уже не видна, но при этом остается заметной более плотная очерченная дымка в центре.

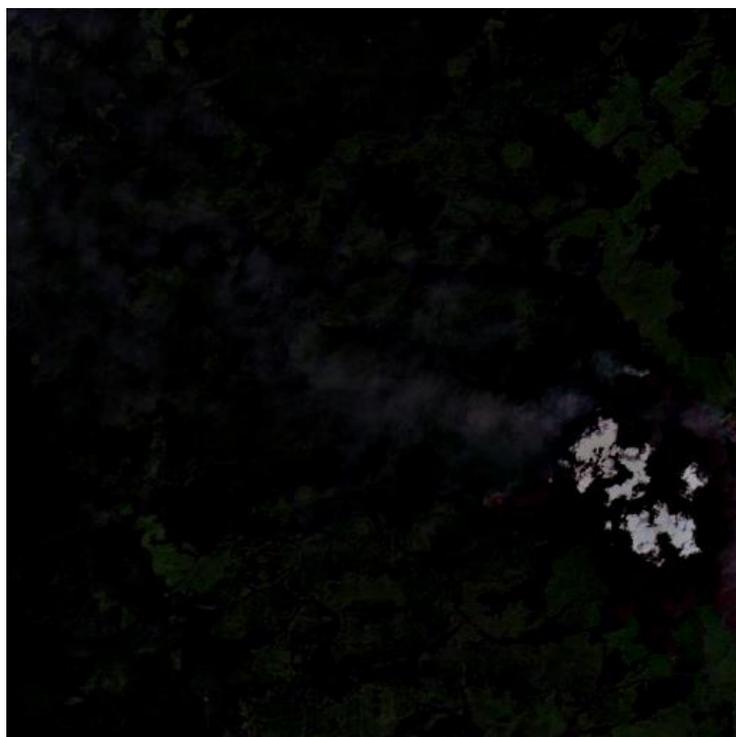


Рис. 3. Результат применения ФВЧ Гаусса с $D_0 = 4$

Теперь объединим полученный результат фильтрации с исходным снимком. Итоговый результат цифровой обработки представлен на рис. 4.



Рис. 4. Результат глобальной высокочастотной фильтрации

Заключение. На примере снимка задымленной поверхности Тасеевского района Красноярского края показан способ применения глобальной высокочастотной фильтрации для улучшения изображения. В результате обработки разреженная дымка в левой части исходного снимка становится менее заметной. При этом плотная задымленность в центре стала более разреженной, но не пропала окончательно, так как в высокочастотном спектре границы этой облачности оказывают существенное влияние на изображение.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ-2020-0011).

Список литературы

1. Измерение облачности на снимках, полученных со спутника SPOT-4 / Е.А. Мальцев, Э.Е. Сиротин, Д.А. Перфильев, Г.М. Цибульский // J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. Т. 2, № 5. С. 229–242.
2. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. политехнич. ун-та, 2010. 148 с.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
4. Снимок Тасеевского района Красноярского края от 30.07.2020. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.
5. Noskov M.V., Tutatchikov V.S. Modification of a two-dimensional fast fourier transform algorithm by the analog of the cooley-tukey algorithm for a rectangular signal // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25, № 1. P. 81–83.
6. Noskov M., Tutatchikov V. Application of two-dimensional fast Fourier transform algorithm, analog of the Cooley-Tukey algorithm, for 4k fixed format digital image of satellite data in frequency domain processing // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 149, № 02010.

V.S. Tutatchikov, M.V. Noskov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: vtutatchikov@sfu-kras.ru; mvnoskov@yandex.ru

APPLICATION OF HIGH FREQUENCY FILTRATION TO REMOVE CLOUD IN REMOTE SENSING IMAGES

At present, methods of digital processing of Earth remote sensing images are widely used to improve the image quality. For example, many images are rejected due to high clouds in the images, obscuring the objects of interest. In this paper, the possibility of using high-frequency global filters to reduce cloudiness in the image is considered, the results of image enhancement are shown.

Keywords: digital signal processing, high frequency filtering, Earth remote sensing.

Секция

**МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ**

УДК 528.8

О.П. Архипкин¹, Г.С. Сагатдинова, Ж.А. Бралинова

¹Кандидат физико-математических наук

Национальный центр космических исследований и технологий, Алматы, Казахстан

e-mail: oarkhipkin@rambler.ru; mkmikikz@mail.ru

**АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДАННЫХ
КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПАВОДКОВ**

Формирующиеся в процессе космического мониторинга паводков многолетние временные ряды зон затопления дают возможность решать ряд задач. Эти ряды позволяют для исследуемой территории проводить оценки по степени риска наводнений, потенциального развития паводков, многолетней тенденции развития паводковой ситуации и т.д. Наиболее представительные результаты получаются при использовании данных низкого разрешения MODIS. Но в последние годы появление в свободном доступе оптических и радарных данных среднего разрешения также позволяет начать формирование на их основе представительных многолетних временных рядов зон затопления. Приведена также методика оценки зон затопления в период, предшествующий времени съемки с использованием коэффициента влажности. В качестве примеров приведены результаты для водных объектов Казахстана.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг паводков, зоны затопления, многолетний временной ряд, оптические данные, радарные данные.

Исследованием различных аспектов космического мониторинга паводков и наводнений наша организация занимается почти 20 лет, в том числе прикладными задачами. В числе таких задач было проведение с 2002 по 2016 г. оперативного космического мониторинга прохождения паводковых вод в интересах нескольких областных органов, результаты которого часто докладывались и республиканским органам ЧС.

Главной задачей оперативного мониторинга является определение зон затопления. Со временем для ряда областей были сформированы многолетние временные ряды зон затопления, полученные по данным космического мониторинга. Эти ряды было предложено использовать для районирования по степени риска наводнений и оценки потенциального развития паводков на основе анализа многолетних временных рядов ДДЗ. До 2014 г. при космическом мониторинге основными были данные низкого разрешения MODIS, а данные среднего разрешения носили вспомогательный характер, так как они получались нерегулярно.

В последние годы ситуация существенно изменилась в связи с появлением в свободном доступе большого количества данных среднего разрешения (оптических *Landsat-8* и *Sentinel-2A* и *2B*, радарных *Sentinel-1A* и *1B*). Это дает возможность

проводить по ним космический мониторинг паводков на регулярной основе и начать формирование многолетних временных рядов зон затопления, но пока временная глубина такого ряда небольшая. В то же время данные MODIS позволяют строить такие ряды глубиной до 20 лет.

Формирование многолетних временных рядов зон затопления для всех систем ДЗЗ проходит по одной схеме. На начальном этапе проводится тематическая обработка космоснимков, по результатам которой выделяются зоны затопления при их наличии. Из данных с зонами затопления, в зависимости от постановки задачи, можно сформировать различные временные ряды (недельный, декадный, месячный, сезонный). Формируя подобным образом данные о зонах затопления по каждому году рассматриваемого периода на исследуемой территории, получаем в результате многолетний временной ряд зон затопления для этой территории за этот период. Есть много методов исследования полученного ряда. В данной статье рассматривается следующий подход.

Из многолетнего временного ряда строятся два других, достаточно простых по структуре, ряда. Первый ряд образуют суммарные годовые зоны затопления, которые характеризуют все территории, затопляемые в конкретном году на рассматриваемой территории. На основе этого ряда проводится районирование по степени риска наводнений и оценка многолетней тенденции развития паводковой ситуации.

Второй ряд образуют зоны затопления, равномерно расположенные по возрастанию – от минимального к максимальному значению. Ряд формируется из всей совокупности данных, содержит сравнительно небольшое число членов, которое зависит от величины максимального значения. При картографическом представлении этот ряд используется для отображения (прогнозирования) последовательности зон затопления на исследуемой территории и отражает реальный рельеф местности.

Сравним теперь возможности многолетних временных рядов зон затопления, получаемых по данным низкого и среднего разрешения. Данные MODIS пока намного превосходят другие по глубине временного периода. Также раньше они существенно превосходили их и по полноте представления данных ввиду длительного периода повторной съемки и малого числа доступных спутников среднего разрешения. Теперь их группировка достигла пяти спутников: *Landsat-8*, *Sentinel-2A* и *B*, *1A* и *B*.

Все эти спутники имеют близкое разрешение (*Sentinel-2* может предоставлять снимки разрешением 20 м), что позволяет использовать их совместно, существенно увеличивая полноту представления данных о зонах затопления. Особо отметим радарные данные, не зависящие от времени суток и облачности, высокая степень которой часто характерна для периода прохождения паводковых вод. Данные низкого разрешения MODIS позволяют получить многолетний временной ряд зон затопления за длительный период. Так, на рис. 1 представлен такой ряд суммарных зон затопления за 17 лет для казахстанской части бассейна реки Сырдарья. Из него видно, что с 2012 г. произошло в целом существенное уменьшение зон затопления, что во многом вызвано вводом в строй Коксарайского контррегулятора.

Образцы суммарных зон затопления в картографическом и диаграммном виде, полученных по данным среднего разрешения, представлены на рис. 2. Отметим, что небольшая величина зон затопления в 2016 г. обусловлена также малым количеством снимков среднего разрешения. На рис. 3 представлены результаты районирования по степени риска затопления (частота фиксации зон затопления за период наблюдения) и последовательность затопления территории в районе города Атбасара бассейна реки Жабай.

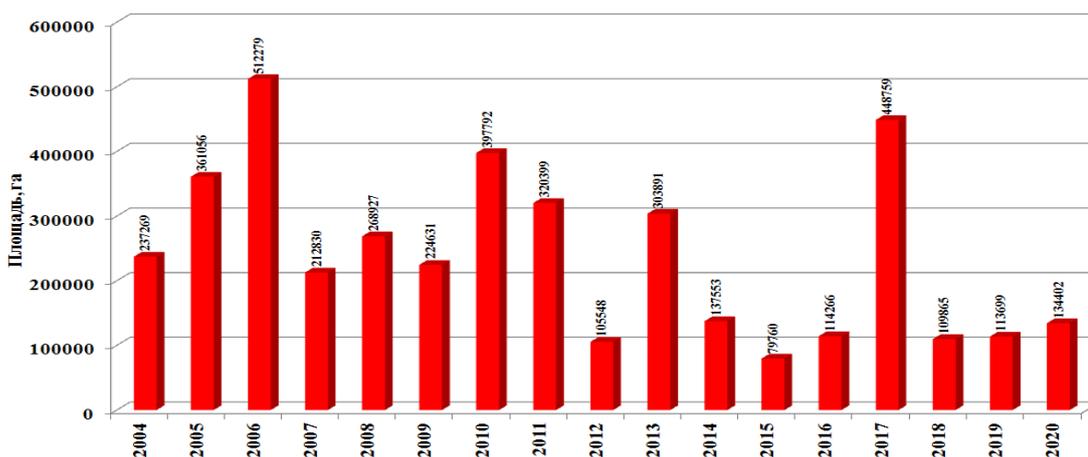
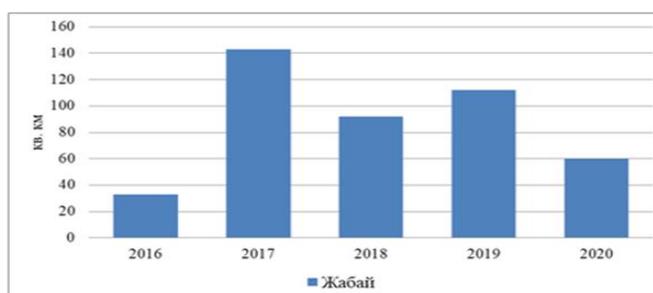


Рис. 1. Динамика площадей суммарных зон затопления по данным MODIS казахстанской части бассейна реки Сырдарья за 2004–2020 гг.

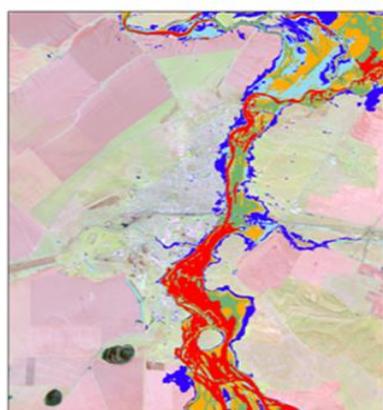


а



б

Рис. 2. Суммарные зоны затопления бассейна реки Жабай за 2017 г. (а) и их динамика в районе города Атбасар за 2016–2020 гг. (б) по данным Sentinel-1 и 2



а



б

Рис. 3. Районирование по степени риска наводнений (а) и последовательная динамика затопления в районе города Атбасар (б) по данным Sentinel-1 и 2 за 2016–2020 гг.

Для оценки зон затопления в период, предшествующий времени съемки, предлагается использовать ближайший после исследуемого события космоснимок Sentinel-2, с помощью которого фиксируются текущие зоны затопления, а исчезнувшие зоны затопления определяются с помощью коэффициента влажности. Так, при прорыве плотины Сардобинского водохранилища 1 мая ближайший снимок Sentinel-2 был 4 мая. В это время часть зон затопления за предыдущие дни уже ис-

чезла, но, используя коэффициенты влажности, можно выделить территории с его существенным значением (рис. 4). Эти территории можно трактовать как подвергнувшиеся существенному водному воздействию.

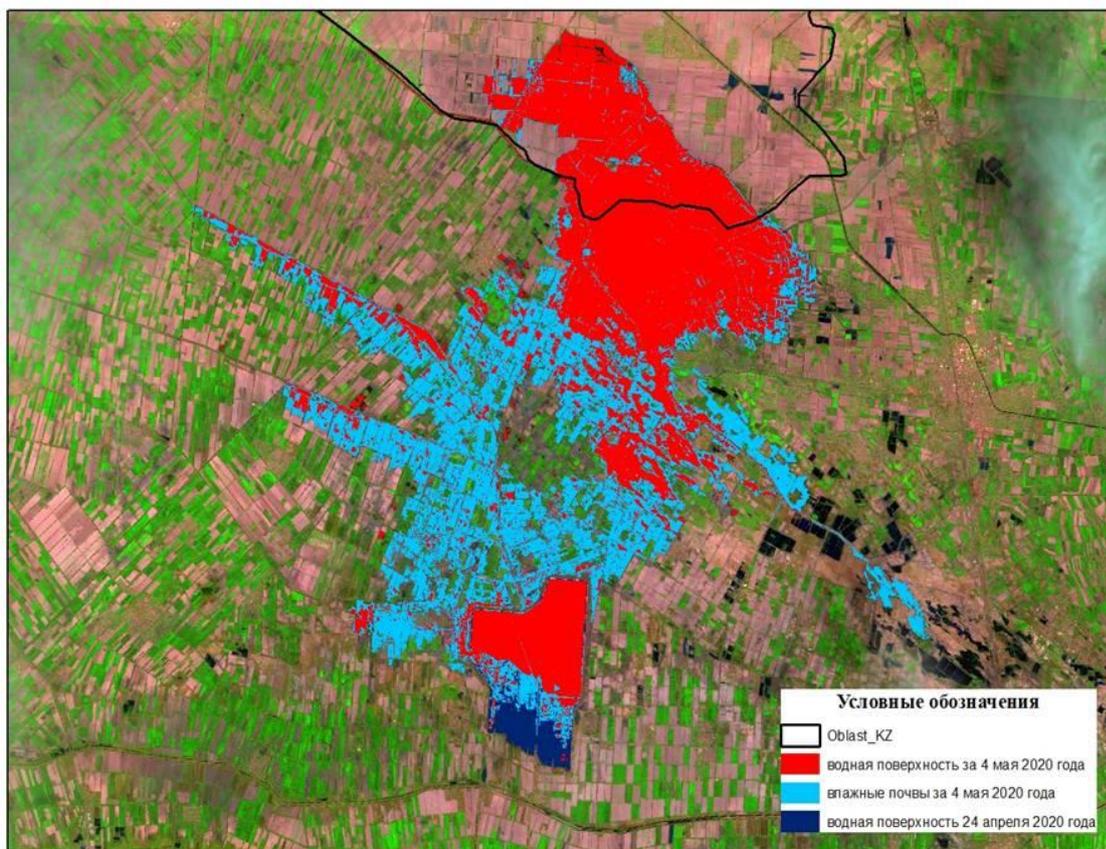


Рис. 4. Мониторинг с использованием коэффициента влажности территории в районе Сардобинского водохранилища по данным *Sentinel-2* за 4 мая 2020 г.

O.P. Arkhipkin, G.N. Sagatdinova, Zh.A. Bralinova
National Center for Space Research and Technology, Almaty, Kazakhstan
e-mail: oarkhipkin@rambler.ru; mkmikikz@mail.ru

ANALYSIS OF LONG-TERM TIME SERIES DATA FROM SPACE MONITORING OF FLOODS

Long-term time series of flood zones formed in the process of space monitoring of floods make it possible to solve a number of tasks. These series allow for the study area to carry out assessments on the degree of flood risk, potential development of floods, long-term trends in the development of a flood situation, etc. The most representative results are obtained using low-resolution MODIS data. But in recent years, the appearance of medium-resolution optical and radar data in free access also allows us to begin the formation of representative multi-year time series of flood zones on their basis. The methodology of estimating flood zones in the period preceding the survey time using humidity coefficient is also presented. The results for water objects of Kazakhstan are given as examples.

Keywords: remote sensing, space monitoring of flood, flood zones, long time series, optical data, radar data.

А.Ю. Белоносов

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия
e-mail: belonosov74313@mail.ru

**ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА ЮЖНОГО СЕГМЕНТА УРАЛО-КАЗАХСКОГО
КРАЕВОГО ПРОГИБА В СВЯЗИ С НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬЮ
ДОЮРСКОГО ФУНДАМЕНТА**

Южный сегмент Урало-Казахского краевого прогиба на территории Российской Федерации отождествляется с центральным и восточным районами Курганской области. Доюрский фундамент представлен карбонатными, терригенно-карбонатными, вулканогенными и осадочно-вулканогенными породами среднего и верхнего девона соответственно, нижнего, среднего и верхнего карбона, ранней пермью и нижнего, среднего и верхнего триаса. Геохимические исследования органического вещества палеозоя (D_3-C_1) не исключают возможности обнаружения в этих отложениях залежей нефти и газа. Расчет физических характеристик земной поверхности по материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса (в видимом, ближнем и дальнем инфракрасном диапазонах), включая процедуру эталонной классификации, где эталонами являются ближайшие месторождения нефти и газоконденсата в доюрских отложениях, показал, что в центральной части Курганской области выявлена структура перспективная на обнаружение залежей углеводородов (УВ).

Ключевые слова: нефтеперспективность доюрского фундамента, интерпретация материалов ДЗЗ из космоса, видимый, ближний и дальний инфракрасный диапазон, эталонная классификация.

Южный сегмент Урало-Казахского краевого прогиба на территории Российской Федерации отождествляется с центральным и восточным районами Курганской области.

Сотрудниками ЗапСибНИГНИ (г. Тюмень), ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) и Западно-Сибирского филиала ИНГГ СО РАН (г. Тюмень), ЗапСибНИИГГ (г. Тюмень) в разное время, в период с 2000 по 2020 г., были проведены многочисленные переинтерпретации результатов геологоразведочных работ на нефть и газ в доюрских отложениях этого региона [1–17].

Анализ истории формирования доюрских тектонических комплексов, а также их генезиса и современного структурного плана, позволил выделить главные тектонические элементы (с запада на восток):

- Денисовско-Шадринская зона (восточная зона Урала);
- Рудненско-Исетская шовная зона;
- Тоболо-Ишимский палеозойский бассейн;
- выступы каледонского основания северо-западной окраины Центрального Казахстана.

Нефтегазоносность доюрского фундамента связывается с восточной частью Курганской области в основном с палеозойскими резервуарами и ловушками, а также с впадинами, заполненными триасовыми отложениями. Известняки верхнего девона и нижнего карбона особенно выделяются среди других отложений по качеству фильтрационно-емкостных свойств.

Геохимические исследования органического вещества палеозоя (D_3-C_1) не исключают возможности обнаружения в этих отложениях залежей нефти и газа [5; 21].

Степень изученности Курганской территории геолого-геофизическими и геохимическими работами чрезвычайно мала, поэтому для детальной оценки перспективности недр на малоизученных территориях применяются спутниковые технологии с использованием распознавания образов и нейронных сетей [22–27].

Для решения выше поставленных задач были использованы космические материалы в видимом, ближнем и дальнем инфракрасном диапазонах (космические снимки масштаба 1:500 000, фрагменты глобальной мозаики, снятые сканером ETM+ спутника *Landsat-7* в спектральном диапазоне 0,53–0,90 и 1,55–1,75 мкм, а также цифровая модель рельефа (ЦМР) – SRTM DEM на основе данных сенсоров SIR-C и X-SAR космического аппарата Шаттл).

Анализ размещения месторождений УВ на материалах ДЗЗ из космоса показал, что большинство месторождений нефти и газа зафиксированы вблизи линейных тепловых зон. Эти зоны, как правило, отображают активные флюидопроводящие транзитные разломы, выходящие из фундамента и секущие весь осадочный чехол до дневной поверхности. На картах более крупного масштаба месторождения нефти и газа приурочены к локальным тепловым аномалиям либо к их «кольцам». Данный факт подтверждается верификационными наземными геотермическими и геохимическими съемками. Многократная тепловая космическая съемка является первым шагом в определении нефтегазоперспективности структурно-тектонических элементов доюрского фундамента на малоизученных территориях Курганской области.

Далее применяется методика [22–27], которая включает расчет физических характеристик земной поверхности, таких как плотность потока суммарной солнечной радиации, альbedo, коэффициент излучения, тепловая инерция земной поверхности, конвективный тепловой поток из недр, суточное испарение влаги земной поверхности, влажность почвы, цифровая модель рельефа, структура грунта, метеорологические условия, концентрация в атмосфере оптически активных газов и т.д.

В качестве обучающей выборки использованы нефтяные, нефтеконденсатные и газоконденсатные месторождения, приведенные в ГИС «Природные ресурсы России». Для анализа было выбрано несколько эталонов, представляющих набор признаков земной поверхности на уже известных месторождениях нефти и газа, находящихся поблизости с Курганской областью, а именно Малоичское, Верхне-Тарское и Тай-Дасское. Все месторождения находятся на севере Новосибирской области. Нефтяные притоки получены из доюрских отложений.

Набор признаков земной поверхности с этих месторождений был зафиксирован на южной и северо-восточной части Аргульского куполовидного поднятия (КП), выявленного сейсморазведкой 2D.

Кроме этого, Аргульское КП полностью находится в пределах отрицательной гравитационной аномалии (геофизический поисковый признак). Также в результате газобиохимической съемки на склонах Аргульского КП были обнаружены углеводород-окисляющие бактерии (геохимический поисковый признак), а по результатам наземной углеводородно-геофизической съемки были зафиксированы контрастные

аномалии аренов (гомологи бензола), что соответствует отображению на дневной поверхности нефтяной залежи (геохимический поисковый признак).

Таким образом, проведенные исследования позволяют с определенной уверенностью констатировать, что доюрский фундамент непременно должен содержать залежи углеводородов.

Список литературы

1. Результаты проведения геохимических нефтепоисковых исследований на юге Западной Сибири / А.Р. Курчиков, А.Ю. Белоносов, Р.И. Тимшанов [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конг. Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. материалов: в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 3. С. 227–234.
2. Количественная оценка суммарных начальных ресурсов (СНР) нефти, газа и конденсата северо-восточной части Курганской области / А.В. Рыльков, В.В. Потеряева, Н.П. Кирда [и др.] // Отчет по договору № 54-00 с Комитетом природных ресурсов по Курганской области в двух томах. Т. I (текст отчета). Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 2001. 196 с. ТФГИ по Курганской области.
3. Хроматографические и хроматомасс-спектрометрические исследования триас-палеозойских отложений восточных районов Курганской области / А.Р. Курчиков, А.Н. Белоносов [и др.]. Тюмень: ЗСФ ИННГ СО РАН, 2009. 265 с.
4. Обобщение и анализ результатов геологоразведочных работ с целью уточнения геологического строения доюрского и плитного комплексов на базе нового фактического материала и выявление наиболее перспективных зон и объектов нефтегазоаккумуляции в юго-западных районах Западно-Сибирской геосинеклизы (юг Тюменской области и сопредельные территории). Кн. 1 // Отчет по государственному контракту № 70-154-05 от 01.09.2005; науч. рук. Ю.А. Цимбалюк. Тюмень: ФГУП «ЗапСибНИИГГ», 2007. 269 с.
5. Костырева Е.А. Геохимические критерии нефтегазоносности палеозойских отложений юго-запада Западной Сибири (Курганская область) // Геология нефти и газа. 2014. № 1. С. 134–138.
6. Кирда Н.П. Девонские и каменноугольные отложения Тургайского прогиба и перспективы их нефтегазоносности // Изв. АН Казахской ССР. 1971. № 1. С. 24–35.
7. Кирда Н.П. К проблеме нефтегазоносности доюрских комплексов в центральных районах Западной Сибири и Южном Зауралье // Нефтегазовая геология. 2013. № 3. С. 39–49.
8. Кирда Н.П. Основные черты тектоники доюрских комплексов Южного Зауралья и юго-запада Западной Сибири // Структурные элементы земной коры и их эволюция. Новосибирск: Наука, 1983. С. 135–144.
9. Кирда Н.П. Перспективы нефтегазоносности доюрских комплексов Зауралья // Горные ведомости. 2013. № 10. С. 20–39.
10. Кирда Н.П. Перспективы открытия месторождений углеводородов в доюрских комплексах Западной Сибири и Южном Зауралье // Тр. Междунар. Конф. геофизиков и геологов. Тюмень, 4–7 декабря 2007. С. 1–5.
11. Особенности геологического строения, перспективы нефтегазоносности Тургайского прогиба и задачи региональных геолого-геофизических работ / Н.П. Кирда, П.И. Краев, С.К. Курманов [и др.] // Геология нефти и газа. 1971. № 7. С. 29–33.
12. Кирда Н.П., Запивалов Н.П., Полковников М.П. Основные черты тектонического развития и перспективы нефтегазоносности комплекса пород доюрского возраста в северной части Зауральского прогиба // Геологическое строение и нефтегазоносность юга Западной Сибири по новым данным: тр. ЗапСибНИГНИ. Тюмень, 1976. Вып. 116. С. 121–134.
13. Куликов П.К. Геологическое строение и история развития Западной Сибири в палеозойскую эру в связи с проблемой нефтегазоносности. М.: Наука, 1968. 55 с.
14. Мизенс Г.А., Кокшина Л.В. Условия осадконакопления в среднепалеозойских бассейнах на юго-западе Западной Сибири (зона сочленения уральских и казахстанских

структур) // *Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазонаосности: материалы Всерос. науч. конф. Тюмень – Новосибирск. 2010. С. 111–113.*

15. Стратиграфия и условия образования девонских и каменноугольных отложений Тобол-Убаганского поднятия и Вагай-Ишимской впадины (юго-западная окраина Западной Сибири) / Г.А. Мизенс, Н.А. Кучева, Т.И. Степанова [и др.] // *Литосфера. 2011. № 4. С. 20–44.*

16. Палеозойские отложения Западной Сибири – новый объект нефтегазопроисковых работ / Н.П. Запивалов, В.С. Вышемирский, Б.С. Мишинов [и др.]; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука. Новосибирск: ИНИГ СО РАН, 2016. 46 с.

17. Воронов В.Н., Цимбалюк Ю.А., Смирнов Л.В. Доюрские комплексы Западной Сибири – актуальные нефтегазонаосные объекты // *Наука и ТЭК. 2011. № 6. С. 43–50.*

18. О нефтегазонаосности восточной части Курганской области (Вагай-Ишимская впадина) / А.В. Рыльков, В.В. Потеряева, Н.Х. Кулахметов, А.П. Южалин // *Нефтяная геология и условия формирования залежей углеводородов: избр. тр. Тюмень: типография «Альфа-СТАМП» (ИП Суровежко О.С.), 2016. С. 198–205.*

19. Количественная оценка суммарных начальных ресурсов (СНР) нефти, газа и конденсата северо-восточной части Курганской области / А.В. Рыльков, В.В. Потеряева, Н.П. Кирда [и др.] // *Отчет по договору № 54-00 с Комитетом природных ресурсов по Курганской области: в 2 т. Т. I (текст отчета). Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 2001. 196 с. ТФГИ по Курганской области.*

20. Количественная оценка суммарных начальных ресурсов (СНР) нефти, газа и конденсата северо-восточной части Курганской области / А.В. Рыльков, В.В. Потеряева, Н.П. Кирда [и др.] // *Отчет по договору № 1 (54-00) с Комитетом природных ресурсов по Курганской области: в 2 т. Т. II (графические приложения). Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 2001. 19 прил. ТФГИ по Курганской области.*

21. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и перспективы нефтегазонаосности палеозойских отложений на юго-западе Западной Сибири // *Горные ведомости, 2008. № 5. С. 18–23.*

22. Горный В.И., Крицук С.Г. Прогноз нефтеперспективных площадей в республике Чувашия на основе визуального и инструментального анализа цифровых космических материалов // *II Междунар. конф. «Перспективы развития и освоения топливно-энергетической базы Северо-Западного экономического района Российской Федерации»: тез. докл. 2000. С. 41–42.*

23. Горный В.И., Степанов И.В. Комплексирование тепловой многоспектральной и аэромагнитной съемок при решении прогнозно-поисковых задач // *Разведка и охрана недр. 2001. Вып. 9. С. 39–43.*

24. Белоносов А.Ю., Туренко С.К. Интерпретация спутниковых данных конвективно-теплого потока при прогнозировании залежей углеводородов в Курганской области // *Изв. вузов. Нефть и газ, 2009. № 6. С. 4–9.*

25. Белоносов А.Ю., Каленицкий А.И. Верификация материалов дистанционного зондирования земли для оценки нефтегазонаосности малоизученных и малоперспективных территорий (на примере Курганской области) // *Вестн. СГУГиТ. 2015. Вып. 3 (31). С. 70–78.*

26. Применение дистанционных и заверочных наземных работ для оценки перспектив нефтегазонаосности Вагайско-Ишимской впадины / А.Ю. Белоносов, Р.И. Тимшанов, А.Е. Кудрявцев, С.А. Шешуков // *Академич. журн. Западной Сибири. 2016. Т. 12, № 3 (64). С. 5–6.*

27. Структурно-геодинамический анализ геофизических и космических материалов южной части Западно-Сибирской плиты / А.Ю. Белоносов, Д.В. Борисов, А.Е. Кудрявцев, С.А. Шешуков // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь – 2017: материалы XIII Междунар. науч. конгр. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ. 2017. Т. 2. С. 172–175.*

Л.В. Бродт¹, А.В. Соромотин², R.J. Heim³, N. Hölzel³

¹Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

²Доктор биологических наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

³Вестфальский Университет имени Вильгельма (Университет Мюнстера)
e-mail: leya.brodt@mail.ru

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПОСЛЕПОЖАРНЫХ СУКЦЕССИЙ СУБАРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Исследована долгосрочная динамика растительного покрова посредством данных ДЗЗ и нормализованного дифференцированного вегетационного индекса (NDVI). Выявлено, что количество биомассы на гари тундровой зоны Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) восстановилось через 8 лет после пожара. В 2017–2018 гг. индекс показывает стабильное значение 0,67, что на 130 % выше фонового. На горевших участках произошла кардинальная смена флористического состава: с кустарничково-лишайникового на кустарниковый. Измерения показали, что на гарях мощность сезонного слоя больше, чем на фоновых участках.

Ключевые слова: NDVI, пожары, Западная Сибирь, многолетняя мерзлота, растительность.

Недавние исследования показали, что площадь, подверженная пожарам, в лесотундровой зоне Западной Сибири в период 1985–2018 гг. составила 10,5 % [1]. При этом, количество гарей одного возраста за последние десятилетия только возрастает. Определяющей причиной является масштабное освоение месторождений углеводородного сырья, основные площади которых сконцентрированы в центральной части лесотундровой зоны Западной Сибири. В современных исследованиях динамики растительного покрова удаленных районов арктической и субарктической зонах часто применяются данные дистанционного зондирования Земли. Для выявления изменений фотосинтетически активной биомассы используются вегетационные индексы, полученные эмпирическим путем [2].

Вегетационные индексы выбираются под определенную задачу, но в большинстве исследований предпочтение отдается NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ввиду простоты его расчета и информативности. Использование данного индекса позволяет решать многие задачи, среди которых оценка воздействия инфраструктуры нефтегазовых месторождений на прилегающий к ней растительный покров, выявление изменений в вегетационном периоде [3], оценка трансформации и восстановления растительности.

Многими исследованиями отмечалась экспансия кустарниковых сообществ в зону тундры в связи с потеплением климата, но реально существует еще один фактор смены типично тундрового флористического состава на лесотундровый – пожары, инициирующие смену растительных ассоциаций. Это связано с тем, что при пожарах мохово-лишайниковый покров сгорает полностью и на его восстановление может уйти порядка 40–50 лет [4], в то время как кустарники занимают освободившиеся площади в течение 3–8 лет.

В данном исследовании была проведена оценка трансформации растительности на территории пожара, произошедшего в 1990 г., с использованием данных *Landsat* и расчетом NDVI.

Территория исследования расположена в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) в 50 км южнее п. Тазовский (рис. 1).

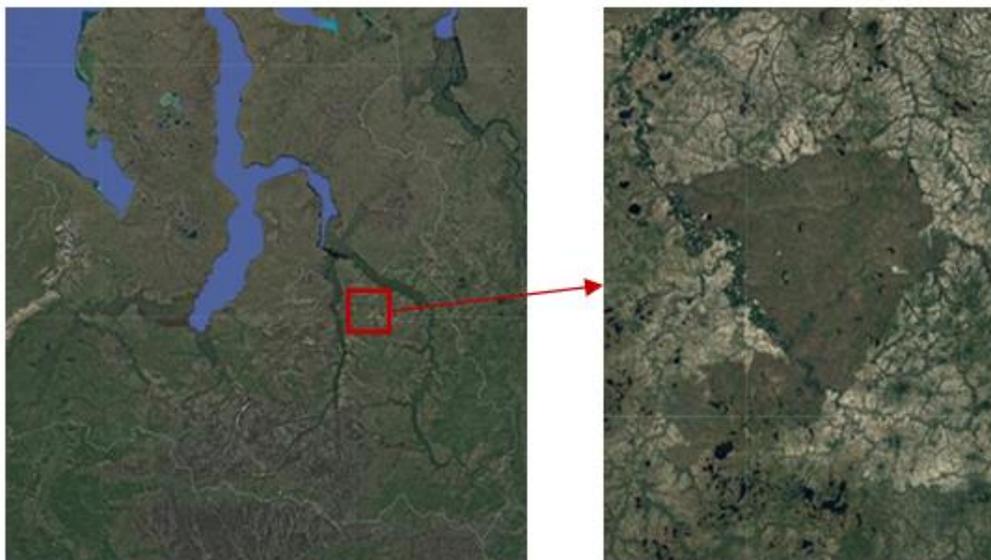


Рис. 1. Территория исследования (источник: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Для анализа динамики восстановления растительности после пожара использовались данные дистанционного зондирования Земли, а именно космоснимки *Landsat* 5 TM, 7 ETM, 8 ETM+ с летней датой максимальной вегетации тундровых сообществ в период 1990–2018 гг. и рассчитывался NDVI для количественной оценки биомассы растительных сообществ.

Для расчета NDVI было подобрано 18 космоснимков *Landsat*, позволяющие оценить фотосинтетически активную биомассу растительности на исследуемых точках на даты до пожара, сразу после пожара и в течение 28 лет после.

Значения NDVI на фоновых участках возрастают, что подтверждает влияние глобального потепления и, возможно, уменьшение мощности сезонно-талого слоя. Исследования отмечают, что основными природными факторами, влияющими на значение индекса, являются температура воздуха в летний период и суммы осадков, начиная с даты установления снежного покрова в течение предшествующего исследованию года [5]. На горевших участках значение индекса постоянно увеличивается и к 2018 г. превышает фоновые более чем на 130 % (рис. 2).

Нами были подобраны 2 космоснимка, по которым удалось получить значения NDVI до пожара и сразу после пожара. На рисунке можно видеть снижение значений и на фоновых участках, и на горевших (рис. 3). Это, прежде всего, связано с датой наблюдения (конец августа), что определяет конец вегетационного периода для негоревших участков. Количество биомассы снизилось почти в два раза, что говорит о полном сведении напочвенного растительного покрова.

В 2018 г. была организована экспедиция для изучения влияния пирогенного фактора на растительность и многолетнемерзлые породы. В ходе полевых работ были заложены 20 пробных площадей 10×10 м, составлены геоботанические описания и измерены показатели глубины залегания многолетнемерзлых пород. Площадки были удалены друг от друга минимум на 100 м, на расстоянии не меньше 50 м от границы гари в обе стороны.

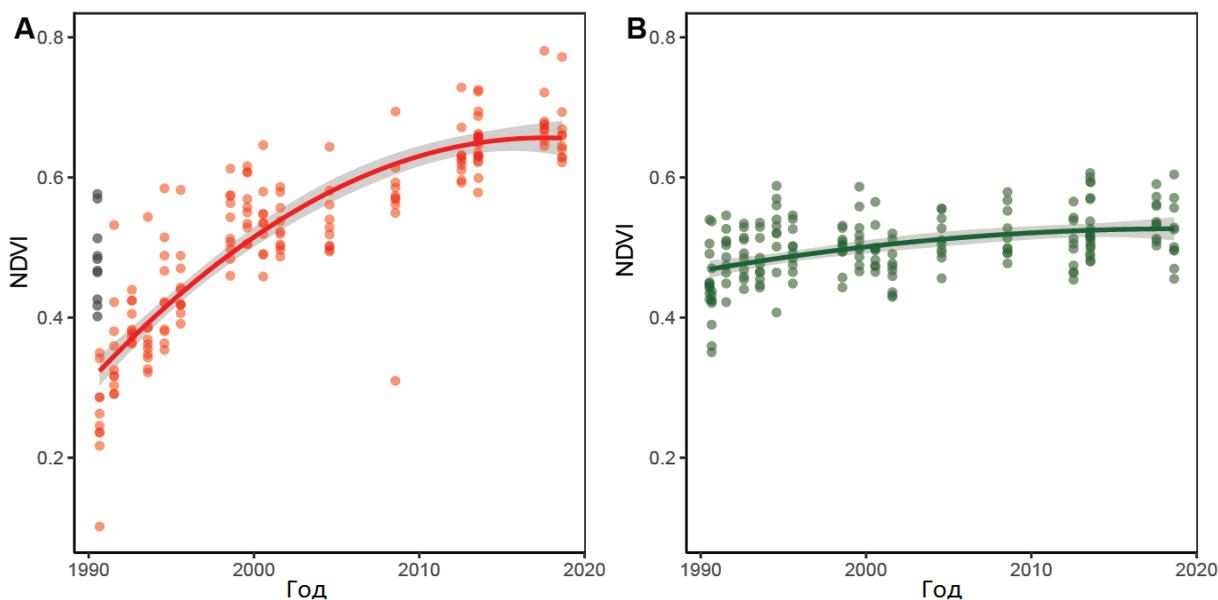


Рис. 2. Динамика NDVI в период 1990–2018 гг.:
A – на гари; *B* – на фоновых негоревших участках

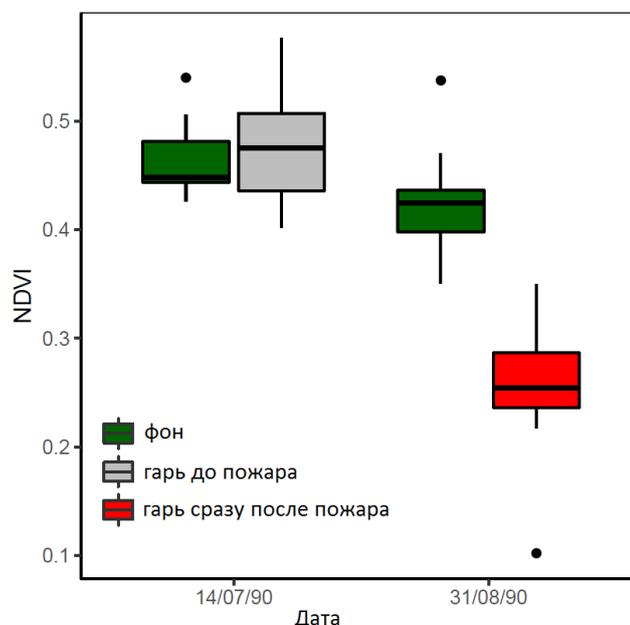


Рис. 3. Сравнение значений NDVI на фоновых участках
и на гари до и после пожара

Растительность, по классификации Ильиной И.С., на негоревших участках представлена типичными мохово-лишайниковыми тундрами с лиственничными редколесьями. Мощность сезонно-талого слоя колеблется от 42 до 70 см, доля лишайниковых сообществ в общем проективном покрытии составляет 95 %.

На гарях отмечается преобладание кустарниковых сообществ (30–40 %), мощность деятельного слоя меняется от 57 до 108 см. С одной стороны, кустарники создают тень в летний период, тем самым препятствуют проникновению тепла вглубь почвенного профиля, а с другой – они хорошо удерживают снег, способствуя его накоплению, в результате чего в холодное время года температура грунтов увеличивается [6]. Оттаивание многолетней мерзлоты способствует увеличению массы корней, а также их глубины проникновения, что не может не сказываться на продуктивности самих кустарников.

Сравнение полевых данных и данных дистанционного зондирования Земли показывает достоверность рассчитываемых показателей NDVI. Использование вегетационных индексов позволяет отслеживать состояние экосистем отдаленных районов без больших затрат, при этом полученные данные можно использовать для отслеживания, а также прогнозирования динамики растительности. Данное исследование подтверждает экспансию кустарников не только в результате потепления климата, но и в результате частых и обширных пожаров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта №19-45-890008.

Список литературы

1. Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири / Д.В. Московченко, С.П. Арефьев, М.Д. Московченко, А.А. Юртаев // Сибирский экологический журнал. 2020. № 2. С. 243–255.
2. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Scheel, D.W. Deering // Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium – 1974. Vol. 1. P. 48–62.
3. Московченко Д.В., Московченко М.Д. Оценка современной динамики ландшафтов Заполярного месторождения с использованием спутниковых данных // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Серия: Экология и природопользование. 2018. Т. 4, № 2. С. 6–16.
4. Магомедова М.А. Восстановление лишайникового покрова на горях в предтундровых лесах Западной Сибири // Биота Ямала и проблемы региональной экологии. Науч. вестн. 2006. Вып. 1 (38). С. 27–38.
5. Изменение состояния растительности и геоэкологических условий Тазовского полуострова (восточная часть) за период 1988–2016 гг. / Д.В. Московченко, С.П. Арефьев, В.А. Глазунов, А.А. Тигеев // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 6. С. 3–13.
6. Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions / Q. Yu, H.E. Epstein, R. Engstrom [et al.] // Environmental Research Letters. 2005. № 10 (12). 124020.

L.V. Brodt¹, A.V. Soromonin¹, R. J. Heim², N. Hölzel²

¹University of Tyumen, Tyumen, Russia

²University of Münster, Münster, Germany

e-mail: leya.brodt@mail.ru

REMOTE MONITORING OF POST-PIROGENIC SUCCESSIONS OF THE SUBARCTIC ZONE OF WESTERN SIBERIA

The long-term dynamics of vegetation was studied using remote sensing data and the normalized differentiated vegetation index (NDVI). It was revealed that the amount of biomass in the burning of the tundra zone of the Tazovsky region of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug) was restored 8 years after the fire. In 2017–2018, the index shows a stable value of 0,67, which is 130 % higher than the background. In the burning areas, a dramatic change in the floristic composition of plant communities took place: from shrub-lichen to shrub. Measurements showed that on burned-out beds the thickness of the seasonally thawed layer is greater than on the background.

Keywords: NDVI, fires, Western Siberia, permafrost, vegetation.

М.А. Волкова, И.В. Кужевская, В.В. Чурсин, О.Е. Нечепуренко

Национальный исследовательский Томский
государственный университет, Томск, Россия
e-mail: mv2101@mail.ru; o.e.nechepurenko@gmail.com

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЗОН ОБЛЕДЕНЕНИЯ

Показана возможность применения спутниковой информации для диагноза зон обледенения в районе аэродрома Томск. Построенные вертикальные профили температуры воздуха и температуры точки росы по данным ПК MIRS из преобразованного сигнала радиометра AMSU-A с последующим выделением зон возможного обледенения с применением физико-статистических алгоритмов показали возможность обнаружения зоны обледенения с высоким пространственным разрешением. Сравнительная оценка данных радиометра AMSU-A и данных бортовой погоды показала согласованность в обнаружении фактических зон обледенения. Учитывая высокую вероятность возникновения условий обледенения воздушных судов на территории Западной Сибири, предложенный вариант использования спутниковых данных может быть применен в оперативной прогностической работе авиационно-метеорологических подразделений.

Ключевые слова: обледенение воздушных судов, бортовая погода, спутниковое зондирование, MIRS.

Введение. Развитие и совершенствование транспортной системы Сибирского региона, в том числе авиационных перевозок, предполагает предоставление аэронавигационным службам качественной и детальной информации о метеорологических условиях. В настоящее время этот процесс сопровождается совершенствованием измерительной техники, внедрением новых средств дистанционного обнаружения атмосферных явлений, а также развитием компьютерных технологий и численного моделирования. Глобальный аэронавигационный план ИКАО [1], сформулированный на период до 2028 г., предусматривает в будущем полную автоматизацию обеспечения метеорологической информацией в любой точке, на любой высоте, в каждый момент времени.

Отложение льда на поверхности воздушного судна (ВС) во время полета считается одним из наиболее опасных явлений для авиации. При обледенении отмечается уменьшение скорости полета, происходит потеря подъемной силы и (в некоторых случаях) полного контроля над летательным аппаратом. С начала 1990-х гг. информация с геостационарных и полярно-орбитальных метеорологических спутников используется, особенно активно в США и Европе, для диагноза и прогноза обледенения воздушных судов. Различные экспертные системы по обледенению, такие как ADWICE (DLR, Deutscher Wetterdienst и IMuK) [2], SIGMA (Meteo France) [5] и CIP / FIP (NCAR) [3], адаптированы к региону, для которого они применяются. Разработка аналогичных продуктов по диагностике и прогнозу обледенения с использованием спутниковых данных ведется и для территории РФ [6; 7]. Так, для Европейской территории России разработан и внедрен специализированный комплекс программ (SCP), который автоматически попиксельно классифицирует данные EVIRI/Meteosat-10 и AVHRR/NOAA для извлечения характеристик облачности, осадков и погодных условий круглогодично над поверхностью земли, воды и снега/льда. SCP определяет тип

осадков на поверхности земли (13 классов) и опасные явления погоды (гроза, град и обледенение (вероятность/интенсивность)), температуру и высоту верхней границы облаков, I_{\max} (мгновенная максимальная интенсивность осадков, мм/ч) и др.

Материалы и методы. Для диагноза зон возможного обледенения в работе была использована актуальная и доступная в оперативном режиме спутниковая информация микроволнового радиометра AMSU-A, сканирующего исследуемую территорию не менее 8 раз в сутки. AMSU-A представляет собой многоканальный микроволновый радиометр, который производит измерения в 15 дискретных частотных каналах (23÷90 ГГц). 30 последовательных ячеек с разрешением «сцены» отбираются пошаговым сканированием каждые 8 с, причем каждое сканирование охватывает около 50° по обе стороны от подспутниковой точки [8]. Работа по преобразованию обратного сигнала в метеорологические величины проводится с помощью программного комплекса MIRS. ПК MIRS производит восстановление геофизических характеристик атмосферы и подстилающей поверхности по данным КА серии NOAA, MetOp и SUOMI-NPP с пространственным разрешением 48 км в подспутниковой точке [9].

Для расчета используются вертикальные профили температуры на уровнях от 100 до 1 000 гПа, удельного влагосодержания, относительной влажности, температуры точки росы и дефицита точки росы, которые в дальнейшем используют для диагноза и сверхкраткосрочного прогноза зон обледенения с применением различных физико-статистических закономерностей, в частности алгоритма NCEP [4] и объективного метода прогноза обледенения, разработанного в Гидрометцентре СССР (К.Г. Абрамович и И.А. Горлач) [10].

Авторами алгоритма NCEP установлено, что используемые неравенства применяются для определения пространственных зон возможного обледенения как в капельных переохлажденных облаках, зоне переохлажденного дождя, мокрого снега, мороси и т.п. под облаками, так и в случае непосредственной сублимации водяного пара. Восстановление вертикальных профилей метеовеличин происходит при соблюдении условия не превышения 20 км радиуса относительно точки интереса. Для диагноза зон обледенения привлечены сообщения бортовой погоды (PIREPs) с 2011 по 2019 г. в районе аэродрома Томск (всего было рассмотрено 15 случаев).

Результаты. Была проведена верификация восстановленных и фактических (по данным аэрологического зондирования) вертикальных профилей температуры воздуха и удельной влажности. Результаты сравнительного анализа показали, что среднеквадратическая ошибка RMSE для значений температуры и удельной влажности в слое от 1 000 до 500 гПа составляют 2,06 и 0,63 соответственно. Температура воздуха, по данным спутникового зондирования, на нижних уровнях тропосферы занижается менее чем на 0,5 °С, в средней тропосфере данные расчетов системы MIRS завышают значения температуры воздуха на 1–1,5 °С. По данным верификации в теплый период не отмечается занижение значений удельной влажности ни на одном из исследуемых уровней. В процентном отношении погрешность восстановления удельной влажности составляет 12–23 %.

Можно сделать вывод, что согласование профилей, полученных разными способами измерения, находится в пределах ошибок измерения этих измерительных систем.

Рассмотрим подробнее случай умеренного обледенения 7 декабря 2019 г., которое было зафиксировано с 6:39 до 8:38 ВСВ в районе аэродрома Томск. Обледенение наблюдалось в слое от 1 500 до 2 000 м. По метеорологическим данным, наблюдалась разорванно-дождевая и слоисто-кучевая облачность, атмосферные осадки в виде снега. В срок, ближайший к началу обледенения, температура у по-

верхности земли составила минус 4,2 °С, температура точки росы – минус 5,4 °С, относительная влажность – 91 %.

По данным микроволнового радиометра AMSU-A были восстановлены профили температуры и влажности (рисунок), по значениям которых были выделены зоны возможного обледенения. Для диагноза использовались физико-статистические закономерности (алгоритм NCEP и объективный метод прогноза обледенения Гидрометцентра СССР). Информация с радиометра выделила слой обледенения с помощью алгоритма NCEP в диапазоне от 1 000 до 720 гПа, т.е. от земли до 3 200 м, что также подтверждается результатами объективного метода прогноза на уровнях 850, 700 гПа. Зона возможного обледенения самолетов по алгоритму NCEP показана вертикальным профилем, для удобства визуального восприятия каждому уровню присваивается классификационный номер по оси X (0 – нет обледенения, 5 – обледенение возможно) в зависимости от соблюдения необходимых условий по температуре воздуха и относительной влажности. Таким образом, пространственная локализация слоя с обледенением по данным бортовой погоды подтверждается данными спутникового зондирования. Следует отметить, что метод Гидрометцентра также показал зону возможного обледенения на уровне 500 гПа ± 500 м (в слое от 5 до 6 км), что не было подтверждено данными бортовой погоды.

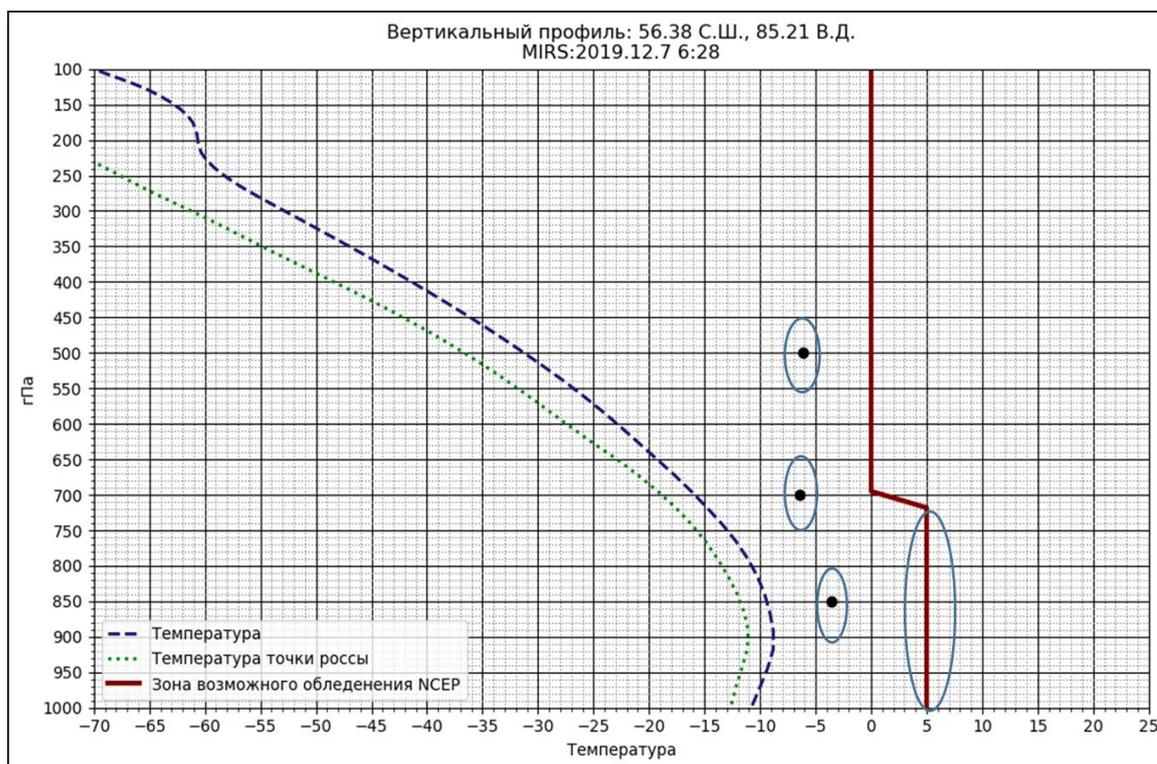


Рисунок. Вертикальные профили температуры воздуха, температуры точки росы и выделенные зоны возможного обледенения по данным AMSU-A на основе алгоритма NCEP (сплошная линия) и объективного метода прогноза обледенения Гидрометцентра СССР (черные точки).
Время пролета 6:28 ВСВ за 07.12.2019

Заключение. Представленные результаты апробирования алгоритма обнаружения зон обледенения с применением данных спутникового зондирования на представленном этапе исследования показали его достаточную успешность – все рассмотренные случаи фактического обледенения по данным бортовой погоды подтверждаются данными, полученными на основе спутникового зондирования. Развитие и использование описанного подхода (после проведения полной оценки каче-

ства обнаружения зон обледенения) целесообразно для территорий, не охваченных сетью аэрологического зондирования. Учитывая высокую вероятность возникновения условий для обледенения воздушных судов в районе аэродрома Томск, предложенный подход может стать компонентой развития сверхкраткосрочного прогнозирования и наукастинга для территории Западной Сибири.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-45-700010 p_a).

Список литературы

1. Global Air Navigation Plan 2013–2028. URL: https://www.icao.int/WACAF/Documents/edocs/9750_cons_en.pdf, 2013.
2. The In-flight icing warning system ADWICE for European airspace – current structure, recent improvements and verification results / F. Kalinka, K. Roloff, J. Tendel, T. Hauf // *J. Meteorologische Zeitschrift*. 2017. Vol. 26, № 4. P. 441–455.
3. Bernstein B.C., Mcdonough F., Politovich M.K. Current icing potential: Algorithm description and comparison with aircraft observations // *J. Applied Meteor.* 2005. Vol. 44. P. 969–986.
4. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада, 2016. 312 с.
5. Le Bot C. SIGMA system of icing geographic identification in meteorology for aviation // SAE Technical Paper 2003-01-2085. URL: doi.org/10.4271/2003-01-2085. 2003.
6. Диагностика ледяных ядер в облаках по данным прибора SEVIRI / В.В. Чукин, И.Н. Мельникова, Т.Т. Нгуен [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 4. С. 133–142.
7. Волкова Е.В., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 3. С. 7–26.
8. The Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A). URL: <https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/AMSUA/index.html>
9. Microwave Integrated Retrieval System (MIRS). URL: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/mirs/>.
10. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред. К.Г. Абрамович, А.А. Васильева. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 301 с.

M.A. Volkova, I.V. Kuzhevskaja, V.V. Chursin, O.E. Nechepurenko

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
e-mail: mv2101@mail.ru; o.e.nechepurenko@gmail.com

REMOTE SENSING OF AIRCRAFT ICING

The study presents the possibility of applying satellite information to diagnose icing zones near the Tomsk airfield. The vertical profiles of air temperature and dew point temperature have been restored according to software package MIRS data, derived from the converted signal of the AMSU-A radiometer. The subsequent selection of possible icing zones using physical-statistical algorithms showed the potential of detecting the icing zone with high spatial resolution. The comparative assessment of the AMSU-A radiometer data and the on-board weather data (pilot reports) revealed a good consistency in detecting actual icing zones. Taking into account the prevailing conditions favored to aircraft icing over Western Siberia, the proposed approach of using satellite data is relevant for aviation and meteorological units carrying out operational forecasting including nowcasting.

Keywords: aircraft icing, pilot reports, satellite remote sensing, MIRS.

А.И. Волкова¹, Е.В. Павлова², Е.А. Демина

¹Кандидат биологических наук, ²Кандидат географических наук
Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Россия
e-mail: ashurkina@yandex.ru; eve21@yandex.ru; ekaterina-demina14@mail.ru

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ АЛТАЙСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ

Дана характеристика современного состояния сельскохозяйственных угодий Алтайского района Республики Хакасия. Проведена оценка площадей зарастания постагrogenных земель *Ulmus pumila L.* На основе данных дистанционного зондирования и подспутниковых наземных исследований разработан геоинформационный проект пространственного распределения сельскохозяйственных земель и особенностей их использования в пределах исследуемого района. Результаты показали, что на изучаемой территории в структуре сельскохозяйственных угодий 56 860 га земель относится к залежам, находящимся на разных стадиях восстановления, из которых 50 % подвержено процессам зарастания вязом перистым. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки системы мер, направленных на предотвращение зарастания постагrogenных земель и восстановления утраченных лесополос.

Ключевые слова: сельскохозяйственные угодья, залежь, зарастание земель, постагrogenные земли, дистанционное зондирование, геоинформационные системы.

Формирование и поддержание оптимальной структуры ландшафтно-земельного фонда является актуальной проблемой для многих регионов России, в том числе и для Республики Хакасия. В настоящее время существенная доля сельскохозяйственных земель, которые с правовой точки зрения являются пашней, во многих районах уже длительное время не используются в сельском хозяйстве даже в качестве пастбищ. Часть постагrogenных земель Хакасии в пределах степной и лесостепной зон в основном обладают плохим низкоутраченным плодородием, их экономически нерентабельно использовать для выращивания сельскохозяйственных культур. Однако на их основе возможно создавать кормовые угодья (пастбища и сенокосы), а также высокопродуктивные лесные насаждения (сосновые боры).

В условиях Хакасии степная растительность само восстанавливается, проходя четыре основные стадии: бурьянная, корневищная, рыхлокустовая и корневищно-рыхлокустовая, плотнокустовая, или истинно дерновинная [1]. Этот процесс изменяется и замедляется из-за распространения вяза приземистого (*Ulmus pumila L.*), выступающего в качестве основной древесной породы полезащитных лесополос. Эта довольно устойчивое к различным воздействиям (засушливым условиям, насекомым-вредителям, обрезке и т.д.) дерево является в Хакасии интродуцентом со вторым статусом агрессивности согласно Черной книге флоры Сибири [3]. В этих условиях требуются детальные исследования, позволяющие не просто ежегодно отслеживать изменения границ постагrogenных и зарастающих древесно-кустарниковой растительностью сельскохозяйственных земель, но и оценивать их современное состояние (эколого-флористический состав формирующейся растительности, особенности раз-

мещения и плотность древесно-кустарниковых пород т.д.), а также экологические риски, связанные с дальнейшим развитием процесса зарастания.

Цель нашей работы – оценить площадь залежей на территории Республики Хакасия Алтайского района и определить площадь постагrogenных земель, зарастающих вязом приземистым. Для этого нами на основе наземных и спутниковых данных был создан ГИС-проект «Геоэкологическая оценка постагrogenных земель Алтайского района», содержащий серию карт, отражающих современное состояние и особенности использования сельскохозяйственных земель.

Алтайский район Республики Хакасия располагается в ее южной части в пределах Койбальской степи Южно-Минусинской котловины. Рельеф представляет собой возвышенную пологоувалистую равнину с отдельными невысокими грядами холмов и небольшими бессточными озерными котловинами. Основная часть территории характеризуется абсолютными отметками рельефа от 260 до 580 м над у.м. Климат района резко континентальный. Продолжительность периода с температурой ниже 0 °С в среднем составляет 85–110 дней.

На изучаемой территории осадки имеют ярко выраженный летний тип. За наиболее важный период активной вегетации растений (май – июль) их выпадает от 170 до 210 мм, а в целом за год – от 370 до 490 мм осадков. В пределах характеризуемой территории продолжительность безморозного периода варьирует от 105 до 115 дней. Показатель сухости (соотношение суммы среднесуточных температур выше 10 °С и количества осадков за май – июль) составляет 1,9–1,7 (засушливый – недостаточно увлажненный). Большая часть территории, используемая под пашню, относится к умеренно-увлажненной (1,7–1,4). Преобладающими ветрами являются западные и юго-западные [3; 4].

Зональные почвы – каштановые, черноземы южные и обыкновенные, нередко защепенные с выходами коренных пород. Также характерно широкое развитие песчаных почв и почв солонцово-солончакового ряда. Алтайский район относится к степной природной зоне, растительность в основном представлена мелкодерновыми и крупнодерновыми настоящими степями с их дигрессионными и защепенными вариантами. Площадь территории Алтайского муниципального района составляет 173,61 тыс. га. Большая ее часть – земли сельскохозяйственного назначения – 163,85 тыс. га, или 94,4 % территории района, что отражает его функциональную специализацию. Однако в связи с тем, что почвы на территории района в основном низкого и среднего неустойчивого плодородия и в основном пригодны для кормовых угодий и использования в качестве пахотных с ограничением посевов пропашных культур, то большая часть земель не задействованы в сельскохозяйственной деятельности.

В настоящее время 56 860 га сельскохозяйственных земель (32,5 % от общей площади территории района) – это залежи на разных стадиях восстановления. Лесополосы из вяза приземистого Алтайского района являются источником причины зарастания залежей древесно-кустарниковой растительностью. По результатам анализа спутниковой информации, карт землепользования и полевых исследований было выявлено, что на 2019 г. процессами зарастания вязом охвачено около 28 580 га постагrogenных земель. Из них 7 938 га находится на первой стадии зарастания, когда появляется подрост древесных пород, соизмеримых с травянистым ярусом, с проективным покрытием до 50–100 % особенно возле материнских насаждений (лесополос). На второй стадии зарастания начинается изреживание подроста в силу биологических особенностей вяза (большой процент обмерзания растений), полнота дре-

востоя снижается до 0,3–0,5. Доля таких залежей составляет 49,6 % от общей площади залежных земель.

Появление древесной и кустарниковой растительности ведет не только к количественному уменьшению площади сельскохозяйственных угодий, но и оказывает отрицательное влияние на качественное изменение травостоя природных кормовых угодий (залежи можно использовать как пастбища и сенокосы). Если не принять должных мер, то в ближайшие годы вяз будет активнее занимать значительные площади, приводя к потере сельскохозяйственных земель и нарушению процессов восстановления степных растительных сообществ.

Вовлечение облесенных земель будет возможно только после значительных денежных вложений в расчистку участков сельскохозяйственных земель от нежелательной древесной растительности.

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. Мартынова М.А. Демутационные и инвазионные процессы залежных земель в степной зоне Республики Хакасия // Вестн. КрасГАУ. 2019. № 1. С. 187–192.
3. Волкова А.И., Дремина И.В. Трансформация растительности прибрежных ландшафтов оз. Соленое Республики Хакасия // Экологический мониторинг и биоразнообразие: материалы Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. конф. / отв. ред. А.Ю. Левых. Ишим: Изд-во ИПИ им. П.П. Ершова (филиала) ТюмГУ, 2018. С. 51–53.
4. Растительный покров Хакасии / под ред. А.В. Куминовой. Новосибирск: Наука, 1976. 421 с.

A.I. Volkova, E.V. Pavlova, E.A. Demina

Khakass State University of N.F. Katanov, Abakan, Russia
e-mail: ashurkina@yandex.ru; eve21@yandex.ru; ekaterina-demina14@mail.ru

EVALUATION OF THE CURRENT STATE OF AGRICULTURAL LANDS OF THE ALTAI DISTRICT OF THE REPUBLIC OF KHAKASIA

This article describes the current state of agricultural land in the Altai region of the Republic of Khakassia. An assessment of the areas of overgrowth of postagrogenic lands with *Ulmus pumila* L has been carried out. On the basis of remote sensing data and ground-based subsatellite research, a geoinformation project of the spatial distribution of agricultural land and the features of their use within the study area has been developed. The research results showed that in the study area in the structure of agricultural land 56 860 hectares of land belongs to fallows, which are at different stages of recovery, of which 50 % are subject to the processes of overgrowing with pinnate elm. The results obtained indicate the need to develop a system of measures aimed at preventing the overgrowth of post-agrogenic lands and restoring the lost forest belts.

Keywords: agricultural lands, fallow land, overgrowing, postagrogenic lands, remote sensing, geographic information systems.

А.С. Гаченко², А.Е. Хмельнов¹

¹Кандидат технических наук, Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия

²Кандидат технических наук, Институт динамики систем
и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail:gachenko@icc.ru; hmelnov@icc.ru

АНАЛИЗ УЧАСТКОВ РЕКИ АНГАРЫ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ЗАТОПЛЕНИЯМ

Представлена технология построения модели рельефа, которая была апробована на ряде научных проектов для изучения побережья нижнего бьефа Иркутской ГЭС и Братского водохранилища. Эта модель используется для составления прогнозов изменений береговой линии водохранилищ, связанных со сбросами на каскаде гидроэлектростанций. Описанная в работе технология была апробирована для решения ряда практических задач и показала свою эффективность. Было разработано специализированное программное обеспечение и использованы данные по рельефу из различных источников для уточнения и детализации конечного результата.

Ключевые слова: ГИС, рельеф, изолинии, моделирование, прогнозы, ГЭС.

Русло реки Ангары имеет довольно сложную структуру с множеством островов, заводей, проток и устьевых участков впадающих в нее рек. Наиболее опасной с точки зрения потенциальных затоплений является зона от плотины Иркутской ГЭС (ИГЭС) до города Ангарска включительно протяженностью 67 км. Здесь проживает около 1 млн человек и расположены крупнейшие предприятия Иркутской области. Учитывая высокие риски затоплений городских территорий при повышенных сбросах через гидростворы ИГЭС, требуется построение моделей для определения потенциальных зон и границ затопления. Регулярный космомониторинг нужного района позволяет уточнять границы береговых линий с точностью в несколько метров, но является дорогостоящим мероприятием.

При достаточно точной модели рельефа можно формировать оценки потенциальных зон и границ затопления с учетом сбросов на Иркутской ГЭС. Кроме того, с учетом наступившего с 2014 г. периода экстремального маловодья в бассейнах озера Байкал и реки Ангары [1], возникла задача получения границ обмеления нижнего бьефа ИГЭС и береговых участков Братского водохранилища. Вследствие этого появилась необходимость разработки модели рельефа, учитывающей форму речного дна.

С помощью современных ГИС-технологий: QGIS и оригинального программного обеспечения TINSmith (рис. 1) с использованием триангуляции Делоне [2] было проведено моделирование зон возможного затопления при поднятии уровня воды на водном каскаде ГЭС реки Ангары. Выявлены опасные участки и населенные пункты, которым грозит опасность при различных сценариях водности.

Для данных методик использовались рельефы из открытых источников SRTM, ALOS, лоцманские карты [3] и векторная карта в масштабе 1:50 000. В связи с большими неточностями измерений из открытых источников в районе береговой линии водных объектов было принято решение не пользоваться ими, а взять за основу рельеф с векторных топографических карт.

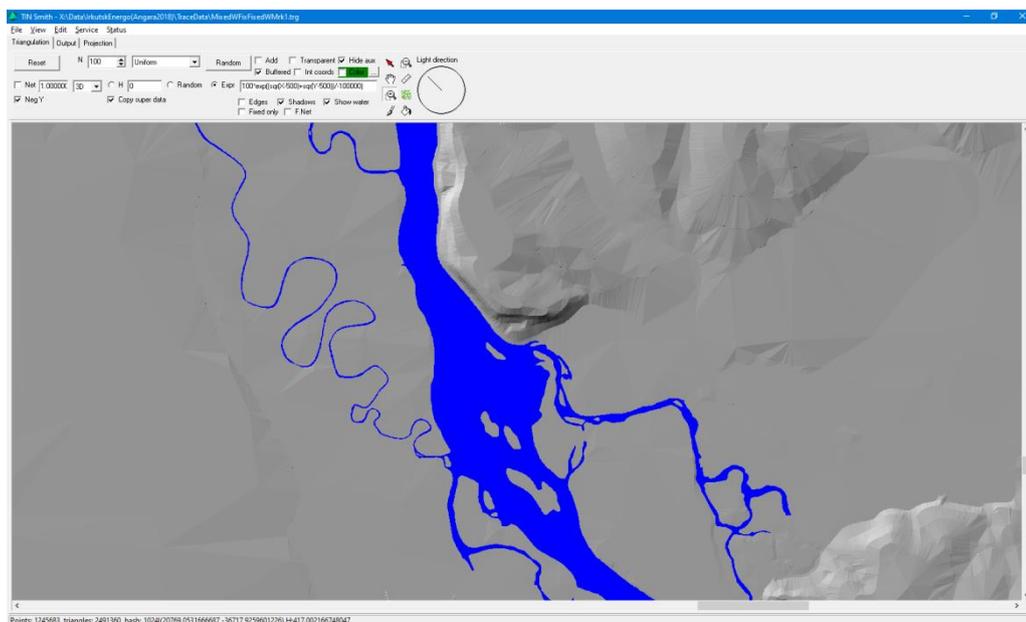


Рис. 1. Специальное программное обеспечение TINSmith для построения триангуляции Делоне

Для построения рельефа использованы различные слои с топоосновы, которые могут играть разную роль при построении триангуляции, описывающей рельеф. Все это настраивается специальным образом в оригинальном программном обеспечении TINSmith: планово-высотная основа (рельеф), поверхности водохранилищ (поверхности с постоянной высотой), реки, ручьи (линейные и площадные объекты) используются для коррекции рельефа. При работе с подводной частью применяются отметки урезов воды и данные о подводном рельефе. Реализован алгоритм коррекции рельефа, построенного по изолиниям. Это позволяет исправить характерные ошибки для таких алгоритмов: артефакты, которые создают эффект террасы.

Сначала берется подводный рельеф (алгоритм исправления триангуляции). Предложена методика совмещения надводного рельефома с подводным. При ее использовании отдельно строится триангуляция подводного рельефа, для которой применяется алгоритм горизонтальных участков. После этого точки и жесткие ребра результирующей триангуляции сохраняются в файлы. Эти файлы используются при построении объединенной триангуляции. Таким образом, ребра, добавленные в триангуляцию для исправления, будут включены в итоговую объединенную триангуляцию и исправят эффекты ступеней (террас). Непосредственно применять исправления триангуляции на смешанной триангуляции нельзя, так как после вычитания глубины из уровня воды горизонтальные треугольники перестают быть горизонтальными. На основании моделирования различных сценариев поднятия уровня воды был получен альбом из карт населенных пунктов (всего 103 объекта), которые подвержены затоплению. Карта с изолиниями построена на уровень поднятия до 5 м и изолиниями через 20 см (рис. 2).

Согласно методике, описанной выше, были разработаны цифровые модели Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ (рис. 3–4) с построением на них зон возможных затоплений (в виде изолиний) при различных сценариях водности. На основании данной технологии сформирована электронная карта береговой линии (буферная зона от 4 до 10 км) и получен цифровой альбом для реки Ангары в пределах Иркутской области.

Было обработано 103 населенных пункта в пределах Иркутской области, были построены изолинии с уровнями угрозы затопления по каждому из них.



Рис. 2. Построение триангуляции на заданную область и пример возможного затопления при различных сценариях водности (Иркутское водохранилище). Изолинии построены через 20 см



Рис. 3. Братское водохранилище и фрагмент города Братска



Рис. 4. Усть-Илимское водохранилище и фрагмент города Усть-Илимска

С использованием данной технологии и разработанной цифровой карты можно делать различные прогнозы по всем населенным пунктам, прилегающим к побережью реки Ангары, о сценариях и угрозах наводнений при различных режимах уровня воды.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке блока интеграционной программы ИНЦ СО РАН 4.1.2.

Список литературы

1. Бычков И.В., Никитин В.М. Регулирование уровня озера Байкал: проблемы и возможные решения // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 5–16.
2. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 128 с.
3. Карта реки Ангара от Иркутской ГЭС до 142 км // Министерство транспорта РФ. Департамент речного транспорта. Главводпуть. Государственное предприятие «Водные пути Восточно-Сибирского бассейна». Иркутск, 1994. 70 с.

A.S. Gachenko², A.E. Hmelnov¹

¹Irkutsk Scientific Center SB RAS, Irkutsk, Russia

²Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, Russia
e-mail: gachenko@icc.ru; hmelnov@icc.ru

REALITY AND PROSPECTS ANALYSIS OF FLOODABLE AREAS OF THE ANGARA RIVER

In this work, the authors present a technology for riverside terrain model building that has been tested on a number of scientific projects to study the littoral area of tail race of the Irkutsk Hydroelectric Power Station and the Bratsk Reservoir. This model is used for forecasting changes in the reservoir shorelines associated with wastewater in the cascade of hydroelectric power stations. The technology described in the work was approved to solve a number of practical problems and showed its effectiveness. Specialized application software was developed and terrain data from various sources were used to specify and detail the end result.

Keywords: relief, contours, modeling, forecasts, hydroelectric power stations.

А.С. Гордиенко¹, Е.Д. Андриевская²

¹Кандидат технических наук, ²Студент
Сибирский государственный университет
геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
e-mail: a.s.gordienko@sgugit.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СНИМКОВ PLANETSCOPE ПРИ МОНИТОРИНГЕ ТЕРРИТОРИЙ

Приведены исследования возможностей снимков, полученных со спутников PlanetScope, для мониторинга территорий. Представлены результаты экспериментов по выявлению изменений на примере различных типов объектов: застроенная территория, растительность, гидрография. Выполнен анализ результатов, который показал, что для мониторинга городской застройки по снимкам *PlanetScope* недостаточно разрешающей способности снимков, а наилучший результат получен по снимку за июль. Мониторинг растительности и объектов гидрографии по данным снимкам выполняется успешно. Для этих типов объектов достаточно и пространственного разрешения, и информации, получаемой из четырех спектральных каналов. Таким образом, снимки *PlanetScope* целесообразно использовать при мониторинге леса, сельхозугодий, почв и объектов гидрографии.

Ключевые слова: PlanetScope, мониторинг, дешифрирование, индексы.

Введение. При мониторинге территорий по данным дистанционного зондирования важно регулярное и оперативное получение данных. В настоящее время существует большое количество разной информации, которая отличается пространственным разрешением, диапазонами спектра, периодичностью съемки, стоимостью и др. В данной статье приведены несколько экспериментов, выполненных по снимкам PlanetScope.

Группировка спутников *PlanetScope* насчитывает более 130 аппаратов, за сутки они снимают более 200 млн км² и покрывают снимками почти всю площадь Земли. Снимки, получаемые со спутников *PlanetScope*, имеют пространственное разрешение 3–5 м в четырех спектральных каналах: зеленом, синем, красном и инфракрасном. Съемка с них ведется постоянно, что делает их привлекательными для целей мониторинга поверхности Земли [1; 2].

Цель данного исследования выявить особенности, достоинства и недостатки обнаружения изменений по снимкам, полученным со спутников *PlanetScope*.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить визуальное дешифрирование снимков *PlanetScope*;
- применить методы выявления изменений к разновременным снимкам;
- проанализировать полученные результаты.

Материалы и методы исследования. В данной работе использовались снимки *PlanetScope* городской территории на примере микрорайона Горский и прилегающих территорий города Новосибирска. Данная территория содержит в себе различные строительные объекты, такие как многоэтажные здания, дороги и мосты, а также объекты гидрографии и растительности. Для получения наилучшего результата использовались снимки за различные сезоны (с апреля по ноябрь 2019 г.), а также снимки на зону затопления города Тулуна в июне 2019 г.

В исследованиях использовались такие методы, как расчет индексных изображений и автоматизированная классификация с обучением. Для оценки точности результатов автоматизированной классификации использовались карты.

Результаты. Для того чтобы оценить возможности снимков *PlanetScope* при выявлении изменений, сначала необходимо выполнить визуальное дешифрирование снимков. На рис. 1 представлены фрагменты снимков с изображением различных типов объектов городской застройки. Как видно, такие объекты, как частный сектор не распознаются на снимках. Их можно определить только как площадной объект, а многоэтажная застройка, скорее всего, будет распознана некачественно, так как границы домов размыты и присутствуют тени. Растительность и объекты гидрографии распознаются достаточно уверенно.



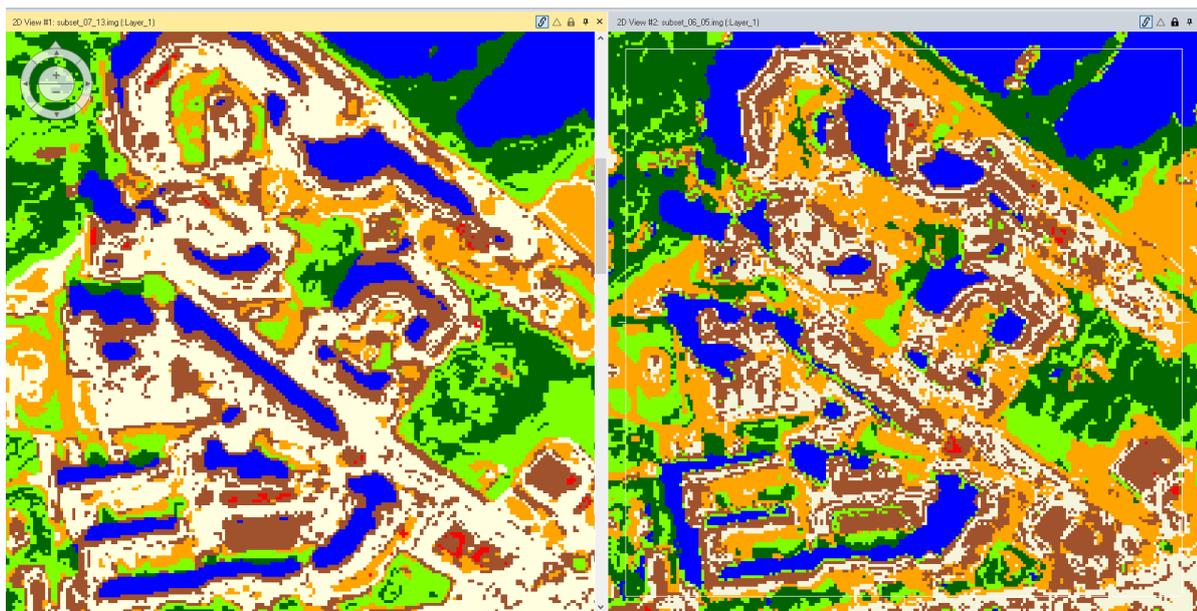
Рис. 1. Фрагменты снимков *PlanetScope*

Результаты автоматизированного дешифрирования подтвердили визуальный анализ снимков. Можно сделать вывод, что наилучший результат классификации был получен по изображению за июль месяц: на нем наблюдается наименьшее смещение классов (рис. 2).

Результат оценки точности классификации всех изображений представлен в таблице: более высокая точность классификации получена по снимку за июль месяц, что подтверждает визуальный анализ результатов классификации.

Анализ разновременных снимков *PlanetScope* с лесной и сельскохозяйственной территорией показал, что данные типы объектов распознаются достаточно уверенно.

Выявление изменений объектов гидрографии представлено на примере затопления города Тулуна в июне 2019 г. На основе расчета индексных изображений и алгоритмов выявления изменений получена зона затопления города (рис. 3).



a

б

Рис. 2. Результаты автоматизированной классификации: *a* – классификация на июль месяц; *б* – классификация на июнь месяц

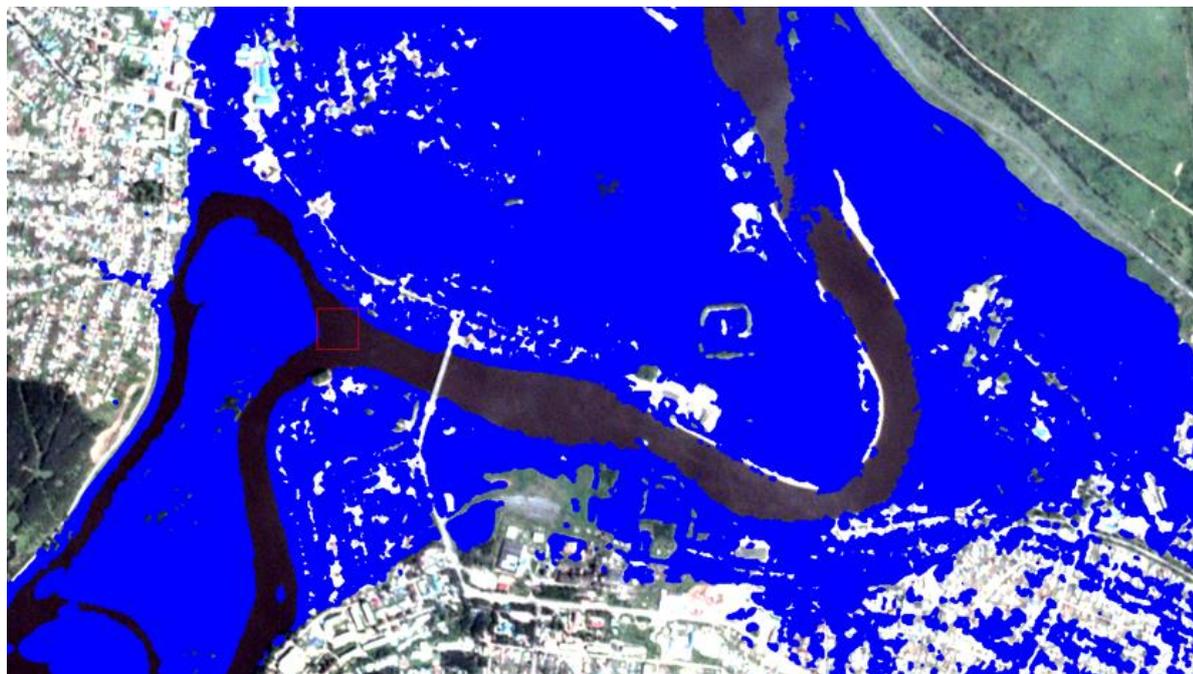


Рис. 3. Зона затопления Тулуна в июне 2019 г.

Таблица

Оценка точности классификации снимков

Дата изображения	Точность классификации, %
6 апреля	65,0
3 мая	75,0
5 июня	72,5
13 июля	82,5
15 августа	67,5
9 сентября	70,0
10 октября	80,0
3 ноября	75,0

Выводы. В ходе исследований было доказано, что при обработке снимков заселенной территории со спутников *PlanetScope* достаточно сложно добиться качественного результата, так как не хватает пространственного разрешения и информации, получаемой из других диапазонов спектра [3; 4]. Основным недостатком снимков со спутников *PlanetScope* является их небольшой охват территории, что затрудняет анализ результатов. Размер кадра – около 26,5×8,5 км. Этого, например, недостаточно, чтобы охватить Новосибирск одним снимком.

Анализ результатов классификации снимков, полученных на разные месяцы показал, что наиболее подходящими для автоматизированного дешифрирования городской территории являются снимки, полученные в летние месяцы, в частности в июле, что подтверждается визуальным анализом и результатом оценки точности.

Таким образом, снимки со спутников *PlanetScope* подходят для мониторинга леса, сельскохозяйственных культур, почв и гидрографии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

Список литературы

1. Planet. URL: <https://www.planet.com/products/planet-imagery/>.
2. ИННОТЕР. URL: <https://innoter.com/sputniki/planetscope/>.
3. Плотникова М.А., Хлебникова Е.П. Мониторинг городских территории по материалам космических съемок // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. С. 86–93.
4. Разработка методик автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков. Дешифровочные признаки изображений объектов на многоспектральных космических снимках / А. П. Гук [и др.] // Геодезия и картография. 2017. С. 31–40.

A.S. Gordienko, E.D. Andrievskaya

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

e-mail: a.s.gordienko@sgugit.ru

APPLICATION OF PLANETSCOPE IMAGES FOR EARTH MONITORING

This article discusses some of the opportunities of images PlanetScope for monitoring territories. The results of experiments to change detection presented on the example of various types of objects: built-up area, vegetation and hydrography. The analysis of the results was carried out, which showed that for monitoring urban development using PlanetScope images, there is not enough spatial resolution, and the best result was obtained for the image for July. Monitoring of vegetation and hydrographic objects based on these images is being performed successfully. Thus, PlanetScope images are useful for monitoring forests, farmland, soils and hydrographic objects.

Keywords: PlanetScope, monitoring, recognize, index.

**П.Н. Дагуров, А.К. Балтухаев,
А.В. Дмитриев, Т.Н. Чимитдоржиев**

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия
e-mail: pdagurov@gmail.com

РАДАРНОЕ РАССЕЯНИЕ МИКРОВОЛН СНЕЖНЫМ ПОКРОВОМ НА СЛОИСТО-ШЕРОХОВАТОЙ ЗЕМЛЕ

Исследована радарная микроволновая интерферометрия снежного покрова, лежащего на слоистой земле, которая состоит из слоя мерзлой земли на влажной. Результирующее поле представлено в виде когерентной суммы волн, рассеянных границами раздела, неровности которых характеризуются своими статистическими характеристиками. Такое представление позволяет в рамках метода малых возмущений определить интерферометрическую фазу результирующего поля, полученную как разность фаз рассеянных волн в отсутствие снежного покрова и при его наличии. Интерферометрическая фаза, в свою очередь, позволяет определить параметры снежного покрова. Показано, что слоистость земли может вызывать значительные изменения интерферометрической фазы.

Ключевые слова: снежный покров, слоистая земля, радиолокационная интерферометрия.

Введение. Снежный покров в холодное время года является важным компонентом окружающей среды в России и на других территориях, расположенных в районах умеренных и высоких широт. В связи с необходимостью определения параметров снежного покрова на обширных территориях и его пространственно-временной неоднородностью эффективным способом исследования и мониторинга снега является спутниковое дистанционное зондирование [1].

Метод радарной интерферометрии нашел широкое применение как высокоточный инструмент для наблюдения и исследования различных изменений земных покровов [2–4]. Интерферометрический метод, в основе которого лежит сравнение оптических путей распространения волн в отсутствие снежного покрова и при его наличии, также был предложен и развит для анализа параметров снежного покрова и оценки водного эквивалента снега [5–8]. Ранее в работе [8] была предложена когерентная модель обратного рассеяния от снежного покрова на земной поверхности. Обратное рассеяние происходит благодаря мелкомасштабным шероховатостям поверхности земли и снега. В настоящей работе модель обобщается на случай слоистой земли.

Обратное рассеяние от снежного покрова на двухслойной земле. На рис. 1 показана геометрия задачи и траектории микроволн, по которым они распространяются в отсутствие снежного покрова и при его наличии. На землю и снежный покров падает плоская волна $\vec{E}_p^i = \vec{E}_{0p} e^{jk(x \sin \theta - z \cos \theta)}$ (k – волновое число в воздухе). Индекс p здесь и далее описывает поляризацию

излучения: $p = h$ при горизонтальной поляризации излучения и $p = v$ при горизонтальной поляризации. В отсутствие снега волна l , падающая из воздуха на почву под углом θ , рассеивается обратно шероховатостями почвы в виде волны w_g (красная штриховая линия). На рис. 1 траектории падающих волн показаны сплош-

ными линиями, а траектории рассеянных волны – штриховыми линиями. В присутствии снежного покрова волна 2 при падении на снег из воздуха под углом θ частично рассеивается обратно в виде волны w_s , затем после преломления и распространения в снежном слое падает на границу «снег – мерзлая земля» под углом θ_1 . Часть волны рассеивается обратно шероховатостями этой границы в виде волны w_f , а основная часть проходит в слой мерзлой почвы и затем рассеивается обратно неровностями границы «мерзлая земля – влажная почва».

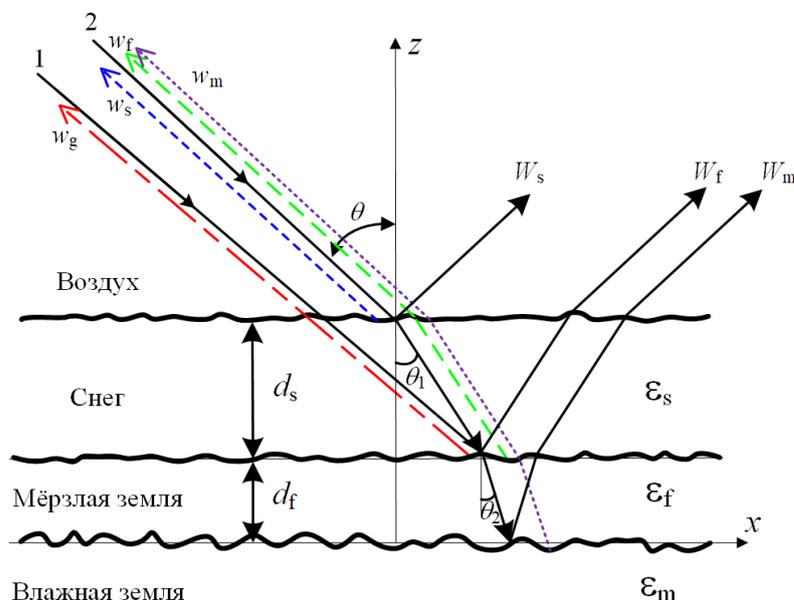


Рис. 1. Геометрия обратного рассеяния волны

Сухой снег полагаем непоглощающей средой с диэлектрической проницаемостью ϵ_s , Мерзлая и влажная земля характеризуются, соответственно, комплексными диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_f = \epsilon'_f + j\epsilon''_f$ и $\epsilon_m = \epsilon'_m + j\epsilon''_m$. Граничные поверхности «воздух – снег», «снег – мерзлая земля» и «мерзлая земля – влажная земля» являются статистически шероховатыми поверхностями со случайными неровностями, высоты которых описываются некоррелированными между собой стационарными случайными функциями со своими средними значениями, среднеквадратичными отклонениями и радиусами корреляции. Полагаем, что неровности малы по сравнению с длиной волны, их наклоны невелики и выполняются условия применимости метода малых возмущений [9]. Считаем, что неровности не влияют на когерентное поле (борновское приближение).

Поле обратного рассеяния является когерентной суммой волн, рассеянных на неровностях границ.

Вследствие малости неровностей не учитываем флуктуации фазы волны и полагаем, что в приближении метода малых возмущений значения фаз обусловлены путями, пройденными волнами в результате их взаимодействия с плоскими в среднем границами раздела. Тогда случайное электромагнитное поле, рассеянное шероховатыми границами в обратном направлении, с амплитудой $|E_p|$ и фазой Φ можно представить в виде следующей суммы:

$$|E_p| e^{j\Phi} = |E_{sp}| e^{j\Phi_s} + T_{sp} T'_{sp} |E_{fp}| e^{j\Phi_f} + T_{sp} T'_{sp} T_{fp} T'_{fp} |E_{mp}| e^{-a+j\Phi_m}, \quad (1)$$

где слагаемые в правой части формулы описывают соответственно поля волн обратного рассеяния w_s , w_f и w_f . В формуле (1) T_{sp} и T'_{sp} – коэффициенты прохождения

волн через границу «воздух – снег», рассматриваемую в среднем как плоскую поверхность в прямом и обратном направлениях соответственно; аналогично T_{fp} и T'_{fp} – коэффициенты прохождения волн через границу «снег – мерзлая земля»; $|E_{sp}|$ – амплитуда поля, рассеянного неровностями поверхности снега; $|E_{fp}|$ – амплитуда поля, рассеянного неровностями границы «снег – мерзлая земля». Параметр a в формуле (1) определяет затухание волны при двукратном прохождении слоя мерзлой земли

$$a = 2kd \sqrt{\frac{\varepsilon'_f}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''_f}{\varepsilon'_f}.$$

Интерферометрические фазы Φ_s , Φ_f и Φ_m отсчитываются относительно фазы волны в отсутствие снежного покрова:

$$\Phi_s = \psi - \varphi_0, \quad \Phi_f = \varphi_s + \psi - \varphi_0, \quad \Phi_m = \varphi_f + \varphi_s + \psi - \varphi_0, \quad (2)$$

где $\psi = 2kd_s(\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \theta_1) \sin \theta$, $\varphi_0 = 2kd_s / \cos \theta$, $\varphi_s = 2kd \sqrt{\varepsilon_s} d_s / \cos \theta_1$,

$$\varphi_f = \frac{2kd_f}{\cos \theta_2} \sqrt{\frac{\varepsilon'_f}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1)}, \quad \theta_2 = \operatorname{arctg} \frac{\sin \theta_1}{\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_f^2 - \sin^2 \theta_1}}$$

После усреднения соотношения (1) получим

$$\langle |E_p| \rangle e^{j\Phi} = \langle |E_{sp}| \rangle e^{j\Phi_s} + T_{sp} T'_{sp} \langle |E_{gp}| \rangle e^{j\Phi_g} + T_{sp} T'_{sp} T'_{fp} T_{fp} \langle |E_{mp}| \rangle e^{-a+j\Phi_m}, \quad (3)$$

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

$$\sqrt{\sigma_p^0} e^{j\Phi} = \sqrt{\sigma_{sp}^0} e^{j\Phi_s} + T_{sp} T'_{sp} \sqrt{\sigma_{fp}^0} e^{j\Phi_f} + T_{sp} T'_{sp} T'_{fp} T_{fp} \sqrt{\sigma_{mp}^0} e^{-a+j\Phi_m}, \quad (4)$$

где σ^0 – результирующий коэффициент обратного рассеяния; σ_{sp}^0 , σ_{fp}^0 , σ_{mp}^0 – коэффициенты обратного рассеяния от границ «воздух – снег», «снег – мерзлая земля», «мерзлая земля – влажная земля» соответственно.

Для расчетов используем известные выражения коэффициентов обратного рассеяния в приближении метода малых возмущений [9].

На рис. 2 приведены построенные по формуле (4) относительно случая однородной мерзлой земли зависимости фазы величины σ^0 от толщины слоя мерзлой земли, лежащего на влажной земле, показанные сплошной кривой. Значения диэлектрических проницаемостей: для мерзлой почвы $\varepsilon_f = 5 + 0,5j$; для влажной почвы $\varepsilon_m = 10 + 2,5j$. Для расчета использованы следующие параметры: длина волны $\lambda = 23$ см, угол $\theta = 30^\circ$.

Характеристики неровностей обеих поверхностей приняты одинаковыми для обеих поверхностей. Значения фазы построены относительно фазы амплитуды рассеяния от однородной влажной почвы. Точками показана зависимость фазы рассеянной волны при влажной почве, лежащей на мерзлом грунте.

Приведенные зависимости показывают, что возможные изменения фазы в случае слоистой земли могут быть весьма значительными.

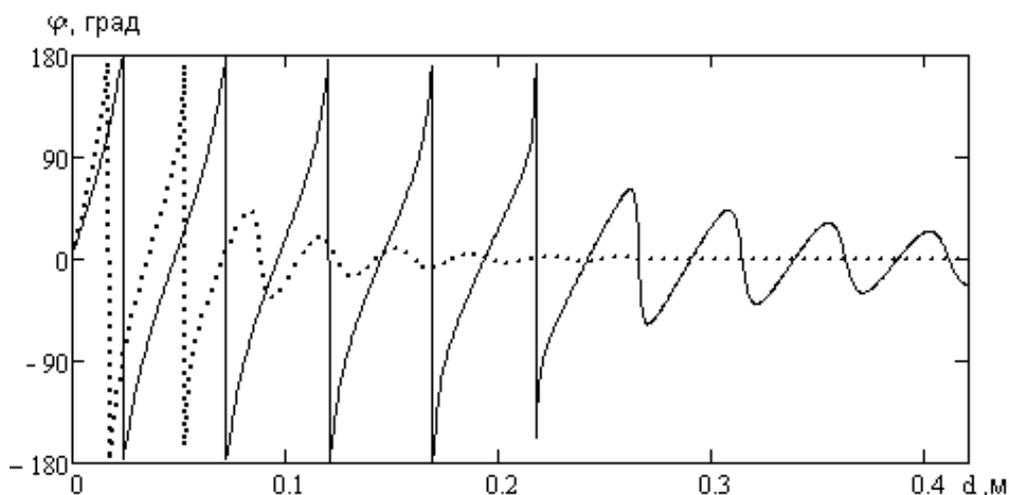


Рис. 2. Зависимости фазы рассеянной волны от толщины мерзлой почвы

Закключение. В работе проведено обобщение модели для определения интерферометрической фазы, представляющей собой разность фаз радарных сигналов в отсутствие снега и после выпадения снега на случай слоистой земли. Показано, что возможные изменения фазы в случае слоистой земли могут быть весьма значительны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-01051 А).

Список литературы

1. Rees W.G. Remote sensing of snow and ice // CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. 302 p.
2. A tutorial on synthetic aperture radar / A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis [et al.] // IEEE Geosci. Remote Sensing Mag. 2013. Vol. 1, № 1. P. 6–43.
3. Hanssen R.F. Radar interferometry: Data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001. 308 p.
4. Comparison of ALOS PALSAR interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freeze monitoring, case study from the Baikal lake region, Russia / T.N. Chimitdorzhiev, P.N. Dagurov, M.E. Bykov [et al.] // J. of Applied Remote Sensing. 2016. Vol. 10, № 1. P. 016006.
5. 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. Vol. 39, № 10. P. 2101–2108.
6. Snow water equivalent of dry snow measured by differential interferometry / S. Leinss, A. Wiesmann, J. Lemmetyinen, I. Hajnsek // IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. 2015. Vol. 8, № 8. P. 3773–3790.
7. 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.
8. Интерферометрическая модель радарного зондирования снежного покрова / П.Н. Дагуров, А.К. Балтухаев, А.В. Дмитриев [и др.] // Материалы V Междунар. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. С. 109–112.
9. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing. 1982. Ch. 12. Vol. 2, Dedham, MA: Artech House.
10. Mätzler C. Microwave permittivity of dry snow // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1996. Vol. 34, № 2. P. 573–581.

P.N. Dagurov, A.K. Baltukhaev,
A.V. Dmitriev, T.N. Chimitdorzhiev

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-UDE, Russia

RADAR MICROWAVE SCATTERING BY SNOW COVER ON LAYERED-ROUGH EARTH

A radar microwave interferometry of snow cover lying on a layered ground, which consists of a layer of frozen ground on moist ground, is investigated. The resulting field is presented as a coherent sum of waves scattered by interfaces, the irregularities of which are characterized by their statistical characteristics. This representation allows, within the framework of the method of small perturbations, to determine the interferometric phase of the resulting field, obtained as the phase difference of the scattered waves in the absence of snow cover and in its presence. The interferometric phase, in turn, makes it possible to determine the parameters of the snow cover. It is shown that the layering of the earth can cause significant changes in the interferometric phase.

Keywords: snow cover, layer ground, radar interferometry.

УДК 528.88

В.В. Дедкова¹, М.М. Шляхова²

¹Аспирант, ²Кандидат технических наук
Сибирский государственный университет
геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
e-mail: v.v.dedkova@sgugit.ru; m.m.shlyahova@sgugit.ru

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрены возможности применения методов дистанционного зондирования для мониторинга объектов нефтегазовой отрасли. Основным источником загрязнений в нефтеперерабатывающей отрасли является утечка нефтепродуктов при их хранении и транспортировке по магистральным трубопроводам. Подобный тип загрязнений наносит ущерб окружающей среде, негативно влияя на состояние почв, вод, атмосферы. Сопутствующие утечке взрывы и пожары представляют опасность для жизни человека. Применение данных дистанционного зондирования для мониторинговых наблюдений позволяет минимизировать риски прорывов трубопроводов, а также в оперативном режиме организовать спасательные мероприятия в случае утечки углеводородов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг, разлив нефти, магистральный нефтепровод, чрезвычайная ситуация.

Введение. В 2019 г. объем национальной добычи нефтяного сырья в России составил 561,2 млн т, что превышает показатели 2015 г. более чем на 27 млн т [1]. В связи с ростом добычи углеводородного сырья, необходимостью его переработки, транспортировки и хранения возрастает риск опасного воздействия на окружающую среду в зонах разрабатываемых месторождений и функционирования объектов

нефтегазовой отрасли. Транспортировка углеводородов осуществляется по трубопроводам, общая протяженность которых на территории России составляет более 280 тыс. км. Большинство аварийных утечек нефтяного сырья происходит при его транспортировке [2]. Анализ данных [3] показал, что в 2019 г. в России более 50 % от общего числа аварий на объектах энергетического комплекса составляют аварии на нефте- и газопроводах.

Основная часть. Аварии на транспортных трубопроводах в ряде случаев происходят из-за разрушений технического устройства (внутренний коррозионный процесс) и отсутствия должного контроля и диагностики его состояния со стороны организации, проведения несанкционированных работ сторонними организациями в местах прохождения трубопроводов (земляные работы, организованные без уведомления органов управления и разрешения на проведение работ), отсутствие защитных сооружений и предупредительных знаков в зонах размещения объектов нефтегазового комплекса, некачественного технического обследования трубопроводов, влияния внешних факторов и иных причин.

В таблице приведены основные факторы, провоцирующие аварийные и чрезвычайные ситуации при движении углеводородного сырья по транспортным трубопроводам, и способы их предупреждения [2; 4–7].

Таблица

Причины возникновения аварийных ситуаций
на магистральных трубопроводах и пути их предотвращения

Фактор	Пути предотвращения проблемы
Большие объемы транспортируемого сырья	Соблюдение нормативных требований при эксплуатации транспортных трубопроводов, качественная подготовка специалистов, задействованных в технологическом процессе
Скачки давления и температуры внутри трубопровода	
Физический износ трубопровода	Своевременное выявление проблем посредством мониторинговых наблюдений, проведение строительных и ремонтно-восстановительных работ
Заводские дефекты, брак трубопровода	
Коррозия	
Метеоявления: экстремально высокая или низкая температура окружающей среды, штормовой ветер, ураган, метель, снежный занос, громовой разряд и др.	Возведение защитных сооружений, мониторинг
Геодинамическая активность	Проектирование строительства объектов нефтегазовой инфраструктуры с учетом геологической ситуации, возведение защитных сооружений, мониторинг
Сейсмическая активность: землетрясения, оползни	
Сезонные подтопления	Возведение защитных сооружений, мониторинг
Вандализм и незаконные врезки в трубопровод, проведение несанкционированных земляных и/или иных работ в охранной зоне	Возведение защитных сооружений, нормативно-правовое регулирование
Технические сбои на производстве, ошибки операторов, нарушение техники безопасности и производственной дисциплины при ведении технологического процесса	Соблюдение нормативных требований, регламентирующих деятельность на производстве, качественная подготовка персонала и проверка уровня квалификации, организация мероприятий по повышению квалификации, соблюдение правил техники безопасности и контроль их выполнения

Для контроля технического состояния магистральных трубопроводов и минимизации рисков аварий, а также своевременного выявления утечек углеводородного сырья российскими и зарубежными нефтяными компаниями внедряются системы воздушного и наземного мониторинга, основанные на применении метода инфракрасной термографии (*infrared thermography*). Утечка сырья провоцирует аномальное распреде-

ление температур, при этом тепловой контраст, характеризующийся разницей температуры сырья и окружающего грунта, фиксируется и отображается на термографическом изображении. Съемка ведется в диапазоне 900–1 400 нм. К ограничивающим факторам внедрения данного метода относятся высокая стоимость оборудования, необходимость проведения калибровки для получения более точных результатов, погодные условия (дождь, ветер, прямые солнечные лучи и др.) [8–11].

Компанией «Роснефть» внедрена система круглосуточного мониторинга Самотлорского месторождения (ОАО «Самотлорнефтегаз») с использованием беспилотных летательных аппаратов, оснащенных тепловизионной аппаратурой и фотокамерами. Тепловизионное оборудование позволяет осуществить оценку состояния нефтепромысловых трубопроводов, а фотографические изображения представляют собой дополнительный источник информации для визуальной оценки. С введением данной системы мониторинга удастся не только предотвращать утечки сырья, но и выявлять факты хищения нефтепродуктов [12; 13].

В статье [14] предложены варианты использования маловысотных легких беспилотных летательных аппаратов с системой оптических/инфракрасных датчиков на борту и беспилотных летательных аппаратов грузоподъемностью до 200 кг (с осуществлением полетов на высоте более 1 000 м) с установкой радара (SAR) для мониторинга транспортных трубопроводов. Говоря о радиолокационной интерферометрии как методе получения информации о состоянии трубопроводов, следует выделить преимущества, такие как независимость от погодных условий и освещенности, возможность отслеживания геодинамических сдвигов (вертикальных) на исследуемых территориях с высокой точностью в целях предотвращения аварийных ситуаций, возникших на фоне изменения напряженно-деформированного состояния трубопроводной конструкции. В зависимости от целей мониторинга и пространственного охвата наблюдаемой территории целесообразно использовать результаты не только воздушной, но и космической радиолокационной съемки.

Выводы. Современные средства дистанционного зондирования позволяют осуществлять оперативный мониторинг состояния магистральных нефтепроводов с высокой точностью и детальностью получаемой информации. С целью минимизации рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на транспортных трубопроводах профильным организациям следует внедрять системы постоянного мониторинга объектов нефтегазовой отрасли, что позволит сократить экономический и экологический ущерб от аварий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

Список литературы

1. Статистика // Сайт Министерства энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic>.
2. О структуре системы физической защиты магистральных трубопроводов от преднамеренных угроз / В.А. Комаров, З.В. Семенова, Д.А. Бронников, А.А. Нигрей // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т. 19, № 1. С. 87–100.
3. Надзор за объектами нефтегазового комплекса // Сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Ростехнадзор. URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2019%20год/index.php>.
4. Нестеренко М.Ю., Карпюк М.С., Влацкий В.В. Автоматизированная распределенная ГИС-система мониторинга и оценки риска функционирования природно-техногенных

объектов нефтегазовой промышленности // Российскому научному обществу анализа риска 15 лет: основные итоги и перспективы деятельности: сб. М., 2018. С. 347–352.

5. Ушивцева Л.Ф., Соловьева А.В., Ермолина А.В. Воздействие геологических процессов на функционирование объектов инфраструктуры // Геология, география и глобальная энергия. 2016. № 3 (62). С. 49–60.

6. Кузьмина Е.С., Варнаков В.В. Анализ причин возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Modern Science. 2019. № 4 (1). С. 379–383.

7. Аскарлов Р.М., Китаев С.В., Исламов И.М. О технологии выявления участков трубопроводов с изгибными напряжениями при пересечении ими геодинамических зон // Изв. Том. политехнич. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 5. С. 18–25.

8. Adegbeye M.A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches, 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/333602897_Recent_Advances_in_Pipeline_Monitoring_and_Oil_Leakage_Detection_Technologies_Principles_and_Approaches.

9. Foroushani M.A. Remote sensing for physical protection of the pipeline network online monitoring of corridor based infrastructure. 2010. URL: https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/16_XXXVIII-part7B.pdf.

10. Космический тепловизионный мониторинг нефтегазопроводного транспорта / Д.Ю. Мин-кин, С.Н. Терехин, А.П. Корольков, Ш.А. Османов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and explosion safety. 2017. Т. 26, № 12. С. 45–51.

11. Manekiya M. Leakage detection and estimation using IR thermography. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/311254439_Leakage_detection_and_estimation_using_IR_thermography.

12. Охрана окружающей среды в регионах деятельности ПАО «НК «Роснефть»: Ханты-Мансийский Автономный Округ – Югра (ХМАО – Югра). URL: https://www.rosneft.ru/Investors/ESG/Contributing_to_the_UN_Sustainable_Development_Goals/.

13. Тепловизоры на вооружении воздушных стражей трубопроводов // Сайт ООО «НПО «АМБ». URL: <http://teplovizor.su/teplovizory-na-vooruzhenii-vozdushnyh-strazhey-truboprovodov>.

14. Hausamann D. Monitoring of gas transmission pipelines – a customer driven civil UAV application, 2010. URL: https://www.researchgate.net/publication/224779029_Monitoring_of_gas_transmission_pipelines_-_a_customer_driven_civil_UAV_application.

V.V. Dedkova, M.M. Shlyahova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: v.v.dedkova@sgugit.ru; m.m.shlyahova@sgugit.ru

MONITORING OF OIL PIPELINES TECHNICAL STATE BY REMOTE SENSING METHODS

Possibilities of remote sensing data application for oil and gas industry facilities monitoring are considered. The main source of pollution in oil refining industry is the leakage of oil products during their storage and transportation via pipelines. This type of pollution damages the environment, negatively affecting the soil, water and atmosphere. Explosions and fires associated with a spill pose a danger to human life. Application of remote sensing data for monitoring helps to minimize risks of pipeline breaks, as well as to organize rescue measures in case of hydrocarbon leak.

Keywords: remote sensing, monitoring, oil spill, oil pipeline, emergency.

А.В. Дергунов¹, Е.И. Пономарев^{2,3}

¹ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru; evg@ksc.krasn.ru

ДИНАМИКА НАРУШЕННОСТИ ЛЕСОВ МЕРЗЛОТНОЙ ЗОНЫ СИБИРИ ЗА 20 ЛЕТ ПО ДАННЫМ В ИК ДИАПАЗОНЕ

Леса Средней Сибири подвержены воздействию как со стороны природных процессов, так и со стороны антропогенных и техногенных факторов. Участки леса после воздействия различных факторов детектируются на спутниковых снимках в тепловом ИК диапазоне как тепловые аномалии подстилающей поверхности. С использованием такого подхода в работе проведен геопространственный анализ динамики нарушенности лесов мерзлотной зоны Сибири за 20-тилетний период. Показан тренд увеличения общей площади нарушенных территорий за исследуемый период времени (на 19,4 %). Получены количественные оценки влияния техногенного фактора на распределение тепловых аномалий в районе исследований.

Ключевые слова: криолитозона, Сибирь, тепловые аномалии поверхности, MODIS, Landsat.

Леса Средней Сибири подвержены воздействию как со стороны природных процессов, так и со стороны антропогенных и техногенных факторов. Здесь, на территории бассейнов рек Нижняя Тунгуска и Подкаменная Тунгуска, доминируют лиственные леса. В последние десятилетия в связи с развитием северных территорий, разработкой месторождений полезных ископаемых наблюдается существенное повышение уровня нарушенности лесов. При этом одной из главных причин, оказывающих ежегодное воздействие на леса Сибири, остаются пожары растительности, которые составляют до 70 % от общего числа пожаров Евразии [1].

Установлено, что участки лесов, подвергшиеся воздействию различных факторов, в силу изменения спектральных характеристик в широком диапазоне спектра уверенно детектируются в тепловом ИК диапазоне в формате тепловых аномалий подстилающей поверхности со спутников [2–4]. Такие аномалии, как показано в ряде современных работ [5; 6], могут быть причиной изменения стабильности экосистем региона.

Количественные характеристики и геопространственный анализ степени деструктивного воздействия природных и техногенных факторов в криолитозоне Средней Сибири являлись целью данной работы.

Район исследования располагается на территории бассейнов двух рек – Нижняя Тунгуска и Подкаменная Тунгуска (57,8–68° с.ш. и 87,9–109,4° в.д.). Данные бассейны представлены в масштабе 4-го уровня из 12 по классификации *Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales* (HydroSHEDS) [7]. Территория относится к мерзлотной зоне Сибири, общая площадь составляет 713 000 км² (рис. 1).

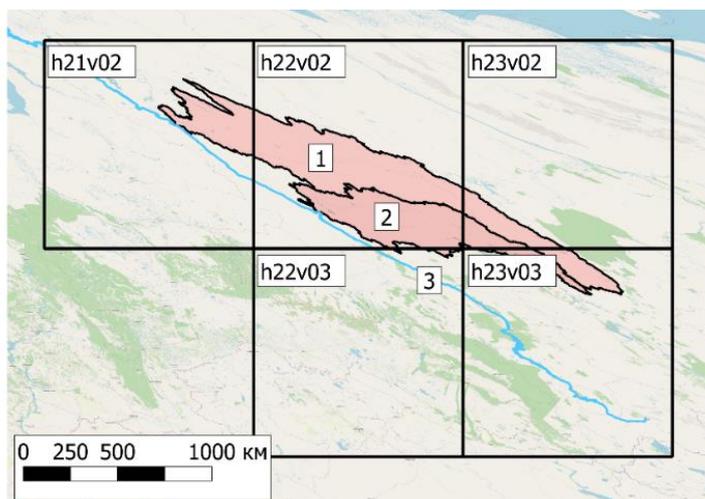


Рис. 1. Изображение исследуемой территории с наложением пяти ячеек регулярной сетки MODIS в проекции WGS84: 1 – бассейн реки Нижняя Тунгуска; 2 – бассейн реки Подкаменная Тунгуска; 3 – река Енисей

В работе использовались данные ИК диапазона прибора MODIS/Terra (продукт MOD11B3), которые представляют собой дневные композитные среднемесячные изображения с использованием 20, 22, 23, 29, 31 и 32 каналов радиометра MODIS с пространственным разрешением 6 км. Данные получены на ресурсе LAADS DAAC (NASA) [8].

Карты температуры поверхности исследуемой территории рассчитывались на основе продукта MOD11B3 в границах бассейнов рек. Выборка данных составила пять изображений, соответствующих следующим номерам регулярной сетки MODIS: h21v02, h22v02, h23v02, h22v03, h23v03 (рис. 1).

Для детального анализа динамики температуры поверхности использовался полигональный ГИС-слой более мелких таксонов, состоящий из 18 бассейнов рек масштаба 5-го уровня из 12 по классификации HydroSHEDS (рис. 2).

На основе анализа значений температуры подстилающей поверхности было установлено, что с 2001 по 2009 гг. общая площадь нарушенных лесов бассейна реки Нижняя Тунгуска увеличилась на 7,77 %, или 36 752,1 км²; бассейна реки Подкаменная Тунгуска – на 4,7 %, или 11 280 км²; в период с 2009 по 2019 гг. – на 10,34 %, или 48 908,2 км², и на 17,19 %, или 41 256 км², соответственно. Общая доля площадей с признаками нарушения растительных покровов летом в 2001 г. составляла 9,36 %, или 66 736,8 км², в 2009 г. – 16,09 %, или 114 721,7 км², а в 2019 г. – 28,8 %, или 205 344 км².

На рис. 2 приведены результаты классификации, которые отражают степень нарушения (γ) каждого бассейна для 2001, 2009 и 2019 гг.

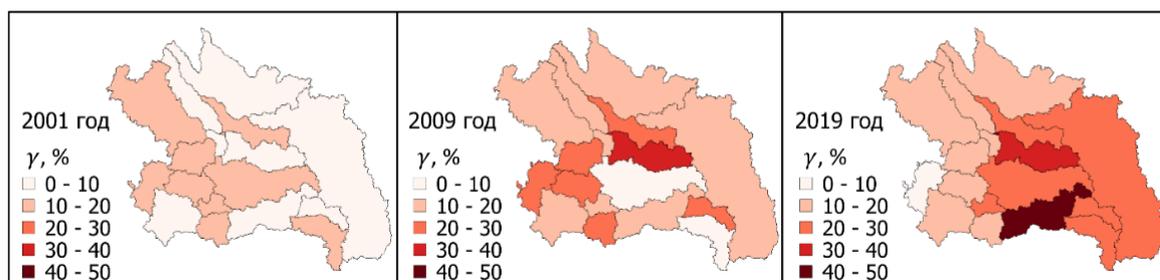


Рис. 2. Степень нарушения (γ) исследуемой территории в 2001, 2009 и 2019 гг.

Наибольший вклад в появление очагов нарушенности подстилающей поверхности вносят лесные пожары. Это касается всех 18 исследуемых полигонов. Также нельзя исключать антропогенный фактор, а именно лесозаготовительную деятельность, разработку месторождений полезных ископаемых и т.д.

Дополнительно проведен анализ данных для промышленной зоны Северо-Енисейского района Красноярского края (59,7–60,28° с.ш. 92,26–93,61° в.д.) площадью 4 653 км². Оценка тепловых аномалий подстилающей поверхности исследуемой территории производилась на основе данных, полученных со спутников *Landsat-5*, 7 и 8 (USGS, US Geological Survey, <https://earthexplorer.usgs.gov> [9]) для летнего периода: июнь 2000 г., июль 2011 г. и июль 2019 г. Использовались тепловые каналы: B6 – *Landsat-5* и 7, $\lambda = 10,4\text{--}12,5$ нм, пространственное разрешение 60 м; B10 – *Landsat-8*, $\lambda = 10,6\text{--}11,9$ нм, пространственное разрешение 100 м. Для определения температуры подстилающей поверхности производилась попиксельная калибровка сцен с последующим вычислением значений температуры.

Установлено, что за последние 20 лет площадь нарушенных участков увеличилась более чем в 6 раз. В период с 2000 по 2011 г. разница между площадями нарушенной территории исследуемого района составила 27 км², в период с 2011 по 2019 г. – 330,8 км². Таким образом, динамика аномалий теплового поля промышленной зоны Северо-Енисейского района отражает рост доли нарушенных участков в связи с антропогенной деятельностью в регионе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (№ 18-41-242003).

Список литературы

1. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в XXI веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) / Е.А. Лупян [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 158.
2. Пономарев Е.И., Пономарева Т.В. Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // Сибирский экологический журнал. 2018. № 4. С. 477–486. DOI: 10.15372/SEJ20180408.
3. Краснощеков К.В., Дергунов А.В., Пономарев Е.И. Оценка тепловых карт подстилающей поверхности на участках вырубок по данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 2. С. 87–97.
4. Yakimov N., Ponomarev E. Dynamics of post-fire effects in larch forests of Central Siberia based on satellite data // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 149. P. 03008. eISSN: 2267-1242. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014903008>.
5. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia / A.A. Knorre [et al.] // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 652. P. 314–319.
6. The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia / E. Ponomarev [et al.] // Forests. 2020. Vol. 11 (8). P. 790. URL: <https://doi.org/10.3390/f11080790>.
7. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world's large river systems // Hydrological Processes. 2013. № 27 (15). P. 2171–2186.
8. The level-1 and atmosphere archive & distribution system distributed active archive center (LAADS DAAC). URL: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>.
9. US Geological Survey. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>.

A.V. Dergunov¹; E.I. Ponomarev^{2,3}

¹Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru; evg@ksc.krasn.ru

THE DYNAMICS OF FORESTS DISTURBANCE IN THE PERMAFROST ZONE OF SIBERIA FOR 20 YEARS USING DATA IN IR RANGE

Both natural processes and technogenic factors affect the forests of Central Siberia. Disturbed forest areas are detected in the thermal IR range as a thermal anomalies of the underlying surface. Based on satellite data in the infrared range, a geospatial analysis of the disturbance of the forest in the permafrost zone of Siberia for a 20-year period was carried out. A tendency was found to increase the total area of disturbed territories during the study period (by 19,4 %). Quantitative estimates of the influence of the technogenic factor on the distribution of thermal anomalies for the study area were obtained.

Keywords: cryolithozone, Siberia, thermal surface anomalies, MODIS, Landsat.

УДК 504.3.054+528.88

А.В. Дергунов¹, О.Э. Якубайлик²

¹Младший научный сотрудник, ФИЦ КИЦ СО РАН, Красноярск, Россия

²Кандидат физико-математических наук,

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru; oleg@icm.krasn.ru

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ В ПЕРИОДЫ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЙ В КРАСНОЯРСКЕ

Работа посвящена поиску взаимосвязей между загрязнением атмосферы Красноярска взвешенными частицами и температурной инверсией – увеличением температуры с высотой в приземном слое атмосферы. Исследования проводятся на основе данных реанализа метеорологической модели NASA GFS по температуре воздуха на разных высотах атмосферы и результатов измерений концентраций взвешенных частиц *PM2.5* в системе мониторинга воздуха КИЦ СО РАН, сведений об официально объявленных периодах неблагоприятных метеоусловий. Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой степени взаимосвязи между указанными величинами, возможности использования данных модели GFS для прогнозирования экологической ситуации.

Ключевые слова: температурная инверсия, GFS, HMY, PM2.5.

Введение. Проблема загрязнения атмосферы крупных городов мира стоит остро. Многочисленные исследования показывают, что существует связь между повышенными концентрациями взвешенных в воздухе твердых частиц (*PM*) и ухудшением здоровья людей в мегаполисах [1]. Однако не только антропогенный фактор, но и природные процессы вносят вклад в создание неблагоприятных экологических

условий. Например, температурная стратификация нижних слоев атмосферы может вызвать температурную инверсию, т.е. слой теплого воздуха, ограничивающий вертикальное рассеяние вредных примесей в атмосфере [2].

Температурные инверсии делят на три типа: приземные (нижняя граница расположена на уровне земли), приподнятые (нижняя граница расположена на некоторой высоте от поверхности) и инверсии свободной атмосферы (высота может сильно различаться) [3].

По данным Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края, в Красноярске с января 2019 г. по апрель 2020 г. было установлено 9 периодов неблагоприятных метеорологических условий (НМУ): в 2019 г. – с 8 по 13 февраля, с 26 по 28 ноября, с 5 по 6 декабря, с 23 по 24 декабря и с 27 по 30 декабря; в 2020 г. – с 10 по 13 января, с 14 по 18 февраля, с 25 по 27 февраля и с 17 по 29 апреля [4].

На рисунке представлено изображение района исследования – город Красноярск и прилегающие окрестности.

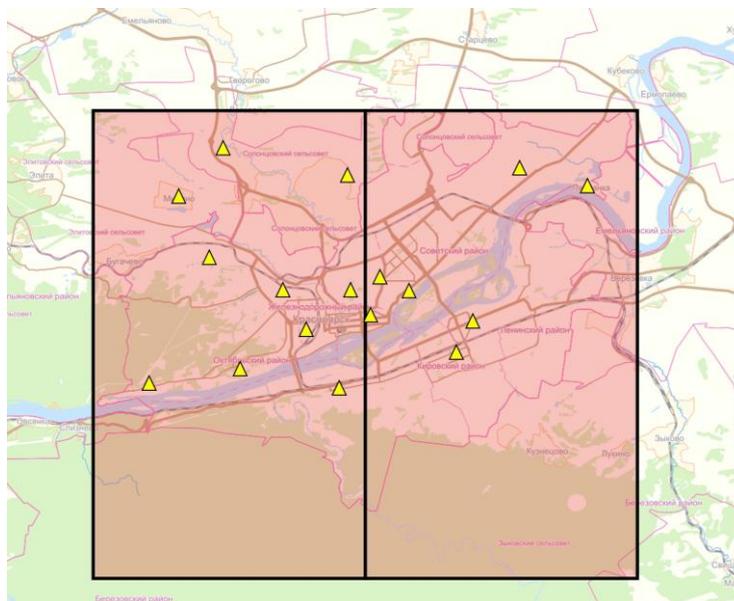


Рисунок. Исследуемая территория

На рисунке желтыми треугольниками обозначены 17 наземных постов экологического мониторинга сети ФИЦ КИЦ СО РАН, красным цветом приведены две ячейки, соответствующие регулярной сетки модели прогноза погоды NASA GFS (*Global Forecast System*).

В данной работе изучались метеоусловия в Красноярске в период с 1 января 2019 г. по 30 апреля 2020 г. по данным наземных постов и метеорологической информации модели прогноза погоды GFS.

Материалы и методы. Модель GFS – это система численного прогнозирования погоды, содержащая глобальную компьютерную модель и вариационный анализ, выполняемые Национальной метеорологической службой США. Глобальный анализ данных и прогнозирование осуществляется 4 раза в сутки [5]. С января 2015 г. горизонтальное разрешение данных модели GFS составляет 0,25 градуса (около 25 км). В данной работе использовались фактические данные анализа температуры воздуха на уровне поверхности земли, а также на высотах 750 и 1 500 м [6].

Обработка исходных данных модели GFS состояла в их обрезке по заданным координатам и интересующим слоям информации, а затем конвертировании полу-

чившихся данных в табличные файлы формата *.csv и объединении их содержимого в один большой файл формата *.csv.

Выявление слоев инверсии производилось путем получения разности между данными о температурах на различных высотах, когда разность давала отрицательное значение. Например, при отрицательной разности между температурами на поверхности и на высоте 750 м – инверсия считалась приземной или приподнятой, если между 750 и 1 500 м – приподнятая или высотная (инверсия свободной атмосферы). Если фиксировались приземная/приподнятая и высотная инверсии одновременно, то это считалось мощной инверсией.

Также в работе использовались данные о концентрациях взвешенных твердых частиц в воздухе *PM2.5* и скорости ветра, которые были получены на геопортале ИВМ СО РАН [7]. Среднесуточные данные о *PM2.5* усреднялись по всем доступным постам наблюдения в городе.

Результаты и обсуждение. Был получен архив данных за период с 1 января 2019 г. по 30 апреля 2020 г., содержащий информацию о температуре воздуха на уровне поверхности и высотах 750 и 1 500 м, усредненные среднесуточные концентрации частиц *PM2.5* и информацию о скорости ветра для Красноярска.

В таблице представлены результаты анализа официальных периодов НМУ в 2019–2020 гг. по полученным данным.

Таблица

Данные о состоянии атмосферы города
во время официальных периодов НМУ

Дата	Концентрация <i>PM 2.5</i> , мг/м ³	Скорость ветра, м/с	Температурная инверсия
08–13 февраля 2019 г.	0,064–0,165	0,25–0,8 11,625 – 13 февраля	Все дни. Приземная или приподнятая
26–28 ноября 2019 г.	0,085–0,111	0–0,125	26 и 27 ноября. Приземная или приподнятая
05–06 декабря 2019 г.	0,025–0,032	0,5; 4,9 – 6 декабря	Все дни. Мощная
23–24 декабря 2019 г.	0,065–0,070	0,125–2,25	Все дни. Приземная или приподнятая
27–30 декабря 2019 г.	0,026–0,099	0–1,5	Все дни. Мощная
10–13 января 2020 г.	0,035–0,115	0–1,5 5,9 – 13 января	Все дни. Приземная или приподнятая
14–18 февраля 2020 г.	0,057–0,127	0–0,87	Все дни. Приземная или приподнятая
25–27 февраля 2020 г.	0,045–0,050	0,5–0,87	Все дни. Приземная или приподнятая
27–29 апреля 2020 г.	0,015–0,032	0,75–1,25	Отсутствует

По данным из таблицы видно, что семь из девяти официальных периодов НМУ характеризуются концентрациями *PM2.5*, превышающими среднесуточный ПДК в 0.035 мг/м³, а также низкой скоростью ветра в городе и присутствием температурных инверсий. В трех случаях скорость ветра резко увеличивалась в последний день периода, при этом концентрации *PM2.5* в этот день значительно падали. Преобладающий тип обнаруженных инверсий – приземная или приподнятая. В периоды с 5 по 6 декабря 2019 г. и с 27 по 29 апреля 2020 г. среднесуточная концентрация *PM2.5* в городе не превышала среднесуточный ПДК.

Помимо официальных данных о режимах НМУ в городе за период исследования с 1 января 2019 г. по 30 апреля 2020 г. были обнаружены еще 8 периодов, когда среднесуточная концентрация *PM2.5* значительно превышала среднесуточный ПДК:

в 2019 г. – с 1 по 5 января, с 11 по 13 января, с 23 по 25 января, с 13 по 16 июля и с 20 по 27 июля; в 2020 г. – с 22 по 23 января, с 27 по 28 января и с 31 января по 6 февраля. Температурные инверсии в эти периоды фиксировались: в 2019 г. – 1, 5, 12, 13, 24, 25 января, 13, 14 июля; в 2020 г. – 22, 23, 27, 28, 31 января, 1, 2, 3, 4, 6 февраля.

Заключение. Анализ метеоданных высокого пространственного разрешения, например, модели GFS, способствует решению задач, связанных с изучением нижнего слоя атмосферы и его загрязнения, а также может сыграть важную роль в более точном выявлении периодов НМУ и их прогнозировании.

Список литературы

1. Kaufman Y.J., Tanré D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system // Nature. 2002. Vol. 419, № 6903. С. 215–223.
2. Смит К. Основы прикладной метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
3. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 777 с.
4. Министерство экологии и рационального природопользования Красноярского края. URL: <http://www.krasecology.ru/Nmu> (дата обращения: 17.03.2020).
5. The Global Forecast System (GFS) Documentation. URL: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php (дата обращения: 17.03.2020).
6. NCEP GFS 0.25 Degree Historical Archive. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (дата обращения: 02.03.2020).
7. Геопортал ИВМ СО РАН. URL: <http://gis.krasn.ru/blog/> (дата обращения: 02.03.2020).

A.V. Dergunov¹, O.E. Yakubailik²

¹Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru; oleg@icm.krasn.ru

ANALYSIS OF TEMPERATURE INVERSIONS DURING ADVERSE WEATHER CONDITIONS IN KRASNOYARSK

The work is devoted to the search for relationships between the pollution of the atmosphere of Krasnoyarsk by particulate matter and temperature inversion – an increase in temperature with height in the surface layer of the atmosphere. The research is based on reanalysis data of the NASA GFS meteorological model for air temperature at different altitudes of the atmosphere and the results of measurements of concentrations of particulate matter in the air monitoring system of the KSC SB RAS, as well as information about officially declared periods of adverse weather conditions. The results obtained allow us to conclude that there is a high degree of correlation between these values, and that it is possible to use the GFS model data to predict the environmental situation.

Keywords: temperature inversion, GFS, NMU, PM2.5.

Е.А. Дунаева

Кандидат технических наук, ФГБУН «НИИСХ Крыма»,
Симферополь, Республика Крым
e-mail: water_crimea@hotmail.com

ОЦЕНКА УРОВНЯ ВАРЬИРОВАНИЯ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ПОСЕВОВ

Предмет исследования – уровень варьирования биопродуктивности посевов, выращиваемых по различным технологиям. Целью работы является сравнение вариации параметров биопродуктивности, взаимосвязанных с водопотреблением агроценоза и измеренных с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с сопряженными данными наземных наблюдений. Методология исследования основана на сопоставлении данных нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI, полученного по данным ДЗЗ с материалами подспутниковых наземных данных полученных с использованием портативного прибора *GreenSeeker* на посевах озимых и поздних яровых культур. Результаты исследований демонстрируют хороший уровень сходимости наземных данных с материалами ДЗЗ (данные спутника *Landsat-8*) для пилот-участков полей (на которых ведется учет динамики влагозапасов) с производственными посевами подсолнечника, выращиваемого по различным технологиям по уровню варьирования индекса NDVI. Для озимой пшеницы до стадии колошения значения коэффициента вариации (C_v), по данным наземных наблюдений, существенно выше соответствующих значений, полученных по данным ДЗЗ как на уровне поля, так и на уровне пилот-участков. Коэффициент детерминации связи индекса NDVI, полученного по данным ДЗЗ для озимой пшеницы для всего поля с измеренным значением для пилот-участка в период развития начиная с фазы колошения, равен 0,98 для *no-till* технологии и существенно ниже для традиционной (0,72). Для подсолнечника высокий уровень связи с коэффициентом детерминации около 0,98 наблюдался для основной части его вегетации. Учитывая линейную связь индекса NDVI с индексом листовой поверхности, LAI, взаимосвязанные с фазами развития растений, получаемые с помощью наземных инструментов значения параметра NDVI и оценки уровня его варьирования, могут быть использованы для получения промежуточных контрольных или корректирующих точек при моделировании онтогенеза полевых культур.

Ключевые слова: традиционная технология, *no-till*, биопродуктивность, варьирование, ДЗЗ, NDVI.

Введение. Сельскохозяйственные культуры в границах поля или полевого участка имеют определенный уровень пространственной неоднородности посева, определяемый комплексом почвенных и агробиологических параметров и проявляющихся через соответствующее варьирование биопродуктивности [1; 2]. Для характеристики такого пространственного варьирования часто используются косвенные методы, основанные на связи уровня биопродуктивности, например, с разным уровнем отражения растительностью электромагнитного излучения различных частей спектрального диапазона. Предмет исследования – динамика варьирования индекса NDVI для озимых и поздних яровых культур, выращиваемых по традиционной и *no-till* технологиям. Цель работы – оценка тесноты связи параметра NDVI полученного по данным ДЗЗ и наземным наблюдениям, в том числе с задействованием данных различного пространственного разрешения.

Материалы и методы. В качестве исходных данных для анализа уровня варьирования параметра NDVI на посевах сельскохозяйственных культур, выращиваемых по различным технологиям, использованы материалы данных ДЗЗ спутника *Landsat-8* и данные периодических наземных измерений NDVI переносным прибором *Trimble GreenSeeker Handheld*.

На полях производственных посевов озимой пшеницы и подсолнечника, выращиваемых по традиционной и *no-till* технологиям, выделены границы пилот-территорий (100×100 м), на которых проводился мониторинг водного режима посевов, а также в границах которых осуществлялись измерения NDVI. Для сравнения технологий выбирались граничащие друг с другом или расположенные близко поля с посевами однопольных культур (рис. 1, зеленым цветом выделены границы полей, красным – пилот-участков).

Измерение индекса NDVI прибором *GreenSeeker* осуществлялось с учетом рекомендаций производителя к минимальному значению степени листового покрытия [3].



Рис. 1. Расположение сравниваемых полей и пилот-участков озимой пшеницы (1 – *no-till*; 2 – традиционная технология) и подсолнечника (3 – *no-till*; 4 – традиционная технология)

Результаты. Динамика NDVI, по данным ДЗЗ (*Landsat-8*) и наземных наблюдений (*GreenSeeker*), для соседних или недалеко расположенных полей с посевами озимой пшеницы и подсолнечника, выращиваемых в 2020 г. по традиционной и *no-till* технологии, приведена на рис. 2.

Анализ варьирования индекса NDVI, полученного по снимкам *Landsat-8*, показывает, как и в исследованиях 2019 г. [4], различный уровень сходимости с наземными наблюдениями для посевов озимой пшеницы. Коэффициент вариации находится в диапазоне от 0,10 до 0,27 для пилот-участков наземных наблюдений и от 0,07 до 0,14 для полей (от 0,03 до 0,11 для участков), по данным ДЗЗ при сравнении данных с экстраполированными значениями ближайших по срокам доступности спутниковых сцен в период вегетации пшеницы до фазы колошения (в период фаз колошения и цветения уровень варьирования снижается, а затем опять возрастает к периоду спелости). При этом варьирование индекса для посевов подсолнечника, расположенных на более удаленном расстоянии (расстояние между пилот-участками двух сравниваемых полей 3,2 км), является схожим – существенно уменьшаясь к периоду цветения и вновь увеличиваясь к периоду налива семян и созревания.

Данные, приведенные на рис. 2, характеризуют более раннее развитие озимой пшеницы на технологии *no-till* как на всем поле, так и на пилот-участке, по сравнению с традиционной технологией, что было вызвано более ранним сроком сева. До стадии развития озимой пшеницы «появление колоса» (колошения) значения коэффициента вариации индекса NDVI, измеренного прибором *GreenSeeker*, суще-

ственно выше соответствующих значений, полученных по данным ДЗЗ как на уровне поля, так и на уровне пилот-участков.

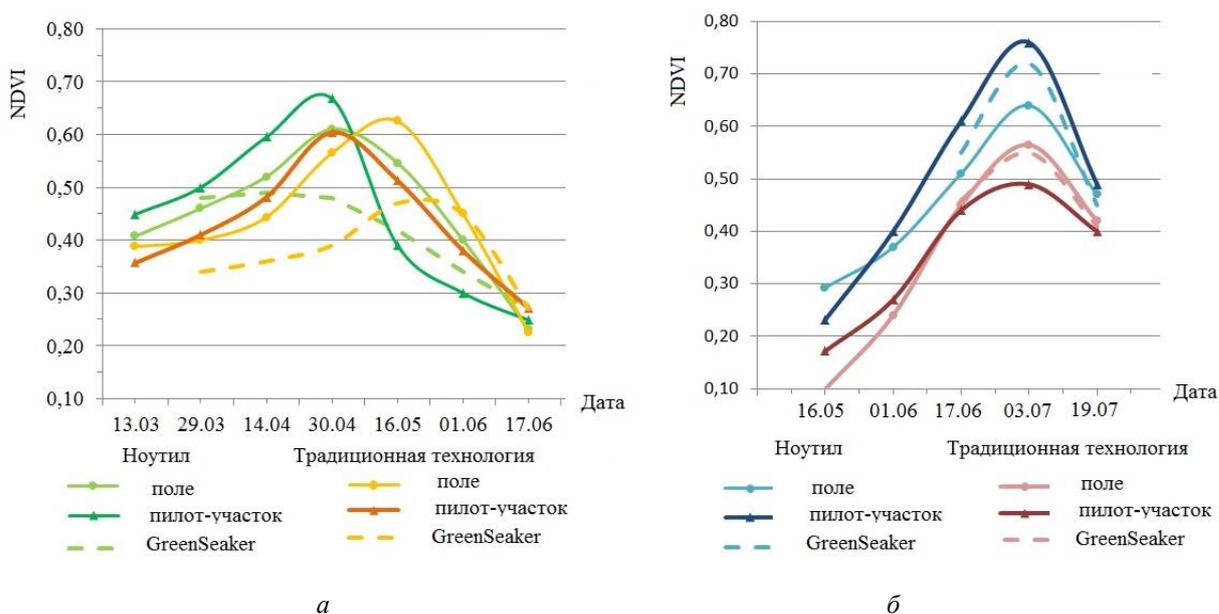


Рис. 2. Сравнение динамики NDVI по данным спутника *Landsat-8* и материалам наземных измерений прибором *GreenSeeker* для производственных посевов озимой пшеницы (а) и подсолнечника (б). Джанкойский район. 2020 г.

Выводы. Результаты исследований показали возможность использования наземных данных, полученных с использованием прибора *GreenSeeker* на пилот-участках производственных посевов отдельных сельскохозяйственных культур, возделываемых по различным технологиям в богарных условиях степной части Крымского полуострова, для характеристики динамики их онтогенеза совместно с данными ДЗЗ. Сходимость данных ДЗЗ и наземных наблюдений характеризуется коэффициентом детерминации от 0,72 до 0,98 для озимой пшеницы и подсолнечника соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-016-00148 А.

Список литературы

1. Попович В.Ф., Дунаева Е.А., Моляр С.А. Оценка возможного снижения эвапорации при прямом посеве // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф.; науч. ред. В.С. Паштецкий. 2019. С. 330–331.
2. Гулянов Ю.А. Мониторинг фитометрических параметров с использованием инновационных методов сканирования посевов // Таврический вестн. аграрной науки. 2019. № 3 (19). С. 64–76. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76
3. *GreenSeeker® Handheld Crop Sensor*. URL: <https://ninjaag.com/wp-content/uploads/2019/09/TrimbleGreenSeekerDoc.pdf>.
4. Дунаева Е.А. Возможности сравнения различных технологий возделывания сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VI Междунар. науч. конф. 2019. С. 232–235.

Ie.A. Dunaieva

Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Crimea
e-mail: water_crimea@hotmail.com

EVALUATION OF THE CROPS BIOPRODUCTIVITY LEVEL VARIATION

The subject of the research is the level of variation of the biological productivity of crops grown using various technologies. The aim of the work is to compare the variation of bioproductivity parameters, interrelated with the water consumption of the agrocenosis and measured using Earth remote sensing data (ERS) with associated ground-based data. The research methodology is based on comparing the data of the normalized difference vegetation index NDVI, obtained from remote sensing data with the materials of ground-based satellite data obtained using a portable device GreenSeeker on winter wheat and late spring crops. The research results demonstrate a good level of convergence of ground data with remote sensing data (Landsat-8) for pilot areas of fields (where the dynamics of soil moisture are recorded) with production crops of sunflower grown using various technologies according to the NDVI index variation. For winter wheat before the heading stage, coefficient of variation (C_v) of the NDVI values according to ground-based observations are significantly higher than the corresponding NDVI values obtained from remote sensing data both at the field level and at the level of pilot sites. The coefficient of determination of the relationship of the NDVI index obtained from the remote sensing data for winter wheat for the entire field with the measured value for the pilot plot during the development period starting from the heading phase is 0,98 for no-till technology and significantly lower for traditional technology (0,72). For sunflower, a high connection level with a coefficient of determination – 0,98 was observed for the main part of its growing season. Taking into account the linear relationship between the NDVI index and the LAI leaf surface index, the NDVI values obtained using ground-based instruments and assessing the level of its variation can be used to obtain intermediate control or correction points when modeling the ontogeny of field crops.

Keywords: traditional technology, no-till, bioproductivity, variation, remote sensing, NDVI.

УДК [631.619+622.333(571.523)]: 528.837

А.А. Жуков, Е.Ю. Жукова

Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Россия
e-mail: flk19@mail.ru; biosara@mail.ru

ДИНАМИКА ПРОДУКТИВНОСТИ РЕКУЛЬТИВИРУЕМОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ИЗЫХСКОГО РАЗРЕЗА (TERRA MODIS)

Предметом исследования является ход динамики продуктивности растительности на отвалах Изыхского угольного разреза (2000–2019 гг.), вычисленной по *Terra Modis*. Цель – выявление закономерностей сезонной и многолетней динамики рекультивируемой растительности в результате сукцессии по снимкам. Методология включала обработку информации по валовой первичной продукции и эвапотранспирации, а также выявление взаимосвязи с метеоданными 2018–2019 гг. В многолетней динамике наблюдается положительный тренд – по суммарной валовой первичной продукции с 1,7 до 5,5 кг/м² / 8 дней и по эвапотранспирации – с 1 142 до 2 784 кг/м² / 8 дней. Эвапотранспирация коррелировала с продуктивностью. С 2016 г. продуктивность выходит на плато, что свидетельствует об освоении растениями экологических ниш. Фитомасса рекультивированной растительности

в 1,5 раза превышала массу степного участка. Сезонная динамика в 2019 г. показала, что сообщества имеют на отвалах большую продуктивность (в отличие от степи) и один пик в первой декаде июля. Сумма температур и продуктивность имели высокую взаимосвязь ($R^2 = 0,7$) по сравнению со степью ($R^2 = 0,2$). Данные *Terra Modis* могут применяться в области экологического мониторинга рекультивируемой растительности угольных отвалов.

Ключевые слова: рекультивация, *Terra Modis*, валовая первичная продукция, эвапотранспирация, динамика растительности.

Введение. Мониторинг рекультивируемых земель, нарушений растительного покрова и загрязнения проводится по данным ДДЗ [1; 2]. Угольная промышленность в Хакасии динамично развивается (7 разрезов, 5222 га нарушенных земель). Коэффициент восстановления экосистемы невысок [2]. Восстановление растительного покрова на отвалах в Хакасии затруднено. Недостаток влаги, высокие температуры, при коротком периоде температур выше 10 °С приводят к тому, что продолжительное время идет мумификация органики, а не ее разложение [3; 4]. Цель работы – выявить закономерности сезонной и многолетней динамики продуктивности растительности в результате сукцессии после рекультивации Изыхского разреза (Хакасия) по данным *Terra Modis*.

Методика исследования. Для работы использованы данные *Terra Modis* с сайта <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears>: 1) валовая первичная продукция *gross primary production* (GPP) [5]; 2) эвапотранспирация [6] (артефакты заменяли средним арифметическим с соседних композитов). Сумма температур получена с сайта <https://rp5.ru>. Для интегральной продуктивности и эвапотранспирации (полусумма оснований, умноженная на 8 дней композита) рассчитывали сумму и стандартное отклонение, дополнительно рассчитывали регрессию (Excel).

Физико-географическое описание района исследования. Угольный разрез «Изыхский» разрабатывался с 1960-х гг. В 2000-х гг. начата его рекультивация [1]. Климат континентальный, радиационный баланс 33–34 Ккал/см², на испарение затрачивается 65 %. Сумма температур за теплое время года составляет 1 800–1 950 °С. Количество осадков 320 мм [3]. Распространены каштановые или южные и обыкновенные черноземы [3]. Слой до 2 м сформирован четвертичными породами. Гумус в слое до 40 см составляет 1,5–3,4 % [1]. Эволюция почв степей на отвалах достигает только органо-аккумулятивной, реже дерновой, стадии [7]. По причине пластинчатой формы и угловатости эмбриоземов происходит уплотнение почв [4]. Эрозия, дефляция и эоловое выветривание в сухостепной зоне может привести к опустыниванию и затруднению восстановления [8]. На отвале произрастали *Artemisia glauca*, *Art. Sieversiana*, *Sonchus arvensis*, *Poa pratensis*, *Elytrigia repens*, *Medicago falcata*, *Calamagrostis epigeios*, *Cirsium setosum*, *Hieracium umbellatum*, *Lactuca tatarica*, *Hordeum jubatum*, *Melilotus officinalis*, *M. albus*, *Kitagawia baicalensis*, *Glycyrrhiza uralensis* и др. [1].

Результаты исследования. С точки зрения изучения сукцессий данные *Terra Modis* представляют интерес прежде всего за счет значительного архива (рис. 1).

Имеются 3 пика в 2003, 2014 и 2018 гг., а также спады в 2002, 2005, 2013 и 2015. Наименьшей фитомассой отличается степь (*Koeleria cristata*, *Artemisia frigida*, *Poa botryoides*, *Potentilla acaulis*). Наблюдается положительный тренд для всех участков. Высокие показатели продуктивности совпадают с наземными данными [1]. Эвапотранспирация коррелирует с продуктивностью (рис. 2). В центральной части эвапотранспирация выходит на первое место за счет накопления воды (физическое испарение).

Рассмотрим сезонную динамику за 2019 г. (рис. 3).

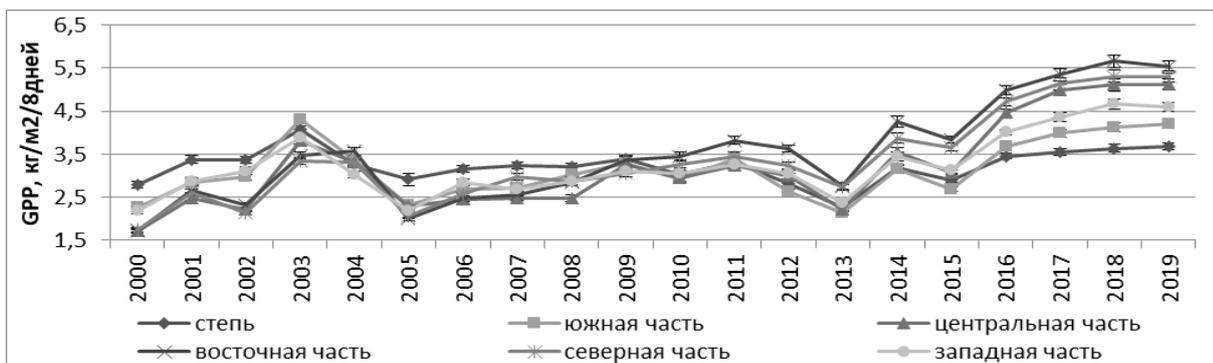


Рис. 1. Суммарная валовая продукция сообществ Изыхского отвала (2000–2019 гг.)

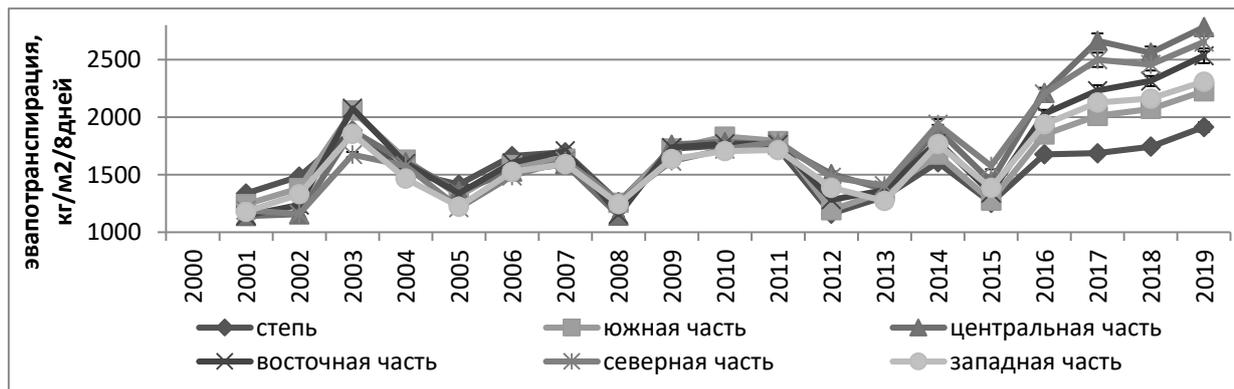


Рис. 2. Суммарная эвапотранспирация растительных сообществ Изыхского отвала в период с 2000 по 2019 г.

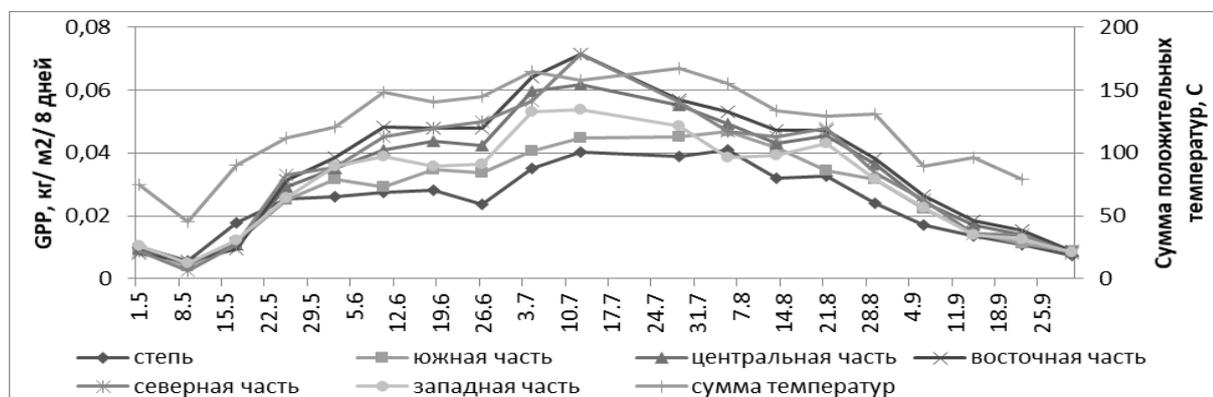


Рис. 3. Сезонная динамика растительных сообществ Изыхского отвала в 2019 г.

В отличие от степи с низкой продуктивностью фитоценозы на отвалах имели большую продуктивность и пик, совпадающий с пиком температур. Максимальные показатели имели восточная и северная части, минимальные значения зафиксированы на юге, где распространена травянистая растительность.

Выводы. С 2000 по 2019 г. наблюдался положительный тренд продуктивности. С 2016 г. показатель GPP выходит на плато. Эвапотранспирация коррелировала с продуктивностью. Восстановленные сообщества имели большую продуктивность и один пик в июле. Максимум GPP имели более увлажненные восточная и северная части, а минимум – на юге. Регрессионный анализ (2018–2020 гг.) показал, что GPP степного участка мало зависит от температуры ($R^2 = 0,2$, полином 4-й степени). R^2 для полинома 3-й степени – для южной и западной частей 0,7, для центральной, восточной и северной – 0,8. Так, растительность отвала более зависима от метеоусловий, чем степь.

Список литературы

1. Березина О.А., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Применение многолетних рядов данных космической съемки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 2. С. 144–158.
2. Результаты дистанционного мониторинга и полевых исследований экологического состояния нарушенных земель угольными разрезами в Республике Хакасия / И.В. Зеньков [и др.] // Уголь. 2017. № 9. С. 72–75.
3. Растительный покров Хакасии / А.В. Куминова [и др.]. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1976. 127 с.
4. Микроморфологические особенности почв техногенных ландшафтов угледобывающих предприятий Сибири (Россия) / Е.А. Гуркова [и др.] // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. М., 2018. С. 27–31.
5. Running S., Mu Q., Zhao M., MOD17A2H. Doi: 10.5067. (дата 25.11.2018).
6. Running S., Mu Q., Zhao M. (2017). Terra Net Evapotranspiration. MOD16A2.006. doi: 10.5067 (дата 25.11.2018).
7. Соколов Д.А. Использование сканирующей электронной микроскопии для диагностики процессов почвообразования на поверхности отвалов каменноугольных разрезов Сибири // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2014. № 3. С. 36–52.
8. Балязин И.В. Влияние угледобывающей промышленности на экологическое состояние Койбалльской степи // Географические исследования азиатской России и сопредельных территорий: новые методы и подходы. 2019. С. 28–32.

A.A. Zhukov, E.Yu. Zhukova

Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

e-mail: flk19@mail.ru, biosara@mail.ru

DYNAMICS OF PRODUCTIVITY OF RESTORED VEGETATION OF THE OPEN PIT COAL MINE IZYKHSKY (TERRA MODIS)

The subject of the study is the course of the dynamics of vegetation productivity on the dumps of the open pit mine «Izykhsky» (2000-2019), using Terra Modis. The aim is to identify patterns of seasonal and long-term dynamics of restored vegetation as a result of succession according to images. The methodology included processing information on gross primary production and evapotranspiration, as well as identifying the relationship with meteorological data for 2018-2019. There is a positive trend in the long-term dynamics - in terms of total gross primary production from 1.7 to 5.5 kg/m²/8 days and in evapotranspiration from 1142 to 2784 kg/m²/8 days. The evapotranspiration correlated with the productivity. Since 2016, productivity has reached a plateau, which indicates the development of ecological niches by plants. The phytomass of the restored vegetation was in 1.5 times greater, than the mass of the steppe site. Seasonal dynamics in 2019 showed that communities on dumps have higher productivity, in contrast to the steppe, and one peak in the first ten days of July. The sum of temperatures and productivity had a high relationship ($R^2 = 0.7$) in comparison with the steppe ($R^2 = 0.2$). Terra Modis data can be applied in the field of ecological monitoring of vegetation of coal dumps.

Keywords: recultivation, Terra Modis, gross primary production, evapotranspiration, vegetation dynamics.

И.В. Зоев, Н.Г. Марков¹, С.Е. Рыжова

¹Доктор технических наук

Национальный исследовательский

Томский политехнический университет, Томск, Россия

e-mail: ivz3@tpu.ru; markovng@tpu.ru; ser1@tpu.ru

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрена система мониторинга опасных технологических объектов, разработанная на основе современных беспилотных летательных аппаратов. Особенностью системы является наличие в ее составе интеллектуальной подсистемы компьютерного зрения, в которой с использованием системы на кристалле аппаратно-реализована сверточная нейронная сеть. Такая подсистема распознает объекты на земной поверхности и принимает решение об инциденте на территории мониторинга в режиме реального времени. Разработана сервис-ориентированная архитектура программного обеспечения центра управления мониторингом. Приведены оценки требуемых ресурсов программируемой логической интегральной схемы системы на кристалле при реализации бортового кодера-декодера помехоустойчивых кодов.

Ключевые слова: система мониторинга опасных технологических объектов, беспилотные летательные аппараты, интеллектуальная подсистема компьютерного зрения на основе свёрточной нейронной сети, подсистема передачи данных.

Введение. В настоящее время в России и за рубежом существует проблема мониторинга и выявления противоправных действий на опасных промышленных (технологических) объектах и проблема своевременного обнаружения возгораний на таких объектах и занимаемых ими территориях. Решение этих проблем особенно актуально для предприятий отраслей, имеющих сложные технологические процессы и объекты. Сегодня всё чаще начинают применять беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с установленной на них специальной аппаратурой для мониторинга таких технологических объектов.

Разработана система мониторинга опасных технологических объектов на основе современных БПЛА, которая может использоваться как автономно, так и в составе центра управления мониторингом территории.

Структура системы мониторинга. Система включает БПЛА самолетного или вертолётного типа, интеллектуальную подсистему компьютерного зрения, устанавливаемую на БПЛА, наземную информационную подсистему управления мониторингом и подсистему передачи данных. Последняя подсистема позволяет по радиоканалу посылать команды БПЛА и принимать от него данные мониторинга.

Выбор типа БПЛА зависит от особенностей технологических объектов мониторинга и решаемых с помощью системы задач. Обязательными блоками БПЛА являются контроллер полёта, GPS-модуль, аккумулятор, рассчитанный на значительное полётное время, двигатель(и) с регулятором скорости и т.п. Отметим, что БПЛА вертолётного типа может располагаться над объектом наблюдения и ввиду стационарного местонахождения иметь возможность электропитания с земли.

Интеллектуальная подсистема компьютерного зрения (ИПКЗ). Устанавливается на БПЛА и имеет в своём составе фото (или видео) камеру, тепловизор для обнаружения очагов возгораний и вычислительное устройство (ВУ). В качестве ядра ВУ используется современная система на кристалле (СнК). ВУ управляет сбором изображений объектов земной поверхности, ведёт их анализ с помощью свёрточной нейронной сети (СНС) и автоматически принимает решение о наличии инцидентов на территории мониторинга. Основное требование к ИПКЗ – выполнение всех этих функций в режиме реального времени. С учётом высоких требований со стороны СНС к производительности ВУ, предложена аппаратная реализация перспективных архитектур СНС на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) СнК. Реализованы два варианта ИПКЗ. В первом из них на ПЛИС СнК Cyclone V SX аппаратно-реализована СНС оригинальной архитектуры класса LeNet5 [1]. СНС позволяет решать задачи классификации объектов различной физической природы (технологические объекты, спецтехника, люди и т.п.) на снимках. Второй вариант ИПКЗ имеет ВУ с ядром в виде СнК Zynq 7000 (Kintex FPGA), на ПЛИС которой аппаратно-реализована оригинальная архитектура СНС *tiny-YOLO-InceptionResNet2* класса YOLO [2]. Эта СНС позволяет детектировать на снимках объекты различных классов.

Информационная подсистема управления мониторингом. Ядром подсистемы является программное обеспечение (ПО) известной свободно распространяемой геоинформационной системы (ГИС) QGIS. Это ПО позволяет операторам, работающим с подсистемой, осуществлять прокладку и отслеживание маршрутов БПЛА, отображать координаты инцидента (объекта) на электронной карте и т.п. Стандартное ПО QGIS было дополнено разработанным в её среде модулем «Активные БПЛА».

Операторы центра управления мониторингом должны для принятия окончательного решения о направлении тревожной группы в район инцидента иметь возможность быстрой интерпретации полученных с БПЛА снимков. Это означает, что информационная подсистема должна интегрироваться с имеющимися в наличии в центре одной или несколькими системами автоматизированной интерпретации принятых снимков. При разработке ПО такой подсистемы и при создании единого информационного пространства центра управления использовались принципы сервис-ориентированной архитектуры (англ. *Service-Oriented Architecture – SOA*). Учитывая это, была разработана структура ПО центра (рис. 1). Выделенные цветом компоненты принадлежат информационной подсистеме. Базовыми составляющими модели SOA являются система управления бизнес-процессами ELMA BPM и сервисная шина ESB, которые позволяют взаимодействовать подсистеме со сторонними сервисами, с базой данных (через СУБД) и с другими системами центра, например, с системой ERDAS. На рис. 1 показаны такие сторонние веб-сервисы помехоустойчивого кодирования-декодирования данных, входящие в наземную компоненту подсистемы передачи данных.

Подсистема передачи данных. Обмен командами и данными между бортовой и наземной компонентами системы мониторинга ведётся по радиоканалу. Для этого на БПЛА имеется радиомодуль, а в информационной подсистеме – приемопередающая аппаратура. Для повышения достоверности передаваемых команд и данных в бортовой и наземной компонентах подсистемы передачи данных формируются коды, обнаруживающие ошибки, и помехоустойчивые коды, исправляющие ошибки. Среди кодов, обнаруживающих ошибки, выбран циклический код CRC. Исследования показали, что лучшим алгоритмом при вычислении на ПЛИС контрольной суммы CRC является матричный алгоритм.

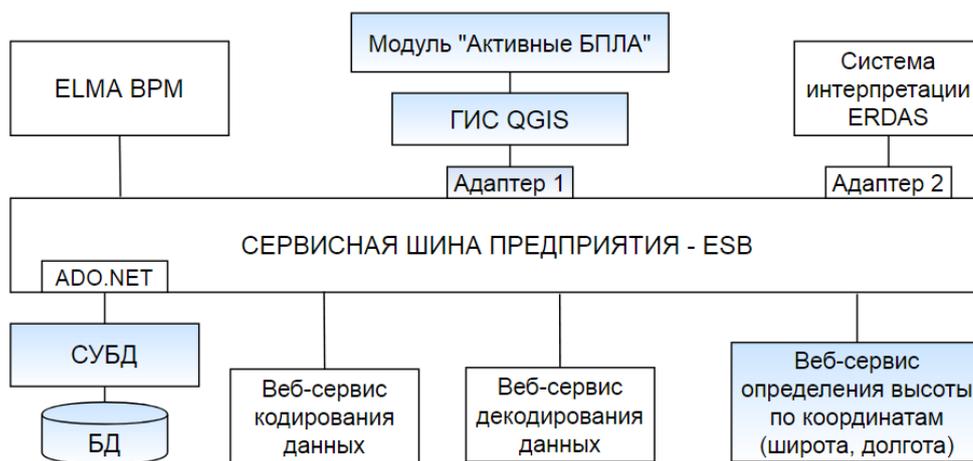


Рис. 1. Структура ПО центра управления мониторингом

Помехоустойчивое кодирование данных, передаваемых затем в наземную компоненту системы, ведется кодером на ПЛИС по алгоритму полиномиального циклического кодирования. На рис. 2 приведены результаты исследования объема требуемых кодером ресурсов ПЛИС СнК *Altera Cyclone V SX* в зависимости от длины n кодового сообщения.

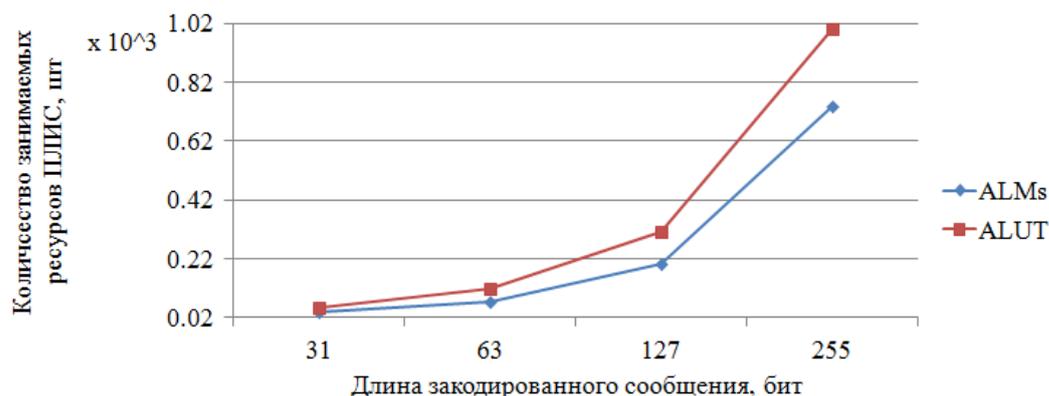


Рис. 2. Зависимость количества занимаемых кодером ресурсов ПЛИС от длины n кодированного сообщения

Были взяты коды с длиной $n = 31, 63, 127$ и 255 бит. Объем необходимых ресурсов ПЛИС оценивался через число требуемых блоков ALMs (англ. *adaptive logic modules*) и блоков ALUT (англ. *adaptive look-up table*) ПЛИС. Анализ показал, что для $n \leq 127$ требуемый для реализации кодера объем ресурсов ПЛИС остается меньше объема ресурсов, отводимого при проектировании кодера. Аналогичные результаты исследований получены для декодера на ПЛИС, реализующего декодирование данных по циклическому алгоритму.

Заключение. Созданная система мониторинга опасных технологических объектов прошла апробацию в лабораторных условиях. Результаты апробации указывают на работоспособность всех ее подсистем.

Исследования поддержаны грантом РФФИ № 18-47-700010 p_a.

Список литературы

1. Fpga-based device for handwritten digit recognition in images / I.V. Zoev, A.P. Beresnev, N.G. Markov, A.N. Malchukov // *Computer Optics*. 2017. № 6. P. 938–949.

2. Zoev I.V., Beresnev A.P., Markov N.G. Convolutional neural networks of the YOLO class in computer vision systems for mobile robotic complexes // Proceedings IEEE International Siberian Conference on Control and Communications – 2019. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8729605>.

I.V. Zoev, N.G. Markov, S.E. Ryzhova

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

e-mail: ivz3@tpu.ru, markovng@tpu.ru, ser1@tpu.ru

THE MONITORING SYSTEM OF HAZARDOUS TECHNOLOGICAL OBJECTS BASED ON UNMANNED AERIAL VEHICLES

The paper describes the system for monitoring of hazardous technological objects, which based on unmanned aerial vehicles. The feature of the system is the using of the intelligent computer vision subsystem in which hardware-implemented a convolutional neural network based on a system-on-a-chip. This subsystem recognizes objects of the earth's surface and made decision about incidents at the monitoring area in real time. It also has a service-oriented software architecture for ground-based system components. The paper present results of the research of the required resources of a field-programmable gate array for implementation of error-correction encoder-decode based-on-board.

Keywords: the monitoring system for hazardous technological objects, unmanned aerial vehicles, intelligent computer vision subsystem based on convolutional neural network, data transmission subsystem.

УДК 581.553

К.В. Иванова, А.М. Лапина

Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: ivanova.xenia@ya.ru; laany@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ SENTINEL-2 ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ МЕСТООБИТАНИЙ В ПОЛОСЕ ЛЕСОТУНДРЫ

Представлены результаты исследования растительного покрова с помощью данных дистанционного зондирования на ключевом участке правобережья реки Куи в восточно-европейских тундрах. На основе геоботанических описаний и ручного дешифрирования космоснимков Sentinel-2 для данного участка были выделены территориальные единицы растительности (ТЕР) 7 классов отдела водоразделов, соотнесенные с категориями местообитаний EUNIS. Для того, чтобы оценить возможность автоматического дешифрирования разных типов растительности и, соответственно, категорий местообитаний по материалам космосъемки, для каждого типа местообитаний на ключевом участке были рассчитаны диапазоны значений вегетационных индексов (NDVI, RVI) и водного индекса NDWI. Показано, что диапазоны значений, соответствующие каждому выделу, достоверно не различаются.

Ключевые слова: растительный покров, тундра, территориальные единицы растительности, классификация Браун-Бланке, Sentinel-2, EUNIS.

Наиболее популярным способом выделения растительности с помощью данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли является использование вегетационных индексов и отражательной способности объектов в разных диапазонах спектра. При этом для сравнения берут средние значения по отдельным типам растительности. В реальности же каждому выделу присущи диапазоны значений, которые, в отличие от средних, часто пересекаются. В данной статье представлены диапазоны значений наиболее популярных для изучения растительного покрова индексов для разных категорий местообитаний, выделенных авторами на ключевом участке правобережья реки Куи.

Материалы и методы. Для исследования был выбран участок на правобережье р. Куя в подзоне лесотундры в административных границах Ненецкого автономного округа. Была создана крупномасштабная геоботаническая карта по материалам ДЗЗ и полевых исследований, проведенных в 2018–2019 гг. Легенда к геоботанической карте разработана по типологии территориальных единиц растительности (ТЕР) И.А. Лавриненко [1; 2], согласно которой на карте выделены единицы двух высших уровней – отделы и классы. Отдел – высшая единица классификации ТЕР, соответствующая крупным геоморфологическим структурам (водоразделы, речные долины) и хорошо выделяющаяся на материалах ДЗЗ. Отделы подразделяют на классы, отражающие экологическое своеобразие генетически однородных простых форм рельефа (холм, гряда, комплексное бугристое болото, приозерная депрессия, пойма и др.). Легенда карты включает в себя семь классов единиц растительности, относящихся к отделу ТЕР водоразделов, и водные объекты. В рамках разработки классификации местообитаний восточно-европейских тундр каждая выделенная единица типологической схемы соотнесена с категориями местообитаний EUNIS [3]. Для каждой категории местообитаний с использованием материалов *Sentinel-2* авторы рассчитали диапазоны значений наиболее популярных для анализа индексов: нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), нормализованный разностный водный индекс (NDWI), относительный вегетационный индекс (RVI), – а также значения отражения в разных областях спектра (для примера приведены результаты красной области спектра).

Результаты исследования. Ниже приведена краткая характеристика единиц растительности, выделенных на ключевом участке.

Класс псаммофитных местообитаний на водоразделах. EUNIS: S2.24 (*Boreoalpine and arctic heaths*). ТЕР занимают пологонаклонные и выпуклые участки водоразделов, малоснежные зимой, с хорошо дренированными автоморфными почвами. Микрорельеф покато-бугорковато-ложбинный. Растительность: ерниковые кустарничково-лишайниковые, кустарничковые и кустарничково-лишайниковые сообщества, которые образуют гомогенные фитоценозы с мозаичной горизонтальной структурой.

Класс крутых склонов холмов. EUNIS: T1 (*Broadleaved deciduous forest*) – склоны и вершины округлых холмов на водораздельных террасах с высотами до 29 м над уровнем моря на вершинах холмов. Растительность: березовые криволеся, образованные *Betula tortuosa*.

Класс бугристых торфяников. EUNIS: D (*Mires, bogs and fens*). В этот класс объединены четыре группы болотных комплексов, которые занимают переувлажненные депрессии на водоразделах и формируются при застойном увлажнении атмосферными осадками. Из них к категории D3.1 (*Palsa mires*) относятся три группы болотных комплексов: крупнобугристо-мочажинные комплексы с округлыми куполообразными буграми высотой 1–3 м, грядово-мочажинные комплексы, которые

сформированы узкими грядами высотой до 1 м, разделенными сетью мочажин, а также деградирующие плоскобугристые комплексы с буграми высотой до 0,3 м и неявными различиями в растительном покрове бугров и ложбин. Отдельно выделены фитоценозы травяно-моховых болот с гомогенной горизонтальной структурой и выровненным микрорельефом, которые отнесены к категории местообитаний низинных болот D4 (*Base-rich fens and calcareous spring mires*).

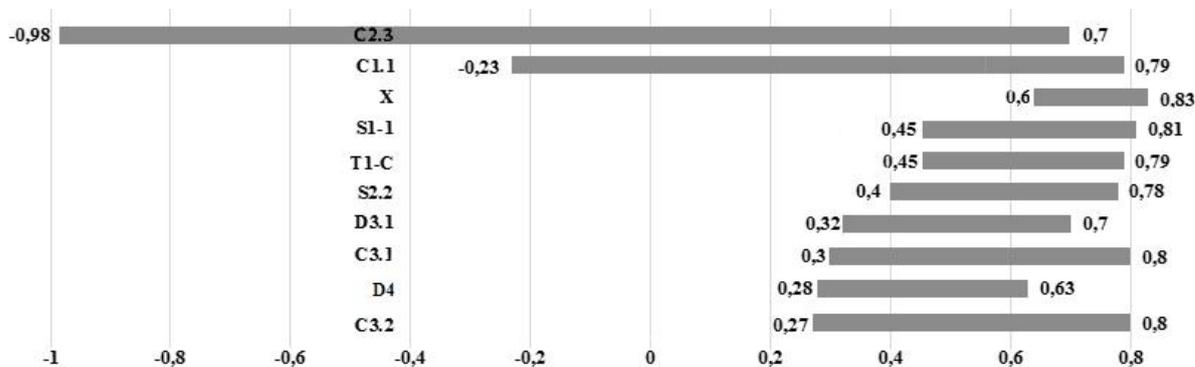


Рис. 1. Показатели NDVI для разных единиц EUNIS

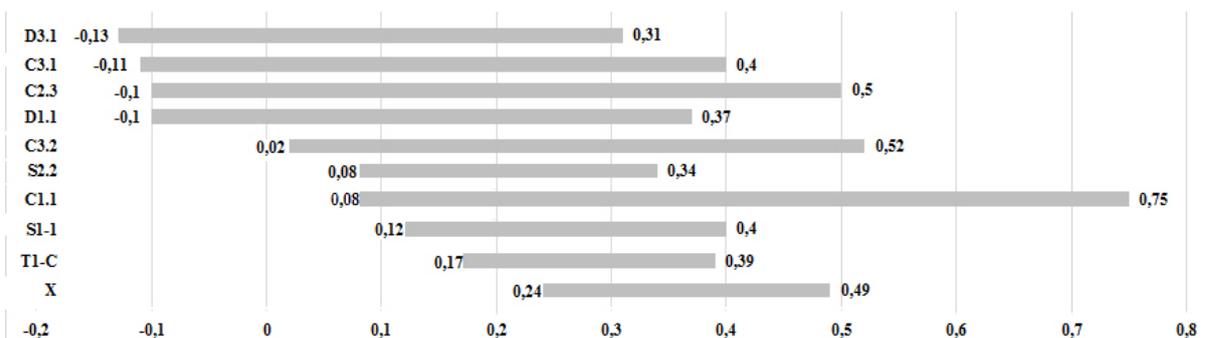


Рис. 2. Показатели NDWI для разных единиц EUNIS



Рис. 3. Показатели RVI для разных единиц EUNIS

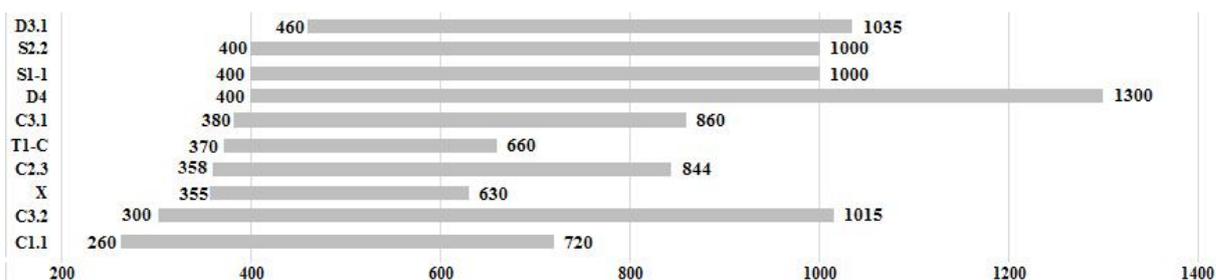


Рис. 4. Значения отражения разных единиц EUNIS в красной области спектра (Band 4)

Класс приозерных понижений. EUNIS: C3.2 (*Water-fringing reedbeds and tall helophytes other than canes*). Заболоченные депрессии на водоразделах и приозерные понижения, которые обрамляют озера полосой от 5 до 200 м в ширину.

Класс хасыреев. EUNIS: C3.2 (*Water-fringing reedbeds and tall helophytes other than canes*). Заторфованные ложбины и депрессии рельефа на месте спущенных термокарстовых озер (хасыреи).

Класс долин непостоянных водотоков. EUNIS: C3.1 (*Species-rich helophyte beds*). Сообщества занимают ложбины стока – отрицательные формы рельефа, которые направлены в сторону крупных водотоков, а также в долинах мелких временных водотоков с избыточным проточным увлажнением. Растительность: гомогенные фитоценозы низкорослых гигрофитных осоковых ивняков с мозаичной горизонтальной структурой, которую формируют осоковые кочки и прикомлевые бугорки.

Класс плоских слабодренированных террас. EUNIS. S1.1 (*Shrub tundra*). Плоские слабодренированные террасы на понижениях или склонах мезорельефа, склоны долины реки Куи. Растительность: экологические ряды, образованные фитоценозами крупнотравно-разнотравных кустарниковых сообществ и злаковых ивняков с гомогенной горизонтальной структурой сообществ.

Среди водных объектов на ключевом участке выделены озера, которые соответствуют категории C1.1 (*Permanent oligotrophic lakes, ponds and pools*), и реки (C2.3 – *Permanent non-tidal, smooth-flowing watercourses*).

Все категории местообитаний имеют перекрывающиеся диапазоны значений индексов (рис. 1–4), поэтому для автоматического и полуавтоматического дешифрирования космоснимков эти данные неинформативны. Отличительными можно считать только минимальные (например, NDVI для водных объектов) или максимальные значения (например, отражение в красной части спектра для низинных болот).

Список литературы

1. Лавриненко И.А. Типология территориальных единиц растительности для целей крупномасштабного картографирования (на примере острова Колгуев) // Геоботаническое картографирование. СПб.: Бостон-спектр, 2015. С. 95–119.
2. Лавриненко И.А. Типологическая схема территориальных единиц растительности на примере острова Колгуев // Сб. науч. тр. ГНБС. 2016. Т. 143. Ялта. С. 86–94.
3. Davies C.E., Moss D., Hill M.O. EUNIS habitat classification revised. Report to the european topic centre on nature protection and biodiversity // European Environment Agency. October 2004. 310 p.

K.V. Ivanova, A.M. Lapina

Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg, Russia
e-mail: ivanova.xenia@ya.ru; laany@yandex.ru

USING SENTINEL-2 DATA TO IDENTIFY DIFFERENT TYPES OF HABITAT IN A FOREST TUNDRA BAND

This article presents the results of the study of vegetation cover using remote sensing data on a key field of the right bank of the Kuya river in the Eastern European tundra. Based on geobotanical plots and manual interpretation of Sentinel-2 satellite images there were allocated 7 classes of territorial vegetation units of the division of watersheds. All of the units were correlated with EUNIS habitat types. This study aimed to assess the possibility of automatic decoding of different

vegetation types and habitat types using satellite data. Therefore, ranges of vegetation index values (NDVI, RVI) and water index NDWI were calculated for each type of habitat in the key area. It is shown that the ranges of index values corresponding to each habitat do not differ significantly.

Keywords: vegetation cover, tundra, territorial units of vegetation, Braun-Blanquet classification, Sentinel-2, EUNIS.

УДК 528.88, 630

С.Т. Им

Кандидат технических наук
Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

ДИНАМИКА ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ КУЗНЕЦКО-САЛАИРСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ В XXI ВЕКЕ

В начале XXI в. в темнохвойных лесах юга Сибири отмечаются значимые изменения, связанные с климатическими трендами. В работе исследована динамика состояния темнохвойных лесов Кузнецкого Алатау на основе съемки MODIS. Рассчитаны карты линейных трендов проективного покрытия деревьями (ППД) и индекса листовой поверхности (ИЛП), которые были сопоставлены с элементами рельефа местности. В целом, выявлено преобладание отрицательных трендов ППД в темнохвойных лесах Кузнецкого Алатау. Значительные площади начала усыхания темнохвойных древостоев отмечаются в 2003 и 2005 гг. Распределение площадей усыхания неоднородно относительно рельефа. Максимум наблюдается на склонах южной и юго-восточной экспозиций на высотах до 300 м с уклонами до 8°.

Ключевые слова: Кузнецко-Салаирская горная область, темнохвойные древостои, MODIS, проективное покрытие деревьями, индекс листовой поверхности.

В последние десятилетия изменение климата оказывает неоднозначное воздействие на темнохвойные леса Сибири. С одной стороны, наблюдается рост сомкнутости и продвижение темнохвойных деревьев на север и по градиенту высоты [1], а с другой стороны – темнохвойные леса погибают из-за возросшей активности насекомых вредителей, болезней, пожаров и негативного воздействия климата [2]. Необходимо проведение исследования состояния и динамики таких лесов на обширных территориях с применением данных дистанционного зондирования Земли и ГИС технологий. Цель данной работы заключалась в анализе динамики темнохвойных лесов по данным съемки MODIS на территории Кузнецко-Салаирской горной области.

Объект исследования. Анализировались темнохвойные леса Кузнецкого Алатау, Салаирского кряжа и Горной Шории. Площадь составляла ~138 тыс. км². В темнохвойных лесах (~25,2 тыс. км²) преобладает пихта (*Abies sibirica*; ~90 %), в меньшей степени представлены сибирский кедр (*Pinus sibirica*; ~10 %) и ель (*Picea obovata*; <0,1 %).

Материалы. Пространственно-временные изменения в темнохвойных лесах оценивались по данным MODIS. Применялись продукты MOD44B и MYD15A2H. Данные получены с геопортала EarthData (<https://search.earthdata.nasa.gov>). MOD44B VCF показывает ежегодное проективное покрытие деревьями (ППД) за 2000–2018 гг. с пространственным разрешением 231 м. Продукт MYD15A2H LAI представляет собой 8-дневные композиты индекса листовой поверхности (ИЛП) за 2002–2019 гг. с пространственным разрешением 463 м. Выделение территорий сомкнутых темнохвойных древостоев (ТХ) по преобладающей породе (>60 %) производилось на основе карты лесов 2006 г., полученной с геопортала ВЕГА-ГРО (<http://pro-vega.ru/maps>; пространственное разрешение 230 м). Из анализируемой территории устранялись гари на основе продукта MODIS MCD64A1 (<http://modis-fire.umd.edu>). Анализ связей динамики ТХ с топографией местности производился с использованием цифровой модели рельефа GMTED 2010 (пространственное разрешение 250 м; <https://www.usgs.gov/land-resources/eros/coastal-changes-and-impacts/gmted2010>)

Методика. Анализ динамики темнохвойных древостоев производился на основе карт линейных трендов величины проективного покрытия деревьями и индекса листовой поверхности на основе данных MODIS. Уравнения трендов рассчитывались попиксельно с плавающим начальным годом (2000–2014 гг.) и фиксированным конечным годом (2018 г.). Далее рассматривались только пиксели со статистически значимыми трендами ($\alpha < 0,05$). Коэффициенты наклона трендов позволили идентифицировать зоны значимых изменений ППД и ИЛП, избегая резких перепадов, связанных с перманентной гибелью древостоев (пожар, рубка, ветровал). Из анализа устранялись территории гарей. Условно год начала тренда считался годом начала усыхания древостоев. Для ГИС-анализа связи значимых изменений ППД и ИЛП с рельефом местности производилось нормирование данных на представленность площади древостоев по элементам рельефа [1].

Результаты. На анализируемой территории преобладают темнохвойные леса с проективным покрытием 50–70 % (таковых ~90 %), с ППД менее 50–6 %, с ППД более 70–5 % (рис. 1).

В целом за 2000–2018 гг. наблюдается достоверный тренд падения среднего значения ППД ($r^2 = 0,38$; $\alpha < 0,01$) в пихтовых древостоях, и в 2005–2015 гг. – в еловых древостоях ($r^2 = 0,45$; $\alpha < 0,03$) (рис. 2, а). Длительных значимых трендов ИЛП не обнаружено (рис. 2, б).

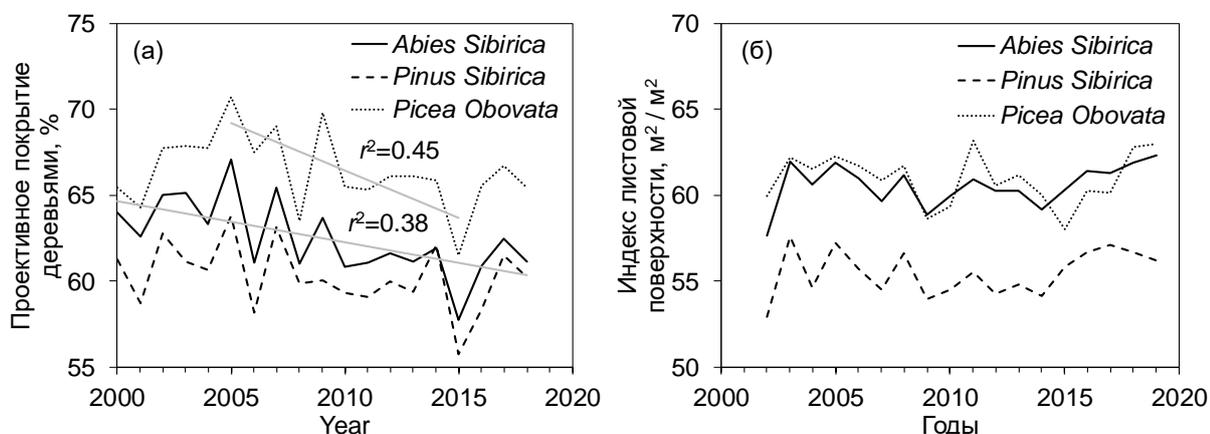


Рис. 1. Динамики (а) средней величины проективного покрытия по данным MODIS и (б) индекса листовой поверхности в темнохвойных древостоях. Тренды значимы при $\alpha < 0,05$

За период наблюдения значимые отрицательные тренды ППД наблюдались на 32 % площади ТХ древостоев, а положительные тренды – на 14 % (для пихтовых древостоев – 34 и 14 %; для кедровых – 17 и 17 %; для еловых – 29 и 10 %). Наибольшее количество достоверных отрицательных трендов ППД начинаются с 2003 и 2005 гг. (рис. 2, а). ИЛП не показал аналогичных изменений. В целом в значимые ($p < 0,05$) отрицательные тренды ИЛП наблюдались для 10 % темнохвойных древостоев. На протяжении всего периода наблюдений преобладали положительные тренды ИЛП, что преимущественно связано с возрастом листвы в травяно-кустарниковом покрове.

Распределение отрицательных трендов по элементам рельефа неоднородное. Усыхание преимущественно наблюдается на невысоко расположенных склонах южной и юго-восточной экспозиций с уклонами до 8° (рис. 3).

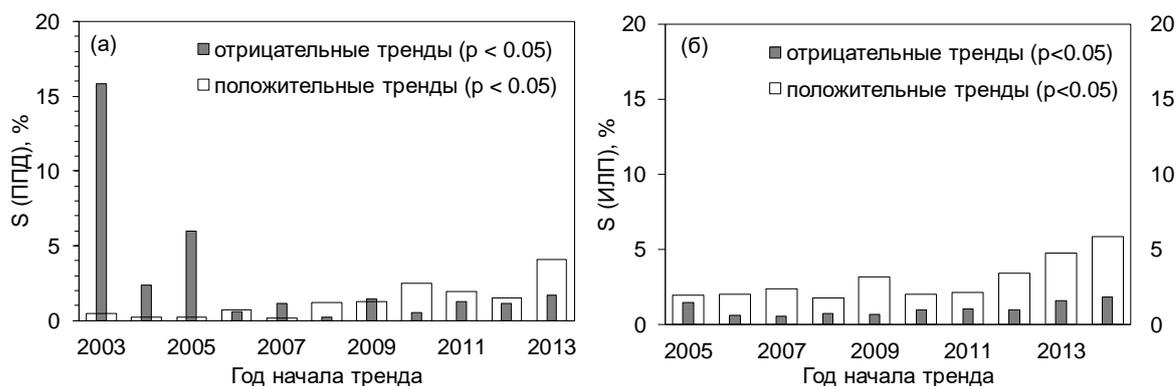


Рис. 2. Годовые доли площади S темнохвойных древостоев с отрицательными и положительными трендами (а) проективного покрытия деревьями и (б) индекса листовой поверхности

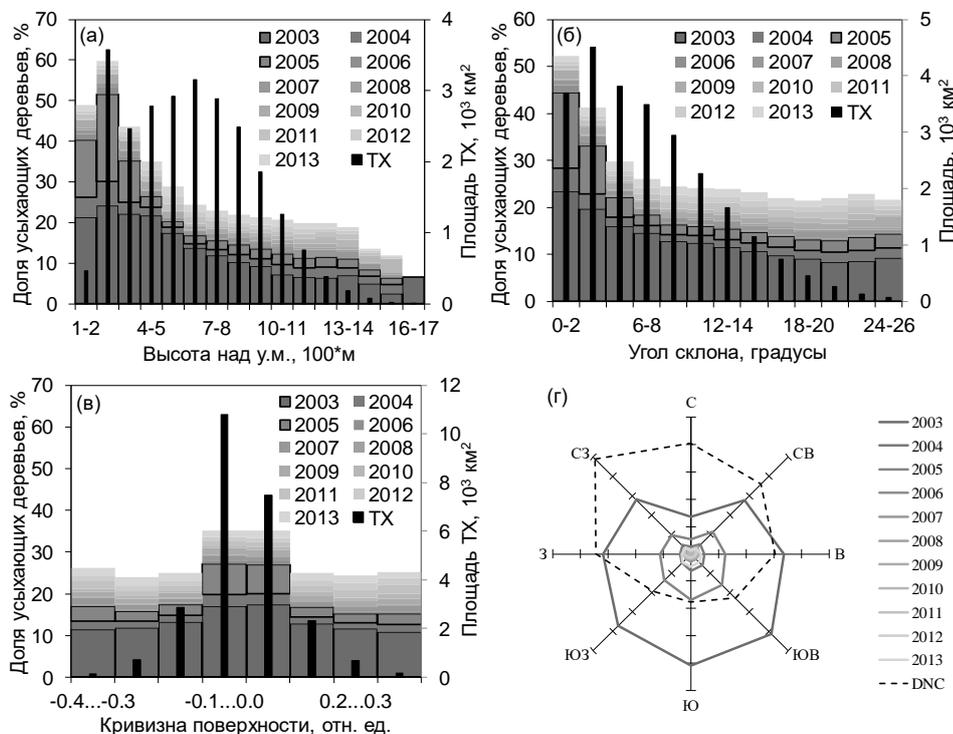


Рис. 3. Распределение усыхающих древостоев (площадей значимых отрицательных трендов ППД) в зависимости от: а – высоты над уровнем моря; б – угла склонов; в – кривизны поверхности; г – азимутальных направлений склонов

Заключение. Анализ показал преобладание отрицательных трендов ППД в темнохвойных лесах Кузнецкого Алатау. При этом для средних ИЛП не выявлено значимых трендов. Значительные площади усыхания темнохвойных древостоев отмечаются с началом в 2003 и 2005 гг. Распределение площадей усыхания неоднородно относительно рельефа происходит следующим образом: максимум наблюдается склонах южной и юго-восточной экспозиций на высотах до 300 м с уклонами до 8°.

Работа поддержана грантами РФФИ 18-45-240003 и 18-05-00432.

Список литературы

1. Им С.Т., Харук В.И., Ли В.Г. Миграция северной границы вечнозелёных хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 176–187.

2. Fir Decline and mortality in the Southern Siberian mountains / V. Kharuk, S. Im, I. Petrov [et al.] // Regional Environmental Change. 2017. Vol. 17, is. 3. P. 803–812.

S.T. Im

V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: stim@ksc.krasn.ru

DARKNEEDLE FOREST DYNAMICS IN KUZNETS-SALAIR MOUNTAIN REGION IN THE XXI CENTURY

In the 21st century, significant changes are identified in darkneedle forests in the southern part of Siberia related to climatic trends. In this paper, the dynamics of darkneedle stands' vigor was investigated based on the MODIS data. Maps of linear trends of percent tree cover (PTC) and leaf area index (LAI) were calculated. In total, the dominance of negative trends of PTC was identified in the darkneedle forest in Kuznetsky Alatau. Meaningful areas of the beginning of darkneedle stand decline were determined in 2003 and 2005 years. Area distribution of mortality does not uniform according to relief. Maximum is observed on southern and south-eastern slopes with less than 8 degrees on the elevation up to 300 m.

Keywords: Kuznets-Salair mountain region, darkneedle stands, MODIS, percent tree cover, leaf area index.

А.М. Кауазов, А.Е. Жолдасбек, А.Н. Нурлан
Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
Алматы, Республика Казахстан
e-mail: a_kauazov@mail.ru

АНАЛИЗ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СНЕГОТАЯНИЯ В КАЗАХСТАНЕ И ФОРМАТОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрены прикладные аспекты применения результатов космического мониторинга снежного покрова, в частности предлагается представление результатов анализа в виде специализированных бюллетеней. Цель данной публикации – представление имеющихся результатов космического мониторинга снежного покрова в Казахстане. Предлагается трехуровневая система космического мониторинга снежного покрова, в состав которой входят три технологических комплекса обеспечивающих: оперативное картирование границ снежного покрова; мониторинг сезонной динамики схода снежного покрова, анализ многолетней динамики схода снежного покрова. Приведены методы анализа пространственно-временного распределения снежного покрова и форматы специальных бюллетеней. Результаты космического мониторинга снежного покрова наиболее целесообразно представлять в комплексном, максимально обобщенном виде (продукт). Результаты работы могут быть применены в научной, производственной и образовательной сфере.

Ключевые слова: космический мониторинг, снежный покров, анализ, засуха, бюллетень.

Введение. Снежный покров играет значительную роль в климатической системе, в возникновении чрезвычайных ситуаций и в сельском хозяйстве. Спектр применения данных о снежном покрове чрезвычайно обширен. Изначально, наиболее доступной для дистанционного зондирования из космоса была задача мониторинга снеготаяния. Регулярный космический мониторинг схода снежного покрова осуществляется в Казахстане с 2000 г. Достигнуты определенные результаты в области сезонного и многолетнего мониторинга снежного покрова по данным ДЗЗ [1–3]. В практическом плане результаты мониторинга снеготаяния могут использоваться в важных приложениях: оценке глобального изменения климата, для контроля прохождения весенних паводков в регионах с высоким риском затопления, оценка сельскохозяйственных рисков с учетом влияния погодных условий (оценка запасов продуктивной влаги в почве, оценка вероятности наступления засушливых условий). Последнее приложение имеет особое значение для районов неполивного возделывания зерновых в северных областях Казахстана, поскольку весенний влагозапас является ключевым фактором, определяющим урожайность зерновых культур. В Казахстане вопросы использования многолетних данных ДЗЗ и основ создания систем космического мониторинга наиболее хорошо освещены в работе [4]. Цель данного исследования – представить имеющиеся результаты космического мониторинга снежного покрова как развитие идей, предложенных в работе [4].

Распознавание и оперативное картирование границ снежного покрова. Для распознавания снежного покрова используется нормализованный дифференциальный снежный индекс (NDSI), учитывающий высокую отражательную способ-

ность снега в видимом диапазоне и низкую излучательную способность в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне [5]. В настоящее время векторные границы снежного покрова можно ежедневно бесплатно скачать на сайте worldview.earthdata.nasa.gov 1–2 раза в сутки на основе данных *Aqua* и *Terra Modis*. Конечно, в данных продуктах имеются неточности и ошибочные зоны, занятые снежным покровом (типичный пример как соль со дна Аральского моря классифицируется как снег), однако в целом граница снежного покрова выделяется с приемлемой точностью, данная задача оценивается как решенная.

Решение задачи по анализу изменений осуществляется ежедневным мониторингом площади, занятой снежным покровом, что позволяет оценить динамику схода снежного покрова.

Мониторинг сезонной динамики схода снежного покрова. Технология анализа сезонной динамики схода снежного покрова предусматривает пространственное сопоставление оперативных карт и оценку изменения площадей снежного покрова, бесснежных территорий и зоны активного снеготаяния. Следует заметить, что сход снежного покрова происходит неравномерно. Результаты сравнения оформляется в виде карт и диаграмм, отражающих изменение площади зон, анализ которых позволяет оценить темпы снеготаяния и выделить участки ускоренного схода снега. Эта информация полезна для прогноза наиболее критичных направлений развития паводков и может быть использована для оценки объема стаявшего снега.

По завершении процесса снеготаяния на всей территории Казахстана формируется итоговая карта путем совмещения ежедневных векторных данных о границах снежного покрова, которая в дальнейшем используется для анализа межсезонной динамики. В целом на данном уровне, по итогам анализа схода снежного покрова, целесообразно один раз в декаду формировать бюллетень, отражающий подекадную динамику схода снега в текущем сезоне. Оптимальная периодичность бюллетеня – один раз в декаду по принципу «скользящего окна».

Анализ многолетней динамики схода снежного покрова. Межсезонный мониторинг предусматривает:

- сравнительный анализ динамики схода снежного покрова в текущем и предшествующих сезонах для оценки риска затопления территорий;
- анализ пространственно-временных закономерностей схода снежного покрова и развития засухи за многолетний период.

Сравнительный анализ результатов мониторинга схода снежного покрова в текущем сезоне и за предшествующие годы позволяет оценить темпы снеготаяния относительно среднесезонной нормы (быстрый, нормальный, медленный) и выбрать «год аналог», похожий по темпам схода снежного покрова, что дает возможность прогнозировать развитие ситуации в текущем году по аналогичному сценарию.

Результаты анализа оформляются в виде специального бюллетеня, дающего возможность сравнения с предыдущими годами. У пользователя должна быть наглядная возможность оценить различия в темпах снеготаяния, сравнить, раньше или позже сойдет снежный покров, и соответствующим образом подготовиться к посевной.

Не менее важно иметь возможность объективно сравнить динамику схода снега в текущем сезоне с многолетними наблюдениями, выбрать наиболее подходящий «год аналог» и с учетом этого уточнить даты сева.

На рисунке представлен примерный концепт-дизайн бюллетеня как результат сравнения дат схода снега в текущем сезоне со среднесезонной нормой с указанием зон раннего и позднего снеготаяния.

Анализ динамики схода снежного покрова с десятилетней нормой

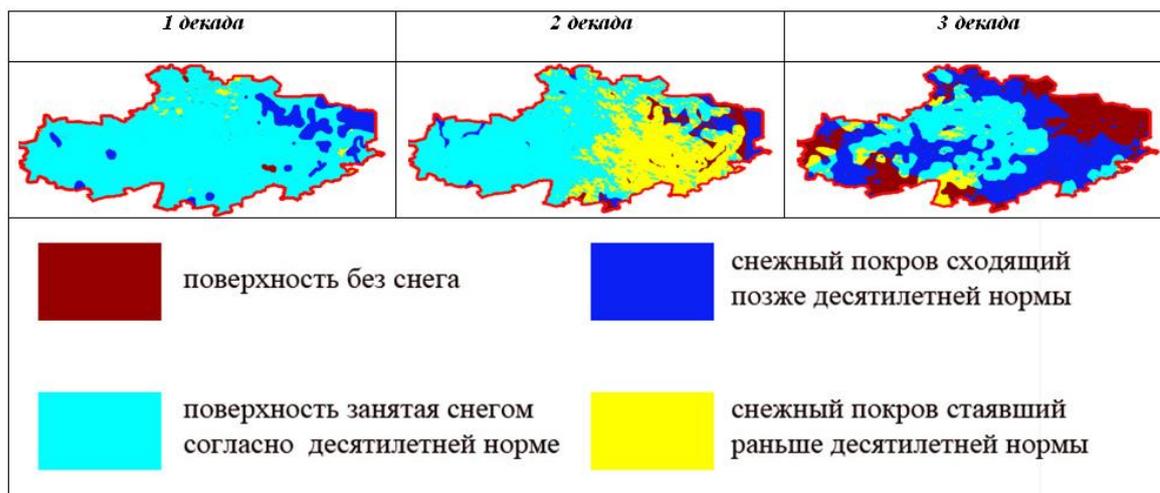


Рисунок. Анализ динамики схода снежного покрова

Контроль дат и темпов снеготаяния важен еще и потому, что позволяет косвенно предсказать потенциальные очаги засухи. Известно, что первая половина вегетации растений в значительной степени зависит от снеготаяния, а точнее, от весеннего влагозапаса в почве. Сравнение карт вегетации (NDVI) и карт схода снежного покрова показывает, что области с низким снеготаянием являются потенциальными источниками возникновения засухливых явлений [6]. Ранний сход снежного покрова и, следовательно, ранняя весна, становятся причиной раннего начала вегетации при этом максимум вегетации также смещается на ранние сроки: конец мая – начало июня, хотя в обычные годы пик вегетации приходится на месяц позже. Бурное развитие вегетации вкуче с низкими начальными почвенными влагозапасами вызывает нехватку влаги и последующее развитие засухи.

Заключение. Мониторинг не является самоцелью. При этом важны не только анализ и обобщение результатов мониторинга, но и их представление. Предлагаемая трехуровневая система космического мониторинга снежного покрова – логичный и целостный результат для формирования конечного продукта. Результаты космического мониторинга снежного покрова наиболее целесообразно представлять в комплексном, максимально обобщенном виде, что может способствовать привлечению к результатам мониторинга широкого круга потребителей.

Список литературы

1. Исследование динамики дат схода снежного покрова в Северном Казахстане / А.М. Кауазов, А.С. Дара [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 1. С. 161–168.
2. Терехов А.Г. Спутниковый мониторинг формирования снежного покрова Казахстана // Гидрометеорология и экология. 2018. Т. 90, № 3. С. 29–36
3. Терехов А.Г., Абаев Н.Н., Юничева Н.Р. Аномальный режим снежности 2019 года и многолетние тренды в изменениях высоты снежного покрова Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования.
4. Спивак Л.Ф. Основы создания систем космического мониторинга: метод. пособие. 2-е изд. Алматы: Дайк-Пресс, 2010. 88 с.
5. Нейштадт И.А. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. II. С. 359–365.
6. Методы дистанционного зондирования в сельском хозяйстве Казахстана / Э.А. Закарин, Л.Ф. Спивак [и др.]. Алматы: Гылым, 1999. 230 с.

A.M. Kauazov, A.E. Zholdasbek, A.N. Nurlan

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan,

e-mail: a_kauazov@mail.ru

ANALYSIS OF SNOWMELTING SPACE MONITORING DATA IN KAZAKHSTAN AND FORMATS FOR PRESENTING THE RESULTS

The paper considers the applied aspects of the application of the results of space monitoring of snow cover, in particular, it proposes the presentation of the analysis results in the form of specialized bulletins. The purpose of this publication is to present the available results of space monitoring of snow cover in Kazakhstan. A three-level system of space monitoring of snow cover is proposed, which includes three technological complexes that provide: operational mapping of snow cover boundaries; monitoring of seasonal dynamics of snow cover melting; analysis of the long-term dynamics of snow cover melting. Methods for analyzing the spatial-temporal distribution of snow cover and formats of special bulletins are presented. It is most expedient to present the results of space monitoring of snow cover in an integrated, maximally generalized form (product). The results of the work can be applied in the scientific, industrial and educational spheres.

Keywords: space monitoring, snow cover, analysis, drought, bulletin.

УДК 528.88, 550.348.436

**В.Б. Кашкин¹, Т.В. Рублева¹, К.В. Симонов²,
А.А. Кабанов¹, А.В. Мальканова¹, Р.В. Одинцов¹**

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: tvrubleva@mail.ru; simonovkv@icm.krasn.ru

УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ GRACE

Исследование посвящено уточнению параметров катастрофического землетрясения с магнитудой $M_w = 8,8$, произошедшего в зоне субдукции вблизи побережья Чили, на основе анализа данных космической системы *GRACE*. Построены цифровые карты изменения параметра *EWN* над контуром геоида в исследуемом сейсмоактивном районе Чилийского землетрясения. Показано, что существует отрицательная корреляция между величиной геодинимического параметра *H* для сильного землетрясения с $M_w = 8,8$ (расстояние от гипоцентра до положения барицентра Земля – Луна) и эквивалентной высотой воды над геоидом *EWN*. Наибольший коэффициент корреляции между рядами параметров *H* и *EWN* равный $R = -0,61$ отмечен в период регистрации максимального количества постсейсмических явлений в регионе Центрального Чили. В ходе дальнейших исследований планируется изучить представительный класс сильных землетрясений для детального анализа особенностей изменчивости параметра *EWN* и его связь с геодинимическими процессами.

Ключевые слова: космическая система GRACE, обработка спутниковых данных, геоид, сила тяжести, эквивалентная высота воды, землетрясения.

Введение. В современных геодинамических исследованиях активно используются данные космических систем *GRACE* (*Gravity Recovery and Climate Experiment*, NASA (США) – DLR (Германия)) и *GRACE-FO* (*GRACE-follow on*, в той же спутниковой конфигурации), изучающие пространственно-временные вариации гравитационного поля Земли с периодом 30 суток [1; 2]. На сегодняшний день накоплен большой массив данных за периоды работы космических систем *GRACE* (2002–2017 гг.) и *GRACE-FO* (2018 г. – по настоящее время) [3].

В *GRACE* и *GRACE-FO* реализован метод межспутникового слежения (Satellite-to-Satellite Tracking, SST) [2]. Два спутника-близнеца *Grace 1* и *Grace 2* движутся на расстоянии (220 ± 50) км по околополярной орбите. Их высокоточное позиционирование осуществляется привязкой к навигационной системе GPS. Расхождение привязки с наземными данными лазерной локации составляет 2–3 см. Дальность и скорости изменения расстояния между спутниками измеряются на высотах 300–500 км. Измерения проводятся дальномером *KBR* на частотах *K* (24,5 ГГц) и *Ka* (32,7 ГГц). Погрешность измерений на *GRACE* не превышает 10 мкм, а на *GRACE-FO* – не более 1 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$).

Ретроспективный анализ (реанализ) данных *GRACE* позволяет выявить качественные и количественные изменения в исследуемой очаговой области сильнейших землетрясений за определенные временные интервалы при интенсивной геодинамической активности. В нашей работе на основе реанализа данных *GRACE* и модельных расчетов расстояния от гипоцентра сильного землетрясения до барицентра Земля – Луна уточнены оценки параметров катастрофического сейсмического события $M_w = 8,8$, произошедшего в зоне субдукции вблизи побережья Чили.

1. Мониторинг гравитационных аномалий, наблюдаемых в области Чилийского землетрясения. Объектом исследования является очаговая область сильнейшего цунамигенного Чилийского землетрясения, в которой с 27 февраля 2010 г. по 28 февраля 2011 г. были зарегистрированы 217 постсейсмических события с магнитудами $M > 5,0$ и глубинами гипоцентров от 11 до 50 км [4]. Эти явления возникли после сильного землетрясения $M_w = 8,8$, которое произошло в 06:34:11 UTC около побережья Чили 27 февраля 2010 г. и сгенерировало мощное цунами. Очаг этого сейсмического события находился на глубине $22,9 \pm 9,2$ км, его пространственные размеры составили 600×120 км.

Эпицентр землетрясения $M_w = 8,8$ с координатами $36,122^\circ \text{S}$ и $72,898^\circ \text{W}$ располагался в океане в прибрежной зоне Центрального Чили (район Мауле). По данным о геодинاميке исследуемой области [5], здесь плита Наска подвигается под Южноамериканскую со скоростью 66 мм/год. Сейсмотектоническая история данного региона описана в [6]. Особенности формирования очага этого землетрясения и сейсмического волнового поля на основе клавишной модели зоны субдукции проанализированы в [7].

Ранее в исследуемом регионе уже проводился мониторинг гравитационных аномалий, образовавшихся после основного сейсмического события $M_w = 8,8$ с использованием данных *GRACE* [8]. Обнаружено, что к востоку от эпицентра (через месяц после сейсмического события Мауле) наблюдалась отрицательная гравитационная аномалия (-5 мкГал). По косейсмическим эффектам получены данные о меньшей по размеру положительной гравитационной аномалии, связанной с поднятием поверхности на дне океане. Авторы [8] предположили, что расширение коры и оседание поверхности привели к образованию отрицательной аномалии силы тяжести на суше, а положительная аномалия появилась из-за поднятия поверхности дна океана (к западу от Перу, Чилийская впадина). Анализ пространственной структуры

наблюдаемых аномалий подтвердил теоретические предположения о перераспределении внутренней массы твердой Земли во время сейсмической (геодинамической) активности.

2. Интерпретация результатов экспериментальных исследований. В работе [9] высказана гипотеза о том, что изменения силы тяжести представляют собой гидрологические движения массы воды вокруг твердой Земли, что является следствием повышения упругой поверхностной нагрузки на разломы. В качестве амплитуды годового изменения силы тяжести использовался параметр *EWH* (эквивалентная высота воды, или *Equivalent Water Height*, см) над контуром геоида. Значения эквивалентной высоты воды определялись на основе спутниковых измерений *GRACE* и расчетов изменений гармонических коэффициентов геопотенциала относительно среднего поля (модели) [10].

Нами были построены цифровые карты пространственно-временного распределения параметра *EWH* в сейсмоактивных районах Тихого океана при сильнейших подводных землетрясениях, произошедших за последние 20 лет [11]. Интересным является вопрос: может ли указанный параметр быть использован для уточнения характеристик сильнейших землетрясений, а также для выявления связи напряженно-деформированного состояния геосреды и постсейсмических процессов.

В рамках реанализа по данным *GRACE* [3] построен график вариаций параметра *EWH* для эпицентральной области катастрофического землетрясения $M_w = 8,8$ за 3 года, с января 2009 г. по декабрь 2011 г., (рис. 1). Этот период охватывает процесс подготовки сильнейшего землетрясения и фазу постсейсмических событий в этой области. Отметим, что с 1 января 2009 г. начался текущий 24 цикл солнечной активности [12]. С этого момента также начинается региональная перестройка атмосферных термобарических полей, которые, вероятно, могут привести к возникновению нарушений в равновесии фигуры Земли, к смещению центра масс и т.д. В январе 2009 г. значение эквивалентной высоты воды над геоидом в эпицентре Чилийского землетрясения составило 0,18 см.

На рис. 1 показано, что минимальное значение *EWH*, равное 2,58 см, соответствует февралю 2010 г., когда произошло сейсмособытие с $M_w = 8,8$. В период наблюдения постсейсмических явлений в регионе, с апреля 2010 г. по июль 2011 г., параметр *EWH* был положительным.

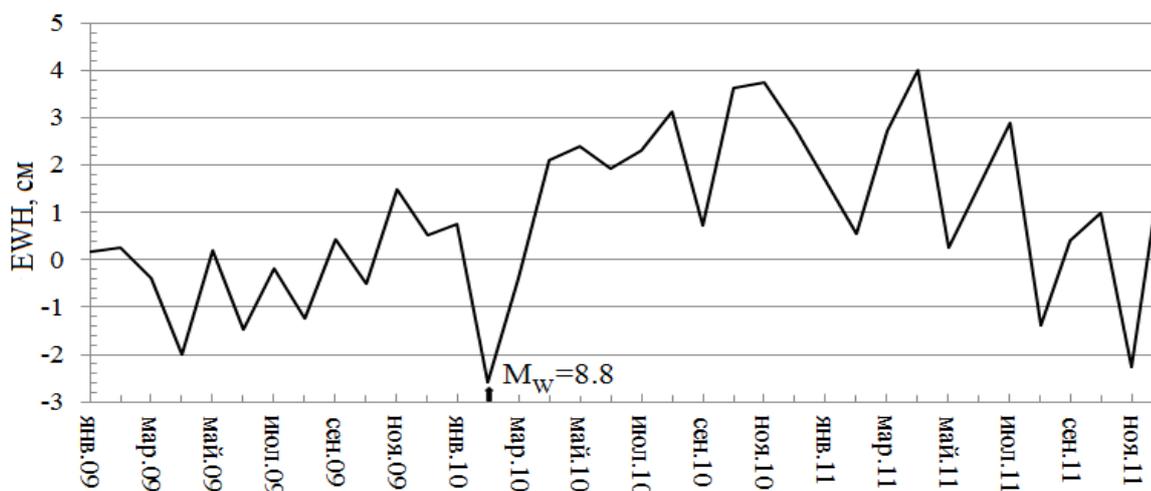


Рис. 1. Временные вариации эквивалентного уровня воды (*EWH*) с января 2009 г. по декабрь 2011 г. в эпицентре землетрясения Мауле

На рис. 2 приведен пример цифровой карты разности значений ΔEWH , где $\Delta EWH = EWH_1 - EWH_2$. Здесь EWH_1 – значения параметра эквивалентной высоты воды над геоидом за февраль 2010 г., а EWH_2 – за январь 2009 г. Справа на рис. 2 приведена шкала параметра ΔEWH , в см.

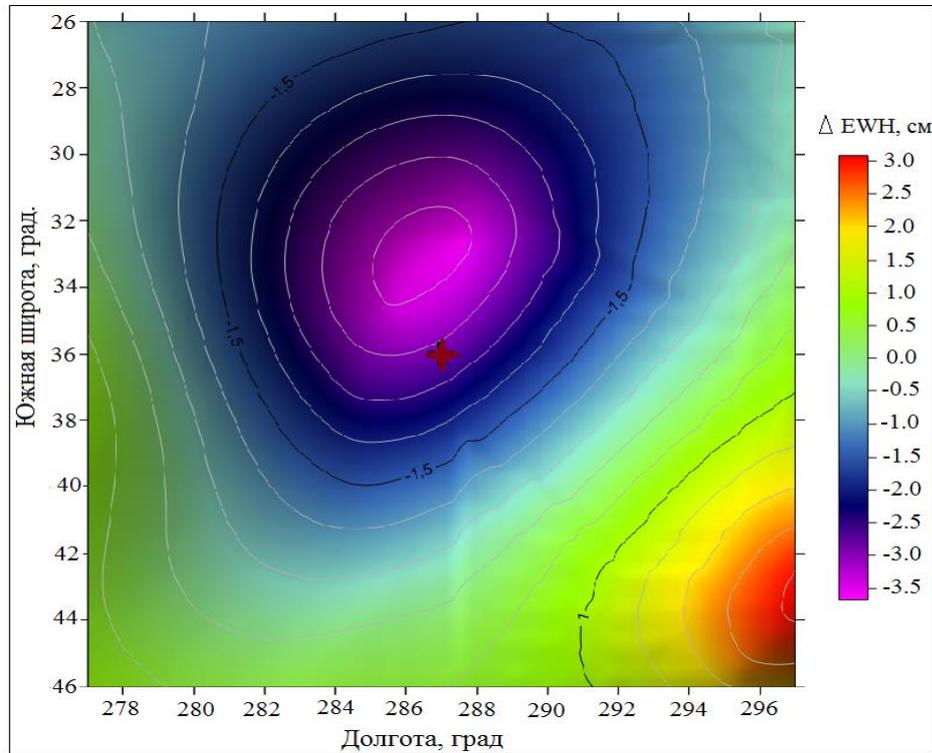


Рис. 2. Карта отрицательной аномалии, образовавшейся в сейсмоактивном районе Чилийского землетрясения в феврале 2010 г.

Эпицентр землетрясения Мауле расположен на периферии аномальной области с отрицательными значениями ΔEWH и обозначен «красной звездочкой» (рис. 2). Аномалия находится к западу от эпицентра и ориентирована в направлении $NE - SW$.

В нашей работе рассчитывался также геодинамический параметр H – расстояние от гипоцентра сильного землетрясения ($M_W = 8,8$) до барицентра Земля – Луна в период с января 2009 г. по декабрь 2011 г. Метод расчета координат барицентра описан в [13]. График изменения параметра H за исследуемый период приведен на рис. 3. Для сравнения на рис. 3 показаны вариации параметра EWH . Для выявления связи параметров H и EWH проводился корреляционный анализ. Наибольший коэффициент корреляции между рядами для параметров H и EWH имел значение $R = -0,61$ в период с января 2010 г. по январь 2011 г. На этот период времени наблюдения приходится максимальное количество постсейсмических явлений в регионе Центрального Чили.

Заключение. В результате проведенных исследований, показано, что существует отрицательная корреляция между величиной геодинамического параметра H (расстояние от гипоцентра до положения барицентра Земля – Луна) для сильного землетрясения с $M_W = 8,8$ и эквивалентной высотой воды над геоидом EWH . Наибольший коэффициент корреляции между рядами параметров H и EWH , равный $R = -0,61$ отмечен в период регистрации максимального количества постсейсмических явлений в Центральном Чили, что, вероятно, связано с перемещением масс в твердой Земле.

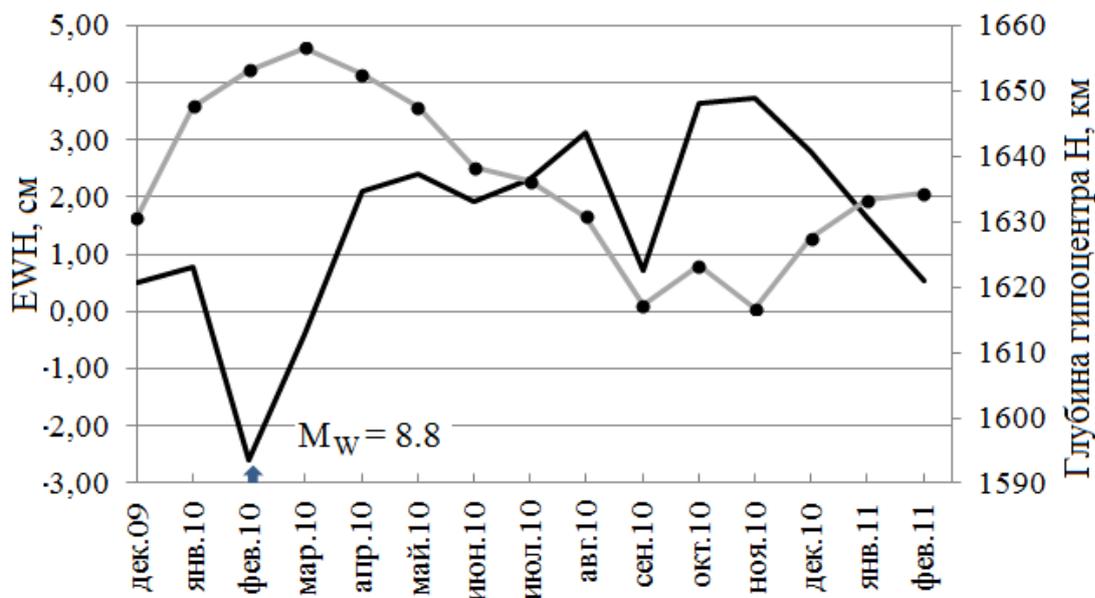


Рис. 3. Вариации параметра H и параметра EWH с декабря 2009 г. по декабрь 2011 г. в эпицентральной области изучаемого сильного землетрясения

Построены цифровые карты изменения параметра EWH над контуром геоида в исследуемом сейсмоактивном районе Чилийского землетрясения. Обнаружена отрицательная аномалия параметра EWH , которая наблюдается в феврале 2010 г. к западу от эпицентра и ориентирована в направлении $NE - SW$. Возможно, образовавшаяся аномальная область связана с гравитационными процессами в этом регионе. В ходе дальнейших исследований планируется изучить представительный класс сильных землетрясений для детального анализа особенностей изменчивости параметра EWH и его связь с геодинамическими процессами.

Список литературы

1. GRACE measurements of mass variability in the Earth system / B.D. Tapley, S. Bettadpur, J.C. Ries [et al.] // Science. 2004. Vol. 305, is. 5683. P. 503–505.
2. Peidou A., Pagiatakis S. Gravity gradiometry with GRACE space missions: New opportunities for the geosciences // J. of Geophysical Research. Solid Earth. 2019. Vol. 124, is. 8. P. 9130–9147.
3. NASA. GRACE. URL: <https://grace.jpl.nasa.gov/>.
4. USGS. URL: <https://earthquake.usgs.gov/>.
5. Moreno M., Rosenau M., Oncken O. Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone // Nature. 2010. Vol. 467, is. 7312. P. 198–202.
6. Владимирова И.С. Моделирование постсейсмических процессов в субдукционных зонах // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3, № 2. С. 167–178.
7. Катастрофические землетрясения и цунами в Чили. Свидетельства оправдавшегося прогноза / Р.Х. Мазова, Х.Ф. Рамирес, Н.А. Баранова, А.Г. Рассадин // Тр. НГТУ. 2014. № 2 (104). С. 43–52.
8. Han S.C., Sauber J., Luthcke S. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large-scale mass redistribution // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37, is. 23. P. 1–5.
9. Mitsui Y., Yamada K. Possible correlation between annual gravity change and shallow background seismicity rate at subduction zone by surface load // Earth, Planets and Space. 2017. Vol. 69, № 166. P. 1–7.

10. Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // J. of Geophysical Research. Solid Earth. 1998. Vol. 103, №. B 12. P. 30205–30229.
11. Analysis of GRACE satellite measurements over seismically active areas of the strongest earthquakes / K.V. Simonov, V.B. Kashkin, T.V. Rubleva, K.V. Krasnoshekov // E3S Web of Conferences: Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2018). 2019. Vol. 75. P. 1–5.
12. SpaceWeatherLive. URL: <https://www.spaceweatherlive.com/ru/solnechnaya-aktivnost/solnechnyy-cikl>.
13. Сибгатулин В.Г., Перетокин С.А., Кабанов А.А. Резонансы гравитационных приливов – мощный энергетический источник геодинамических процессов в земной коре // Журнал Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2016. № 9 (2). С. 146–165.

V.B. Kashkin¹, T.V. Rubleva¹, K.V. Simonov²,
A. A. Kabanov¹, A.V. Malkanova¹, R.V. Odintsov¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: tvrubleva@mail.ru, simonovkv@icm.krasn.ru

REFINING THE PARAMETERS OF THE STRONGEST EARTHQUAKES BASED ON THE RETROSPECTIVE ANALYSIS OF GRACE DATA

The study is devoted to the analysis of data from the GRACE space system to clarify the parameters of a catastrophic earthquake with a magnitude of $M_w = 8.8$ which occurred in the subduction zone near the Chilean coast. Digital maps of changes in the EWH parameter over the geoid contour in the investigated seismically active region of the Chilean earthquake were constructed. It is shown that there is a negative correlation between the value of the geodynamic parameter H for a strong earthquake with $M_w = 8.8$ (distance from the hypocenter to the position of the Earth-Moon barycenter) and the equivalent water height above the geoid EWH. The highest correlation coefficient between the parameters H and EWH equal to $R = -0.61$ was noted during the period of registration of the number of postseismic events in the region of Central Chile. In the course of further research study the representative class of earthquakes for a detailed analysis of the variability of the EWH parameter and its relationship with geodynamic processes.

Key words: space system GRACE, satellite data processing, geoid, gravity, equivalent water height, earthquakes.

С.Г. Копысов, А.О. Елисеев

Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
e-mail: wosypok@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТУПЕНЕЙ УВЛАЖНЕНИЯ Л.Г. РАМЕНСКОГО ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Показана возможность геоинформационного моделирования динамики типа напочвенного покрова по климатическим данным и локальным ландшафтным параметрам. В основе моделирования лежит интеграция метода гидролого-климатических расчетов В.С. Мезенцева со ступенями увлажнения по геоботанической шкале Л.Г. Раменского, характеризующими условия местообитания по составу растительности. Геоинформационное моделирование на основе ландшафтно-гидрологического подхода осуществляется в общедоступной геоинформационной системе SAGA. Исходными данными для моделирования являются: цифровая модель рельефа, данные спутникового зондирования и климатические характеристики. Предложенная методика перспективна для долгосрочного прогнозирования состояния экосистем, выявления земель с скрытыми процессами заболачивания почв и общей оценки качества земельных ресурсов.

Ключевые слова: ступени увлажнения, земельные ресурсы, ландшафтно-экологическое моделирование.

Для регионального климатического мониторинга важно уметь оценивать условия произрастания напочвенной растительности, чутко реагирующей на изменения экологических факторов. В период перехода климата от одного равновесного состояния к другому необходимо научиться прогнозировать возможные изменения растительного покрова как первичного источника получения пищевой энергии для человека.

В 1938 г. Л.Г. Раменский [1] в рамках прикладных геоботанических исследований сенокосов и пастбищ предложил классификацию местоположений в зависимости от влияющих факторов. Им же разработана классификация местообитаний (участок со свойственной ему совокупностью экологических режимов) по двум градациям: степени и характеру увлажнения, а также по химизму почвы (выражается в богатстве питательных элементов в доступной для растений форме, засоленности). На данном этапе исследований нам удалось смоделировать только первую градацию.

Экологические шкалы используются исключительно в среде ботаников и в явном виде непригодны для моделирования динамики гидролого-климатического режима по базовым климатическим и ландшафтным характеристикам. Однако нам удалось решить эту проблему, совместив ступени увлажнения (C_y) (по Л.Г. Раменскому [1]) с методом гидролого-климатических расчетов ГКР В.С. Мезенцева [2].

Для расчета типа напочвенного покрова нужно понимать, что если на конкретном участке процветает какой-то набор видов растений, то это свидетельствует о наличии необходимых экологических условий и формировании соответствующих почв. Именно поэтому степень увлажненности деятельного испаряющего почвенно-

го слоя находится в полной соразмерности с теплоэнергетическими ресурсами. Количественной характеристикой растительного компонента экосистем является увлажнение в ступенях по шкале Л.Г. Раменского (C_y), которое можно связать с почвенной (параметр r) и геоморфологической (параметр n) компонентами системы через относительную влажность разрыва капилляров, отражающую доступность влаги растениям и в сочетании с условиями питания растений, определяющую состав и структуру напочвенного покрова.

Для учета несоответствия фактической увлажненности оптимальной увлажненности к относительной влажности разрыва капилляров вводится поправочный коэффициент – коэффициент увлажнения (β_H). Исходя из сказанного, степень увлажнения свойственную конкретному ландшафту, можно рассчитывать по цифровым моделям рельефа и климатическим характеристикам [3]:

$$C_y = 100 \cdot \beta_H \cdot \left(\frac{r-1}{r \cdot n + 1} \right)^{1m}, \quad (1)$$

где n – параметр ландшафтных условий стока; r – параметр, учитывающий способность почвогрунта подводить влагу к испаряющей поверхности; климатическая увлажненность определяется соотношением суммарного увлажнения деятельной поверхности к теплоэнергетическим ресурсам испарения за вегетационный период.

Все расчеты производились в калькуляторе растров в ГИС SAGA [4]. Исходные данные (осадки, температура) были взяты из реанализа *WorldClim* [5] представленного в виде растров среднемесячных значений, осредненных за период 1970–2000 гг.

Для расчета параметра ландшафтных условий n использовался индекс потенциальной влажности (*Wetness Index* – WT), выделяемый автоматически на основе ЦМР (SRTM) с пространственным разрешением 30 м (1 arc-sec) в ГИС SAGA. Для перехода от TWI к параметру n использовалась формула из статьи [6].

Параметр r зависит в основном от механического состава почвы. В процессе торфонакопления и роста лесной подстилки образуются органогенные горизонты, нивелирующие различия в значениях параметра r от механического состава. В связи с этим для практических расчетов используется среднее значения параметра $r = 2$.

Суммарное увлажнение рассчитывается с учетом региональной поправки на недоучет осадков осадкомерными приборами, поправки на уклон поверхности, вычисляемой по данным SRTM матрицы, и с учетом суммы осадков за год по данным реанализа. Проведенное выборочное ботаническое описание с последующим расчетом ступеней увлажнения показывает хорошее совпадение с модельными значениями по формуле (1) для исследуемой территории [7].

На территории Западной Сибири для сельскохозяйственного использования пригодны три подзоны: а) участки со ступенями увлажнения 62–63 – свежие луга и леса на наиболее дренированных автономных местообитаниях с дерновыми и подзолистыми почвами; б) участки со ступенями увлажнения 64–68 – преимущественно влажнолугового увлажнения с почвами без признаков оглеения на достаточно дренированных территориях; в) участки со ступенями увлажнения 68–73 – влажнолугового увлажнения со слабооглееными почвами и высокоурожайными сеннокосными лугами.

Таким образом, напочвенный растительный покров можно использовать в роли индикатора экосистемных изменений. Биоценотический механизм адаптации экосистем к внешним воздействиям проявляется в пространственно-временной динамике растительного покрова. В естественных условиях экосистемы находятся в состоянии динамического равновесия вещественно-энергетического обмена, характеризуемого

отношением суммарного увлажнения к водному эквиваленту теплоэнергетических ресурсов испарения, т.е. относительной увлажненностью вегетационного периода.

Предложенная модель весьма перспективна для долгосрочного прогнозирования с целью выработки рекомендации о рациональном использовании земельных ресурсов с учетом климатических изменений. Так, задавая прогнозные значения температуры и осадков и (или) значения параметров преобразованных природных условий, можно рассчитать степень увлажнения и определить соответствующий ей тип растительных сообществ, которые будут преобладать при изменившихся ландшафтно-климатических условиях. Также предложенная методика позволяет выделять земли с скрытыми процессами заболачивания почв и осуществлять общую оценку качества земельных ресурсов.

Список литературы

1. Раменский Л.Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова // Избранные работы. Л.: Наука, 1971. 334 с.
2. Мезенцев В.С. Расчеты водного баланса: учеб. пособие. Омск: Изд-во Ом. с.-х. ин-та, 1973. 80 с.
3. Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Никифоров А.Н. Ландшафтно-геофизический подход к зонированию структуры землепользования на малом водосборе // Изв. Том. политехнич. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 6. С. 39–47.
4. SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) / The official SAGA website. Режим доступа: URL: <http://www.sagagis.org/en/index.html>.
5. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International J. of Climatology. 2017. Vol. 37. P. 4302–4315.
6. Kopysov S.G., Erofeev A.A and Zemtsov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // Int. J. of Environmental Studies. 2015. Vol. 72, № 3 P. 380–385. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2015.1010876>.
7. Kopysov S., Chernova N., Klimova N. Validation of vegetation type modeling at a local level using a moisture scale // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. URL: [doi:10.1088/1755-1315/211/1/012032](https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012032).

S.G. Kopysov, A.O. Eliseev

Institute of Climatic and Ecological Systems
Monitoring of SB RAS, Tomsk, Russia
e-mail: wosypok@mail.ru

MODELING MOISTURE RANGES BY THE L.G. RAMENSKIY FOR REGIONAL ENVIRONMENTAL MONITORING

The possibility of geoinformation modeling of the dynamics of the type of ground cover based on climatic data and local landscape parameters is shown. The modeling is based on the integration of the method of hydrological and climatic calculations by V.S. Mezentseva with humidification steps according to the geobotanical scale L.G. Ramensky. Modeling based on the landscape-hydrological approach is carried out in the publicly available geographic information system SAGA. The initial data for modeling are: digital elevation model, satellite sensing data and climatic characteristics. The proposed method is promising for long-term forecasting of the state of ecosystems, identification of lands with latent processes of waterlogging and general assessment of the quality of land resources.

Keywords: moisture values, land resources, landscape-ecological modeling.

К.В. Краснощеков¹, Е.И. Пономарев^{2,3}

¹Младший научный сотрудник, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: krasko@icm.krasn.ru\$ evg@ksc.krasn.ru

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СВЯЗИ МАСШТАБНЫХ ТЕПЛОВЫХ АНОМАЛИЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С ВЕЛИЧИНОЙ СТОКА РЕК СИБИРИ

Проведена проверка гипотезы о возможности регистрации связи «грунтовый сток» – «речной сток» в зависимости от нарушенности растительности средствами спутниковых гравиметрических измерений (*GRACE*, *GRACE-FO*) динамики водной массы. Выполнен корреляционный анализ между масштабными тепловыми аномалиями подстилающей поверхности и рядами гравиметрических данных, выраженных параметром *EWH* (*Quivalent Water Height*) для территории двух речных бассейнов Нижней и Подкаменной Тунгуски. В первом приближении показана связь нарушенности лиственничников мерзлотной зоны, преобладающих в районе исследований, с тепловыми аномалиями подстилающей поверхности, влияющими на сезонную динамику грунтового стока.

Ключевые слова: эквивалентный уровень воды (*EWH*), *GRACE*, температура поверхности, тепловые аномалии, речные бассейны.

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению числа и площадей лесных пожаров на территории лиственничников мерзлотной зоны Средней Сибири [1]. Масштабные нарушения растительности и изменение температурного баланса подстилающей поверхности, по некоторым оценкам, влияют на состояние мерзлотного слоя, уровень грунтовых вод и динамику речных стоков [2–5]. При этом данные об изменении водных ресурсов суши при континентальном и региональном уровнях осреднения можно получить, используя спутниковую гравиметрическую систему *GRACE* (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) [6; 7].

С целью оценить влияние масштабных тепловых аномалий на обводненность исследуемой территории проведен корреляционный анализ данных среднемесячных значений температур, полученных с использованием *MODIS* и параметра *EWH* (эквивалентный уровень воды, выраженный в превышении уровня воды над геоидом, данные *GRACE*) на территории бассейнов двух рек в период с января 2013 г. по декабрь 2019 г.

Район исследования – мерзлотная зона (56.8–68.3° с.ш. и 87.2–114.9° в.д.), на которой находятся бассейны рек Нижняя Тунгуска площадью 473 000 км² и Подкаменная Тунгуска площадью 240 000 км². На исследуемую территорию был сформирован массив данных по показателям среднемесячной температуры (продукт *MOD11B3*, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) и значения аномалии водной массы *EWH* (данные *GRACE* и *GRACE FO*, <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/>).

Гравиметрическая информация была получена со спутниковой системы *GRACE*. При пролете над гравитационными аномалиями расстояние между спутниками изменяется, поскольку спутники сильнее или слабее притягиваются Землей.

Данные, полученные с сайта NASA, содержат информацию о превышении водного слоя над геоидом в единицах измерения *EWH* (эквивалентного уровня воды). Различия в ежемесячных значениях вызваны перераспределением массопотока в земной коре. В теории параметр *EWH* (эквивалентный уровень воды) показывает, как должна распределиться вода, чтобы создать полученную разность между различиями геоида за месяц.

В ходе работы выполняли корреляционный анализ усредненных значений аномалий температуры подстилающей поверхности в границах бассейнов рек, вызванных масштабными послепожарными нарушениями, и показателя обводнённости на основе динамики параметра *EWH*.

Межгодовые вариации исследуемых величин приведены на рис. 1.

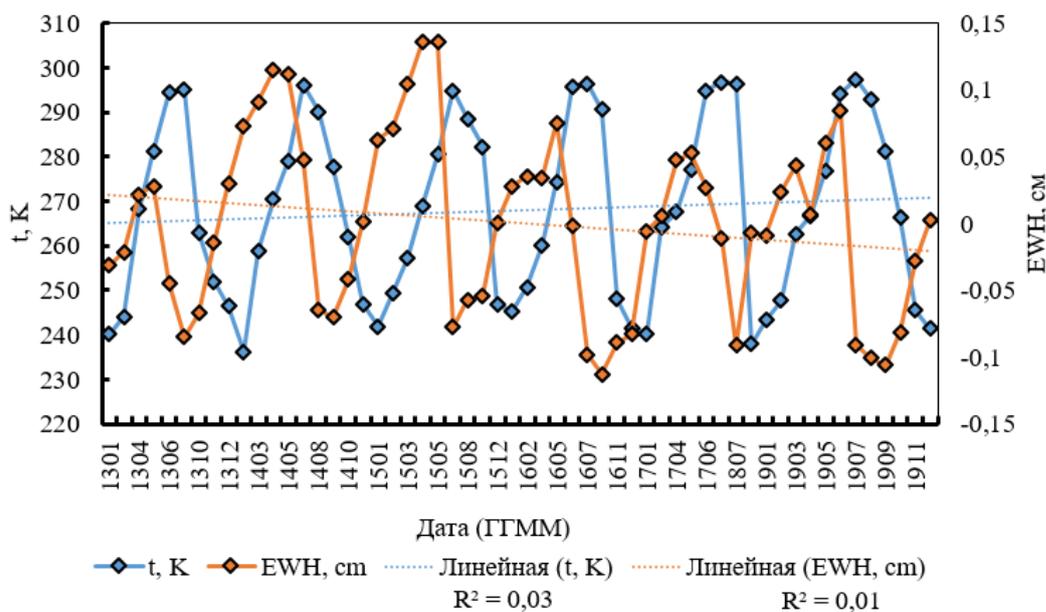


Рис. 1. Межгодовые колебания температур (*t*) и *EWH*

На рис. 1 отображены линии тренда для значений температур и параметра *EWH*. Показано, что с увеличением количества послепожарных участков усредненные значения температур для данной территории имеют положительный тренд, что согласуется с результатами, представленными в работе [2]. При этом данные параметра *EWH* имеют отрицательный тренд, что на основании работы [6] отражает общее уменьшение водных ресурсов исследуемой территории. В совокупности с положительным трендом температур можно предположить о наличии взаимосвязи между увеличением температуры подстилающей поверхности из-за увеличения числа и площадей лесных пожаров и отрицательным трендом *EWH*, который указывает на снижение запасов грунтовых вод исследуемой территории.

Для проверки связи данных стока реки Подкаменной Тунгуски с данными гравиметрических измерений *GRACE* и *GRACE-FO* для территории соответствующего речного бассейна мы сопоставили значения параметра *EWH* над исследуемой территорией и величину стока рек.

График корреляционного поля (рис. 2) демонстрирует общие закономерности связи между параметрами «речной сток» – «показатель *EWH*».

Пиковые значения речного стока коррелируют с максимальным значением *EWH* (рис. 2). Подтверждена также синфазность минимумов обоих исследованных параметров.

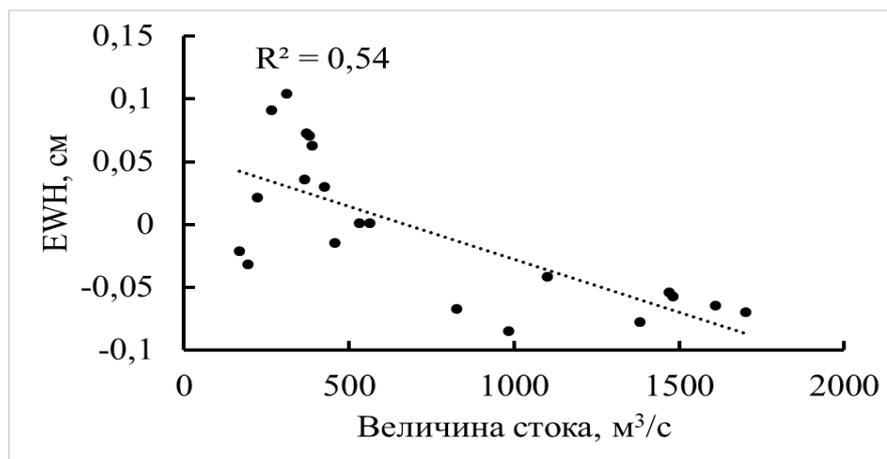


Рис. 2. Величина стока реки Подкаменная Тунгуска и параметра *EWH*

В результате работы сформирован архив данных распределения среднемесячных значений температур на территорию двух речных бассейнов Нижней Тунгуски и Подкаменной Тунгуски за период с января 2013 г. по декабрь 2019 г. Сформирован архив гравиметрической информации, полученной; используя спутниковую систему *GRACE*, выраженную параметром *EWH* (эквивалентный уровень воды).

Результаты корреляционного анализа позволяют в первом приближении обосновать применимость данных гравиметрической съемки для анализа динамики речных стоков мерзлотной зоны в условиях масштабных послепожарных повреждений лиственных лесов региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки (№ 18-41-242003).

Список литературы

1. Харук В.И., Пономарев Е.И. Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири // *Экология*. 2017. № 6. С. 413–419. DOI: 10.7868/S0367059717060026.
2. Пономарев Е.И., Пономарева Т.В. Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // *Сибирский экологический журнал*. 2018. № 4. С. 477–486. DOI: 10.15372/SEJ20180408.
3. The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia / E.I. Ponomarev, O.V. Masyagina, K.Y. Litvintsev [et al.] // *Forests*. 2020. № 11 (8). P. 790. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080790>.
4. Ponomarev E.I., Ponomareva T.V., Prokushkin A.S. Intraseasonal dynamics of river discharge and burned forest areas in Siberia // *Water*. 2019. № 11, 6, 1146. 11 p. DOI: 10.3390/w11061146.
5. Increasing contribution of peatlands to boreal evapotranspiration in a warming climate / M. Helbig, J.M. Waddington, P. Alekseychik [et al.] // *Nature Clim. Chang.* 2020. № 10. P. 555–560. URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0763-7>.
6. Булычев А.А., Джамалов Р.Г., Сидоров Р.В. Применение данных спутниковой системы измерения поля гравитации Земли (*GRACE*) для изучения и оценки гидролого-гидрогеологических характеристик крупных речных бассейнов // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39, № 5. С. 476–476.
7. Им С.Т., Харук В.И. Изменение водной массы в криолитозоне Средней Сибири по данным дистанционного зондирования *GRACE* // *Журнал Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии*. 2015. Т. 8, № 6.

K.V. Krasnoshchekov¹, E.I. Ponomarev^{2,3}

¹FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: krasko@icm.krasn.ru; evg@ksc.krasn.ru

CORRELATION ANALYSIS OF LARGE-SCALE THERMAL ANOMALIES OF SURFACE WITH THE VALUE OF THE RIVER OF SIBERIA

The hypothesis was tested on the possibility of registering the balance of the "ground flow" – "river flow" connection by means of satellite gravimetric measurements (for example, GRACE, GRACE-FO) of the dynamics of the water mass. Correlation analysis between large-scale thermal anomalies of the underlying surface with the series of gravimetric data expressed by the EWH parameter for the territory of two river basins, the Nizhnyaya Tunguska and Podkamennaya Tunguska was carried out. As a first approximation, the relationship between the disturbances of the permafrost larch forests, which dominated in the study area, with thermal anomalies of the underlying surface, affecting the seasonal dynamics of groundwater flow, was shown.

Keywords: EWH, GRACE, brightness temperature, river basins.

УДК 504.3.054+528.88

К.В. Краснощеков¹, О.Э. Якубайлик²

¹Младший научный сотрудник, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

²Кандидат физико-математических наук,

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: krasko@icm.krasn.ru; oleg@icm.krasn.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Рассмотрены методы оценки загрязнения атмосферы Красноярска взвешенными частицами на основе спутниковых данных по аэрозольной оптической толщине *AOD*. Используются спутниковые данные алгоритма *MODIS MAIAC* с пространственным разрешением 1 км совместно с данными наземного экологического мониторинга *PM2.5* научной исследовательской сети ФИЦ КНЦ СО РАН. Сравнительный анализ взаимосвязи расчетных значений *PM2.5*, полученных по данным *AOD*, и наземных измерений *PM2.5* в летний период 2019 г., проведенный по нескольким моделям, показал высокий уровень корреляции указанных величин, с коэффициентом детерминации порядка 0,7.

Ключевые слова: черное небо, PM2.5, AOD, MAIAC, MODIS, загрязнение воздуха

Многочисленные эпидемиологические исследования показывают, что существует взаимосвязь между концентрациями твердых частиц (*PM* – *particulate matter*) в атмосфере и здоровьем населения [1; 2]. Внимание к этой проблеме постоянно повышается, во многих городах создаются сети мониторинга концентраций *PM*. Станции мониторинга обычно измеряют концентрацию твердых частиц трех видов

(PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 – частицы разного размера). Наиболее опасным для здоровья человека считается $PM_{2.5}$, так как размер частиц до 2,5 мкм позволяет им через дыхание проникать в кровоток человека и приводить к различным заболеваниям.

Мониторинг PM основан в основном на наземных измерениях. Сети станций мониторинга созданы сегодня во многих городах, но число точек наблюдения в них, как правило, незначительно, эти точечные измерения не дают детальной информации о пространственных характеристиках и распределении PM по городским районам, представляющим интерес. Временной охват измерений PM на месте также сильно варьируется в зависимости от периода работы прибора и его функциональности. Эти причины обуславливают развитие работ по оценке PM методами спутникового дистанционного зондирования.

Параметр AOD (*aerosol optical depth*, аэрозольная оптическая толщина) – величина, которая характеризует ослабление солнечного света при его прохождении через атмосферу. Твердые частицы в атмосфере (пыль, дым, загрязнение) поглощают или рассеивают свет. Величина AOD зависит от количества твердых частиц, которые предотвращают попадание прямых солнечных лучей на землю. Это безразмерное число, которое связано с количеством PM в вертикальном столбе атмосферы над местом наблюдения. Для установления, насколько AOD коррелирует с наземными измерениями PM , разработаны многочисленные линейные [3], химические [4], транспортные [5] и нейронные [6] модели. Однако распределение частиц по размерам, их состав, влажность воздуха, скорость ветра существенно уменьшают величину корреляции AOD - PM [6].

В ходе работы мы использовали данные AOD с пространственным разрешением в 1 км, измеренные с использованием спектрофотометра $MODIS$, алгоритм $MAIAC$, продукт $MCD19A2$. Продукт $MCD19A2$ содержит данные спектрофотометра $MODIS$, установленного на спутниках *Terra* и *Aqua*. Этот продукт был опубликован 30 мая 2018 г. и содержит данные по AOD с 1 февраля 2000 г. $MAIAC$ обеспечивает равномерное сеточное разрешение 1 км в выбранной проекции независимо от угла сканирования. Данные $MAIAC$ имеют ограничения по получению AOD . Над местностью не должно быть облачности, она не должна быть покрыта снегом. Следовательно, данные по AOD в зимний период на территорию Красноярска не доступны.

В качестве источника информации наземных измерений $PM_{2.5}$ была выбрана сеть научно-исследовательского мониторинга ФИЦ КНЦ СО РАН. В нашем исследовании мы использовали измерения $PM_{2.5}$ с постов КНЦ и измерения AOD за период с июня по август 2019 г. Мы изучали связь между концентрациями AOD и $PM_{2.5}$ в масштабе Красноярска.

В данной работе сравниваются рассчитанные данные PM с использованием модели линейной регрессии, включающей значения AOD , формулы (1) и алгоритма, включающего в себя данные AOD , высоты пограничного слоя, влажность воздуха, коэффициент гироскопического роста аэрозоля (формула (2)) [7]. Рассчитанные результаты PM сравнивались со значениями, измеренными на наземных постах мониторинга.

Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$PM = 0,0072 \cdot AOD + 0,0053. \quad (1)$$

Результат, полученный при использовании линейной модели, приведен на рис. 2.

Рассчитанные значения PM_{calc} , используя линейную модель, имеют коэффициент детерминации, равный 0,73, соотносится с данными, измеренными наземными приборами. Однако в линейной модели не учитываются такие параметры, как

влажность воздуха RH , высота пограничного слоя $PBLH$) коэффициент гироскопического роста аэрозолей γ . Поэтому была выполнена оценка пространственного распределения концентраций PM по уточненной модели:

$$PM = \frac{AOD}{A \cdot PBLH} \cdot K \left(\frac{1 - RH}{1 - RH_0} \right)^{-\gamma}, \quad (2)$$

где AOD – данные аэрозольной оптической толщины, полученные спутниковыми методами; RH – влажность воздуха; H – высота пограничного слоя атмосферы.

Полученный результат показан на рис. 3.

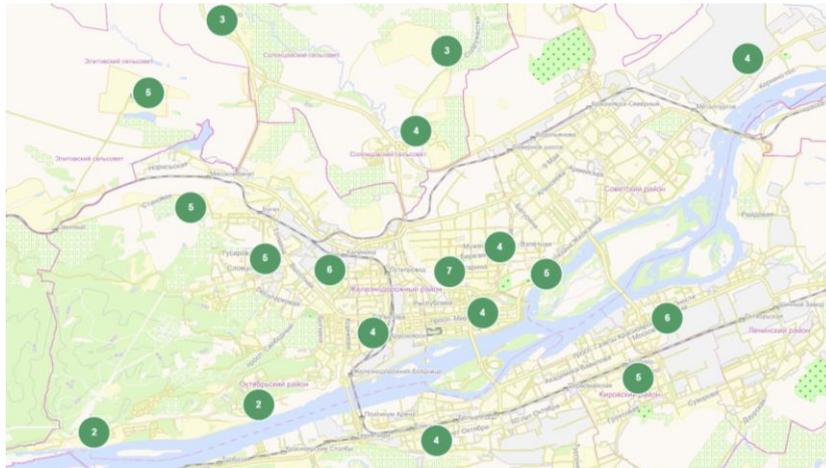


Рис. 1. Расположения постов мониторинга КНЦ

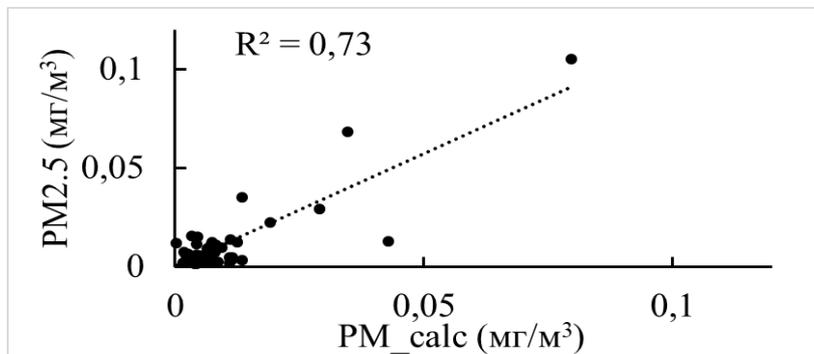


Рис. 2. Сравнение $PM_{2.5}$, полученных с постов КНЦ и PM и рассчитанных с использованием линейной модели (PM_{calc})

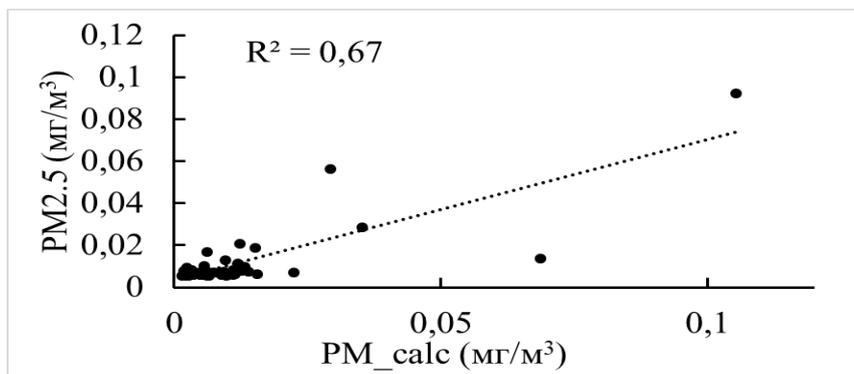


Рис. 3. Сравнение PM , полученных с постов КНЦ ($PM_{2.5}$) и рассчитанных значений (PM_{calc})

Используя данную модель, мы получили значение коэффициента детерминации равное 0,67, что указывает на достаточно хорошую аппроксимацию с наземными данными *PM2.5*.

Результаты, полученные с использованием модели линейной регрессии, показали более высокую корреляцию с данными наземных наблюдений при сравнении со значениями, полученными, используя модель, описанную в [7]. Однако в обоих случаях получена достаточно высокая корреляция с данными наземных наблюдений. Используя данные постов экологического мониторинга совместно с данными высокого пространственного разрешения MODIS MAIAC, можно создать основу для улучшения экологической обстановки города.

Список литературы

1. Kaufman Y.J., Tanré D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system // Nature. 2002. Т. 419, № 6903. С. 215–223.
2. Schwartz J., Laden F., Zanobetti A. The concentration-response relation between PM(2.5) and daily deaths // Environmental health perspectives. 2002. Т. 110, № 10. С. 1025-1029.
3. Yap X.Q., Hashim M. A robust calibration approach for PM10 prediction from MODIS aerosol optical depth // Atmospheric Chemistry & Physics. 2013. № 13. С. 3517–3526.
4. Incorporating local land use regression and satellite aerosol optical depth in a hybrid model of spatiotemporal PM2.5 exposures in the Mid-Atlantic states / I. Kloog [et al.] // Environmental Science & Technology. 2012. Т. 46, № 21. С. 11913–11921.
5. Gupta P., Christopher S.A. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach // J. of Geophysical Research. 2009. Vol. 114. D14205.
6. Wang J., Christopher S.A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM2.5 mass: Implications for air quality studies // Geophysical Research Letters. 2003. Т. 30, № 21. 2095.
7. Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM2.5 / C. Lin [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2015. Т. 156. С. 117–128.

K.V. Krasnoshchekov¹, O.E. Yakubailik²

¹FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: krasko@icm.krasn.ru; oleg@icm.krasn.ru

ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY USING SATELLITE DATA

Methods for estimating the atmospheric pollution of Krasnoyarsk by particulate matter based on satellite data on the aerosol optical depth (AOD) are considered. Satellite data from the MODIS MAIAC algorithm with a spatial resolution of 1 km are used together with data from the ground-based PM2.5 environmental monitoring of the research network of the FRC KNC SB RAS. A comparative analysis of the relationship between the calculated values of PM2.5 obtained from AOD data and ground-based measurements of PM2.5 in the summer of 2019, conducted using several models, showed a high level of correlation of these values, with a coefficient of determination of the order of 0.7.

Keywords: PM2.5, AOD, MAIAC, MODIS, air pollution, environmental monitoring.

**О.Ю. Кремнева¹, Р.Ю. Данилов¹, О.В. Тутубалина²,
И.И. Середа², М.В. Зимин², А.А. Курилов¹**

¹Всероссийский научно-исследовательский институт
биологической защиты растений, Краснодар, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: daniloff.roman2011@yandex.ru; olgatut@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ДИАГНОСТИКИ РАННЕГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БОЛЕЗНЕЙ ПШЕНИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Объектами исследований являлись посевы четырех сортов озимой пшеницы, которые характеризуются разной степенью устойчивости к листовостебельным болезням. На участках с посевами пшеницы были созданы искусственный и естественный инфекционные фоны развития основных патогенов. С момента прохождения патогенами прогнозируемого периода инкубации выполнялись серии ежедневных спектрометрических измерений посевов озимой пшеницы в диапазоне электромагнитного излучения от 350 до 2 500 нм со спектральным разрешением 3–10 нм с помощью спектрорадиометра *ASD FieldSpec 3 Hi-Res*. Установлено, что по многовременным данным наземного спектрометрирования возможно детектировать изменения состояния посевов озимой пшеницы на ранних стадиях развития патогенов.

Ключевые слова: наземное спектрометрирование, озимая пшеница, болезни пшеницы, спектральные характеристики.

Озимая пшеница является одной из ведущих культур по площади возделывания как во всем мире, так и в России. К комплексу экономически значимых патогенов пшеницы относятся – возбудители бурой и желтой ржавчины (*Puccinia triticina* Erikss., *Puccinia striiformis* West.), желтой пятнистости (*Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechsler), септориоза (*Septoria* spp.), мучнистой росы (*Blumeria graminis* (DC.) Speer). Болезни являются очень вредоносными и широко распространенными как в мире [1; 2], так и в России, особенно в ее южном регионе [3; 4].

Проведение эффективных и экономически обоснованных защитных мероприятий против болезней пшеницы во многом определяется возможностью раннего обнаружения инфекции и источников ее происхождения [5].

Целью наших исследований являлась оценка возможности диагностики раннего развития экономически значимых возбудителей болезней на основе анализа данных наземного спектрометрирования с учетом генотипов разных сортов озимой пшеницы.

Исследования проводили в 2018–2019 гг. на опытном поле Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений в Краснодар. Объектами исследований являлись посевы четырех сортов озимой пшеницы селекции НЦЗ им. П.П. Лукьяненко (г. Краснодар) и Научного центра «Донской»

(г. Зерноград, Ростовская область), которые характеризуются разной степенью устойчивости к листовостебельным болезням [6; 7]: Бонус, Курень, Аксинья и Краснодарская 99. Каждый участок был разделен на три зоны: 1 – защищенный от болезней фунгицидами (чистый фон); 2 – с искусственным инфекционным фоном бурой ржавчины (инфицированный); 3 – с естественным развитием болезней.

Для развития бурой и желтой ржавчин на экспериментальном участке применяли метод искусственного заражения растений озимой пшеницы спорами данных фитопатогенов [8]. Развитие возбудителей желтой пятнистости, септориоза и мучнистой росы происходило на естественном инфекционном фоне. Создание чистого фона (без болезней) осуществлялось путем двух кратной обработки выделенной зоны системным фунгицидом Фалькон, КС: первая обработка – 25 апреля 2019 г. (фаза «флаг-лист»), вторая обработка – 9 мая 2019 г. (фаза «начало цветения» Z 61). Учет болезней проводили, начиная с момента первичных проявлений развития болезней, которые были отмечены 30 апреля 2019 г. в фазу «флаг-лист» (Z 40-47) и последующие – до фазы «молочно-восковой спелости зерна» (Z 58) с интервалом 10–12 суток. Степень поражения растений болезнями оценивали в процентах по международным методикам [9].

Первая серия гиперспектральных измерений посевов пшеницы на тестовых участках осуществлялась ежедневно с 26 апреля 2019 г. по 2 мая 2019 г. после прохождения ржавчинными патогенами прогнозируемого периода инкубации, т.е. спустя 10 суток с момента проведения искусственного заражения растений их спорами (период инкубации ржавчинных болезней составляет 7–14 суток в зависимости от лимитирующих факторов). В период первой серии измерений рост растений озимой пшеницы характеризовался прохождением последних стадий фазы «стеблевания» (Z 37-39). Последующие измерения проводились в отдельные даты до появления и усиления видимых симптомов заболеваний с учетом основных фаз роста растений озимой пшеницы [10].

Приборная база наземных полевых исследований была представлена спектро-радиометром *ASD FieldSpec 3 Hi-Res*, который предназначен для измерения абсолютных и относительных значений энергетической яркости в спектральном диапазоне 350–2 500 нм.

С целью установления специфических спектральных диапазонов, свидетельствующих о проявлении изменений, вызванных воздействием вредных объектов, был проведен анализ изменения морфологии спектральных сигнатур коэффициента спектральной яркости растительных объектов в зависимости от их фактического состояния, учтенного во время полевых обследований.

Первые видимые изменения спектральных характеристик исследуемых растительных фонов, которые проявились в виде снижения показателей коэффициента спектральной яркости (КСЯ) на инфицированных делянках всех сортов были отметить по результатам анализа данных, полученных в период с 30 апреля по 2 мая 2019 г. (рисунок). В этот момент были зафиксированы первые единичные проявления желтой ржавчины на устойчивом сорте Курень, а также единичные проявления септориозной пятнистости на делянках остальных сортов.

Таким образом, в ходе анализа полученных данных было установлено, что наиболее значимые различия отражательной способности изучаемых объектов проявляются в БИК-диапазоне, поэтому был проведен анализ изменения значений КСЯ для всех делянок за весь период измерений (26 апреля 2019 г. – 2 июня 2019 г.) в канале 800 нм (рисунок). Данный канал является центром БИК-диапазона и часто используется съемочными системами разного вида.

По результатам анализа полученных графиков можно сделать следующие выводы:

- временной ход КСЯ на длине волны 800 нм для защищенных участков имеет более плавный вид и к моменту последней серии измерений имеет более высокие значения относительно инфицированных;
- динамика КСЯ для естественного фона имеет более стабильный вид и высокие значения относительно остальных участков. Предположительно это связано с тем, что они были подвержены меньшему стрессу от фунгицида или искусственно созданного патогенного фона.

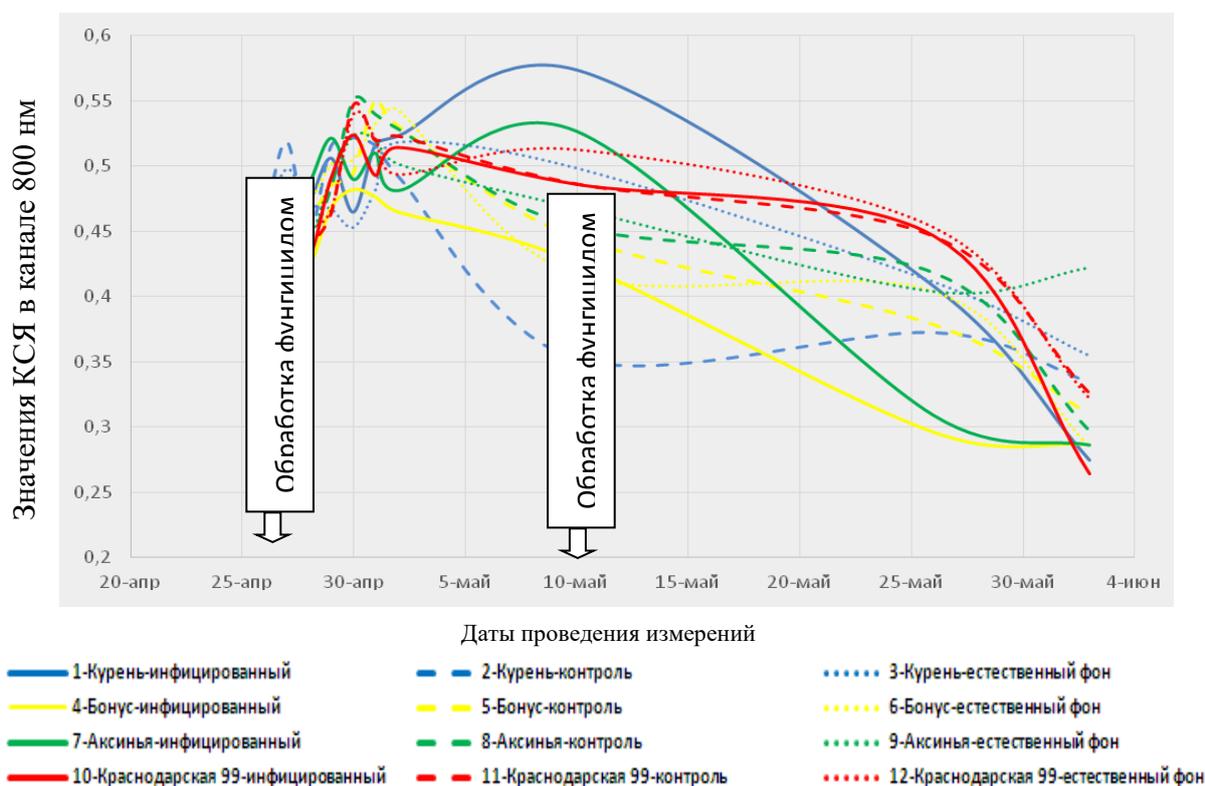


Рисунок. Графики временного изменения значений коэффициента спектральной яркости исследуемых сортов озимой пшеницы в канале 800 нм

По многовременным данным наземного спектрометрирования возможно детектировать изменение состояния озимой пшеницы на ранних стадиях развития патогенов. При этом можно оценить разницу в динамике спектров для посевов, развивающихся в разных условиях.

В ходе исследований были отмечены различные факторы, вносящие неточности в измерения: неравномерность высева, влияние сторонних патогенов, плановая обработка полей, неточности в соблюдении техники спектрометрирования. В дальнейшем необходимо разработать методики, позволяющие минимизировать эти факторы для повышения достоверности получаемых результатов.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-416-230043 p_a и Администрации Краснодарского края.

Список литературы

1. Evaluation of wheat cultivars growing in Kazakhstan and Russia for resistance to tan spot / A. Kokhmetova, M. Atishova, Z. Sapakhova [et al.] // J. of Plant Pathology. 2017. Vol. 99, № 1. P. 161–167.

2. Kolmer J.A. Hughes M.E. Physiologic specialization of *Puccinia triticina* on wheat in the United States in 2012 // *Plant Disease*. 2014. Vol. 98. P. 1145–1150.
3. Желтая ржавчина пшеницы на Кубани / Г.В. Волкова, Л.Н. Шуляковская, О.А. Кудинова, И.П. Матвеева // *Защита и карантин растений*. 2018. № 4. С. 22.
4. Кремнева О.Ю., Волкова Г.В., Коваленко Н.М. Динамика расового состава *Pyrenophora tritici-repentis* в Северо-Кавказском регионе // *Микология и фитопатология*. 2019. Т. 53, № 4. С. 246–253.
5. Разработка технологии обнаружения очагов ржавчинных болезней пшеницы / Ю.Г. Соколов, В.Т. Садковский, О.Ю. Кремнева [и др.] // *Международ. науч.-исслед. журн.* 2018. № 12-2 (78). С. 29–33.
6. Поражаемость сортов озимой пшеницы септориозом (*Septoria spp.*) и желтой пятнистостью (*Pyrenophora tritici-repentis*) в условиях Республики Беларусь и Северо-Кавказского региона России / А.Г. Жуковский, А.Г. Ильюк, С.Ф. Буга [и др.] // *Политематический сетевой электрон. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та*. 2012. № 80. С. 252–263. URL: <http://ej.kubagro.ru/a/viewaut.asp?id=973> (дата обращения: 11.08.2019).
7. Волкова Г.В., Ваганова О.Ф., Долбилова Т.А. Характеристика устойчивости к бурой ржавчине сортов мягкой озимой пшеницы // *Зерновое хозяйство России*. 2016. № 4. С. 62–67.
8. Анпилогова Л.К., Волкова Г.В. Методы создания искусственных инфекционных фонов и оценки сортообразцов пшеницы на устойчивость к вредоносным болезням (фузариозу колоса, ржавчинам, мучнистой росе). Краснодар: ВНИИБЗР, РАСХН, 2000. 28 с.
9. Peterson R.F., Campbell A.B., Hannah A.E. Diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals // *Canad. J. Bot.* 1948. № 26. P. 495–500.
10. Федоренко В.Ф., Мишуоров Н.П., Неменуцкая Л.А. Перспективные технологии диагностики патогенов сельскохозяйственных растений: науч. аналит. обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 68 с.

O.Yu. Kremneva¹, R.Yu. Danilov¹, O.V. Tutubalina², I.I. Sereda²,
M.V. Zimin², A.A. Kurilov¹

¹All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL BASES FOR DIAGNOSTICS OF EARLY DEVELOPMENT OF ECONOMICALLY SIGNIFICANT WHEAT PATHOGENS USING GROUND-BASED HYPERSPECTRAL MEASUREMENTS AND REMOTE MONITORING TOOLS

The objects of research were crops of four varieties of winter wheat, which are characterized by varying degrees of resistance to leaf-stem diseases. In areas with wheat crops, artificial and natural infectious backgrounds for the development of the main pathogens were created. Starting with the passage of the predicted incubation period by pathogens, a series of daily spectrometric measurements of winter wheat crops were carried out in the electromagnetic radiation range from 350 to 2 500 nm with a spectral resolution of 3–10 nm using an ASD FieldSpec 3 Hi-Res spectroradiometer. It was established that, according to the multimodal data of ground-based spectrometry, it is possible to detect changes in the state of winter wheat crops in the early stages of pathogen development.

Keywords: spectrometer ground-based spectrometry, winter wheat, wheat diseases, spectral characteristics.

Е.Н. Кулик¹, Д.А. Байкин²

¹Кандидат технических наук, доцент, ²Магистрант
Сибирский университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru, Baykin-DA2020@sgugit.ru

МОНИТОРИНГ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ МЕТОДАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Целью работы является исследование технологии мониторинга растительности в районах добычи и транспортировки нефти методами автоматизированного дешифрирования материалов спутниковой съемки на примере территории Надымского района ЯНАО. В настоящее время сбор и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли охватывает все больше областей, таких как мониторинг экологического состояния территории, геоботаническое картографирование территорий, анализ растительного покрова и др. Надымский район имеет суровый климат с большой амплитудой температур и расположен в зонах тундры и лесотундры. Природные особенности территории требуют их учета при адаптации классических методов анализа растительности по спутниковым изображениям.

Ключевые слова: мониторинг, данные ДЗЗ, дешифрирование, растительный покров, индексы.

Для выполнения анализа растительности были использованы космические снимки (рис. 1), полученные со спутника Sentinel-2 в пространственном разрешении от 10 до 60 м в видимой, ближней и коротковолновой ИК зонах спектра. Съёмочная система имеет 13 спектральных каналов, оптимальных для отображения различий в состоянии растительного покрова и позволяющих минимизировать влияние атмосферы на качество съемки. Высота орбиты спутника 785 км, ширина полосы съемки 290 км.

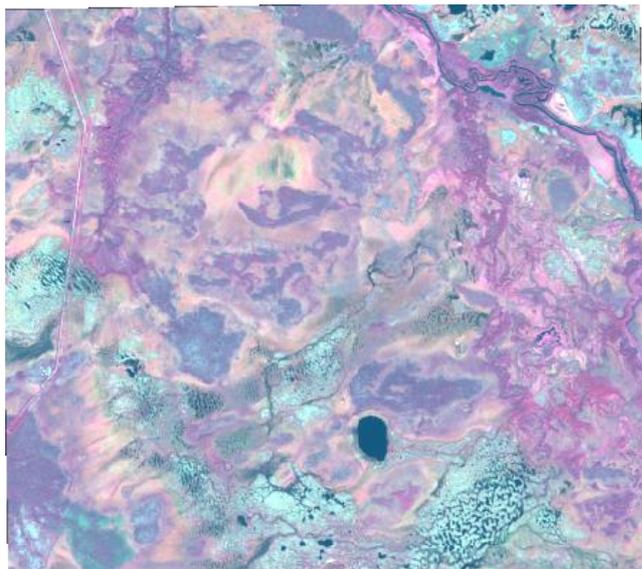


Рис. 1. Исходный космический снимок

В ходе анализа изображений были экспериментально отобраны снимки, достоверно представляющие растительные сообщества во время пика вегетационного периода. Следует отметить ограниченное количество мультиспектральных спутниковых систем, подвергающих съемке приполярные территории.

В связи с потенциальной опасностью разлива нефтепродуктов при их транспортировке необходимо проводить мониторинг состояния растительного покрова в этих районах сурового климата. Климат Надымского района – субарктический континентальный с продолжительной холодной зимой и прохладным летом. Средняя температура января составляет $-23,5^{\circ}\text{C}$, июля – 15°C .

В связи с наличием жесткого климата и типично медленного почвообразующего процесса состав лесов территории достаточно скудный, а продуктивность посадок достаточно низкая. На приполярных территориях состав растительного покрова приобретает особую важность, так как при техногенном нарушении экосистемы может серьезно пострадать традиционное оленеводство, а при значительных разливах нефти растительность и почвы становятся непригодными для использования.

Для выполнения исследования были выбраны следующие методы цифровой обработки снимков: построение и анализ индексных изображений; автоматизированное определение типов растительности методом неуправляемой классификации.

Первым был рассчитан индекс NDVI: нормализованный разностный вегетационный индекс, который позволяет выявлять растительность на спутниковом изображении путем расчета отношения показателей отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра [1]. В красной области (от 0,6 до 0,7 мкм) хлорофиллом максимально поглощается солнечная энергия. В инфракрасной области (от 0,7 до 1 мкм) солнечный свет максимально отражается от клеток листьев растений.

Пример применения индекса NDVI к космическому снимку представлен на рис. 2. Синим цветом показана гидрография, зеленым – мхи и лишайники, желтым – кустарниковая растительность, темно-зеленым – смешанная растительность.

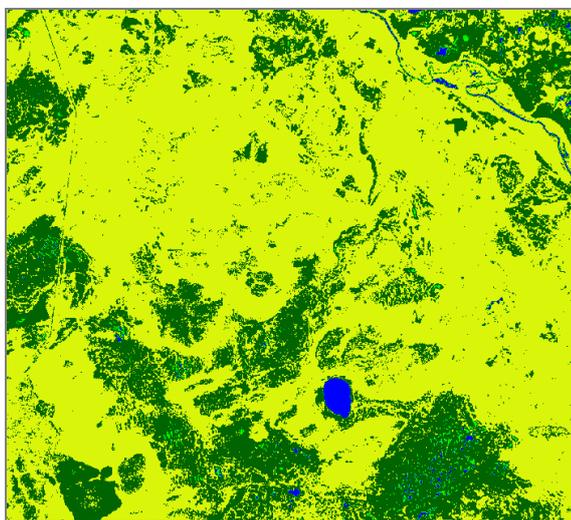


Рис. 2. Полученное индексное изображение NDVI

Затем для выделения типов растительности был использован индекс LCI (*Leaf Chlorophyll Index*) [2]. Данный индекс используется для расчета общего содержания хлорофилла в листьях растений: чувствителен к небольшим колебаниям и малому значению содержания хлорофилла в растениях. На рис. 3 представлен результат применения этого индекса к космическому снимку (классифицировано аналогично индексу NDVI).

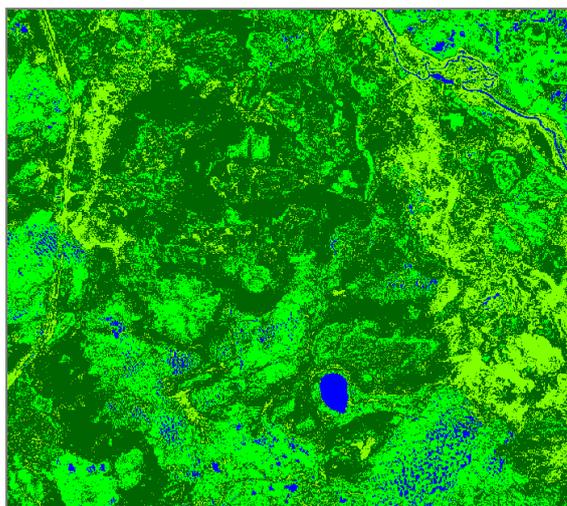


Рис. 3. Результат применения индекса LCI к космическому снимку

После расчета индексов была проведена процедура неуправляемой классификации спутникового изображения. Она основана на расчете «спектрального расстояния» между различными классами и подборе критериев принадлежности яркостей пикселей к определенному классу. Основные преимущества неуправляемой классификации: нет необходимости создавать эталоны дешифрирования вручную, оператор задает лишь количество классов и ограничивающее правило [3; 4]. Классификация была проведена по методу *k-means*, который основывается на итерационных вычислениях. Расчет завершается либо при отсутствии изменений положения центров кластеров, либо после вычисления крайней итерации, количество которых было задано оператором. Результат выполнения неуправляемой классификации представлен на рис. 4.

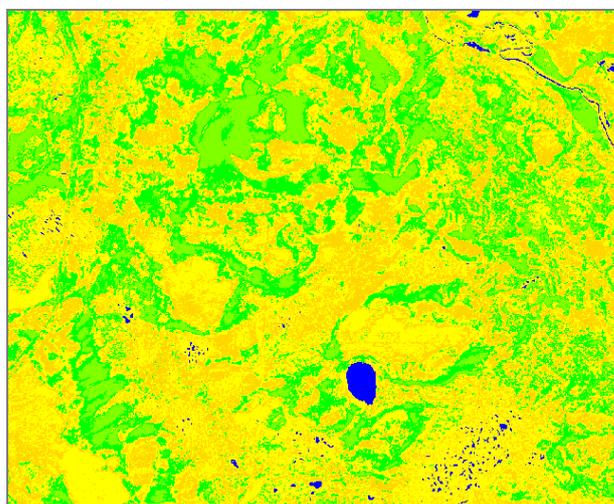


Рис. 4. Результат применения неуправляемой классификации к космическому снимку

В результате анализа итоговых индексных и тематических изображений выявлено, что самые детальные геоботанические данные о типах растительности удалось получить по результатам расчета индекса LCI, так как он оказался более чувствительным даже к небольшому содержанию хлорофилла в скудной тундровой растительности (лишайники, мхи и др.). Практическая ценность результатов исследования подтверждена специалистами научного центра изучения Арктики, город Салехард.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

Список литературы

1. Лавриненко И.А. Использование дистанционных методов при геоботаническом районировании восточно-европейских тундр. СПб.: Ботанический ин-т им. В.Л. Комарова РАН, 2012. С. 8.
2. Index DataBase / Отдел «Show Indices for selected Sensor». Шладминг, 2020. URL: <https://www.indexdatabase.de/>.
3. Малышева Н.В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2012. С. 151.
4. Спутниковое картографирование растительного покрова / С.А. Барталёв, В.А. Егоров, В.О. Жарко [и др.]. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

E.N. Kulik, D.A. Baykin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru; Baykin-DA2020@sgugit.ru

MONITORING OF VEGETATION IN THE AREAS OF OIL PRODUCTION AND TRANSPORTATION BY METHODS OF AUTOMATED INTERPRETATION OF REMOTE SENSING DATA

The goal of this research is the technology optimization of vegetation monitoring within oil production and transportation areas by automated interpretation of satellite images on the example of the Nadym district of the Yamal-Nenets Autonomous Region. Nowadays, the collection and interpretation of remote sensing data cover more and more areas, such as monitoring the ecological condition of the territory, geobotanical mapping, analysis of vegetation cover, etc. Nadymsky district has a harsh climate with a large temperature range and is located in the tundra and forest-tundra zones. The natural particularity of the territory has to be considered within adaptation of image analysis methods for vegetation interpretation.

Keywords: monitoring, remote sensing data, interpretation, vegetation cover, indices.

Е.Н. Кулик¹, А.Т. Байшуаков²

¹Кандидат технических наук, доцент, ²Студент
Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru; arslan.bayschuakov@mail.ru

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ ВЕГЕТАЦИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Управление сельским хозяйством в условиях рискованного земледелия должно подлежать обязательному периодическому контролю. Применение данных дистанционного зондирования позволяет осуществлять мониторинг больших территорий, тем самым снижая материальные затраты на проведение обследований полевыми методами. Предметом исследования являются посевные площади сельскохозяйственного назначения. Цель работы заключается в выполнении мониторинга состояния посевов по разновременным снимкам. Итогом такого мониторинга могут служить результаты анализа состояния посевов на различных стадиях вегетации по изображениям, полученным путем расчета вегетационных индексов.

Ключевые слова: мониторинг, данные ДЗЗ, вегетация, NDVI, сельское хозяйство.

Для достижения цели данного исследования были сформулированы задачи, направленные на изучение фенологических фаз роста и развития сельскохозяйственных культур, определение степени вегетации с использованием нормализованного дифференцированного вегетационного индекса (NDVI) на разновременных снимках.

Используемые в данной работе космические снимки были получены съемочной системой SPOT-6. Космический аппарат SPOT-6 выполняет съемку территории с шириной полосы 60 км и с высоты 694 км. Спектральные диапазоны съемочной бортовой аппаратуры представлены каналами видимого спектра электромагнитных волн и ближним инфракрасным каналом. Также используется изображение панхроматической съемки.

Разновременные снимки одного года на выбранную авторами территорию сельскохозяйственного назначения позволили проследить фенологические фазы развития посевов сельскохозяйственных культур, а также ряд других особенностей географических объектов, изображенных на снимках.

Выбранная территория расположена в западной части Искитимского района Новосибирской области и занимает площадь 43 км² (рис. 1). Фенологические фазы развития сельскохозяйственных культур фиксируются по морфологическим признакам. В работе были выделены следующие фазы фенологии: посев, появление всходов, кущение, трубкование, колошение (цветение), созревание и уборка. На стадии «спелости» (перехода от стадии цветения к стадии созревания культур) фиксируется максимум содержания хлорофилла в листьях растений, вследствие чего зеленый окрас растений сменяется желтым окрасом [1].

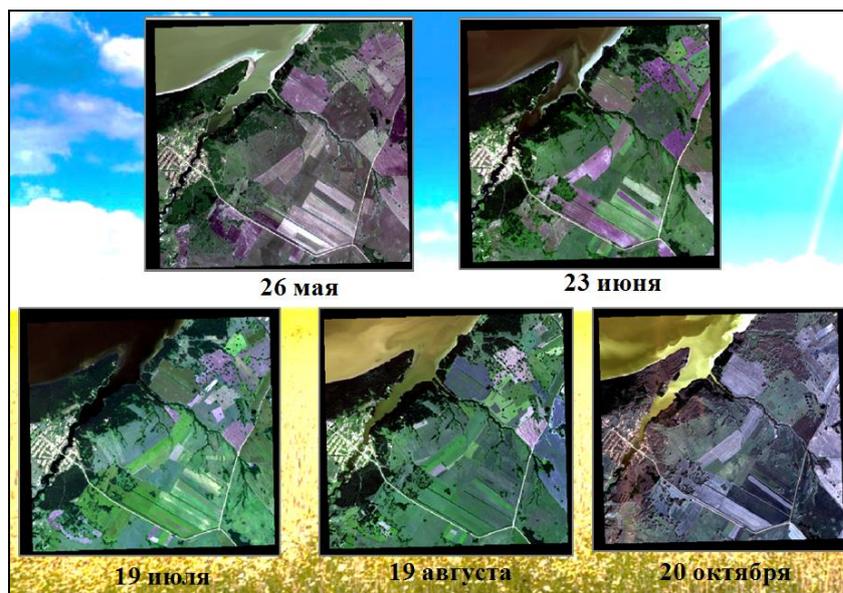


Рис. 1. Исходные космические снимки

При визуальном дешифрировании космических снимков на предмет оценки прочих растительных объектов следует отметить значительные различия между отображениями хвойных и лиственных пород деревьев и посевными площадями. На снимке за 26 мая имеются участки, на которых еще отсутствует фитомасса. В июне на тех же участках заметно появление всходов. Активное цветение наблюдается на июльском снимке. На осеннем снимке наблюдаются убранные поля. Для определения состояния растительности и оценки ее фитомассы был использован расчет нормализованного дифференцированного вегетационного индекса (NDVI) – это простой количественный показатель фотосинтетической активной биомассы [2]. Чтобы наглядно отобразить индекс NDVI, использовалась дискретная шкала, показывающая значения в диапазоне от -1 до $+1$. Для идентификации растительности применялись значения NDVI от 0 и выше. Значения индекса меньше нуля указывали на такие объекты, как гидрография, прибрежная полоса, снег и искусственные объекты [3].

Расчет NDVI, выполненный на выбранную территорию, по разновременным снимкам, показал существенные изменения в изображениях объектов, свидетельствующие об особенностях их состояния. Наиболее четко выделены границы объектов гидрографии. С учетом сезонной изменчивости уменьшается площадь угнетенной растительности. При этом площадь густой растительности с каждым последующим месяцем увеличивается.

На рис. 2 приведены изображения, полученные путем расчета NDVI на начало фенологического периода (май), середину (июль) и на окончание фенологического развития (октябрь).

Как видно на рис. 2, на снимке за 26 мая имеются площади со значением NDVI меньше 0,166, что указывает на открытые грунты. Как правило, в этот период только начинается посев сельскохозяйственных культур. На снимке за 19 июля на участках, где в мае были открытые грунты, теперь уже наблюдается интенсивная вегетация. Растительность на таких участках более густая. На снимке за 20 октября много убранных полей, для которых соответствуют значения NDVI ниже 0,166. Тематические изображения, полученные путем расчета вегетационного индекса NDVI, позволили определить на сельскохозяйственных полях участки с разряженной и густой растительностью, а также определить площади с открытыми грунтами, которые через определенный интервал съемки изменяли свои размеры.

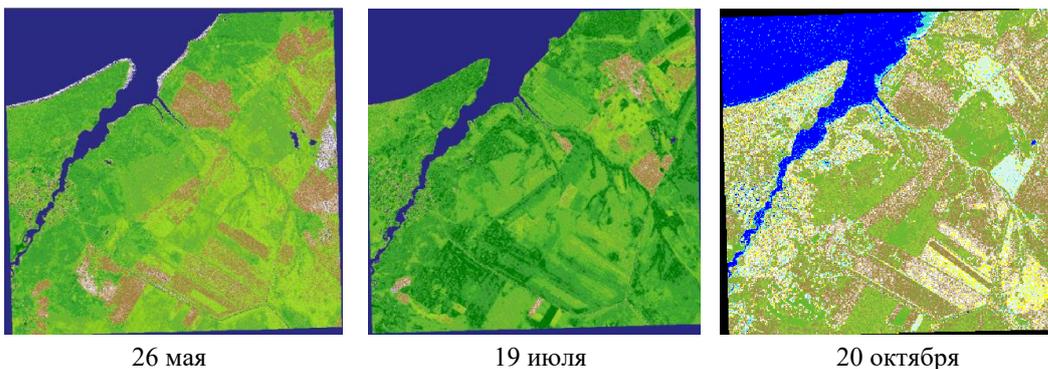


Рис. 2. Изображения, полученные путем расчета NDVI

В заключение стоит отметить, что данные дистанционного зондирования Земли, наряду с геоинформационными технологиями, активно внедряются в сельское хозяйство. Периодическая повторяемость съемки одной и той же территории позволяет выполнить контроль и проследить динамику развития сельскохозяйственных культур. В результате исследования по данной теме авторами были изучены фенологические фазы роста и развития сельскохозяйственных культур, а также посредством выполнения расчета NDVI были получены тематические изображения, сезонного состояния растительности.

Данное исследование проводилось при информационной поддержке компании ООО «СКАНЭКС» (с предоставлением космических снимков из архива) на основании права на получение информационного обеспечения и снимков призеров Всероссийской студенческой олимпиады по тематическому дешифрированию данных дистанционного зондирования Земли, проводившейся на базе Сибирского государственного университета науки и технологии имени академика М.Ф. Решетнева в августе 2017 г.

Цифровая обработка спутниковых изображений выполнялась в программном комплексе Erdas Imagine.

Список литературы

1. Козловская И.П. Основы агрономии: учеб. пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2015. С. 43.
2. Заварзина А.С., Кулик Е.Н. Анализ изменения характеристик сельскохозяйственных земель на основе материалов аэросъемки с БПЛА // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2019. С. 239–240.
3. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Академия, 2011. С. 170.

E.N. Kulik, A.T. Bayshuakov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: e.n.kulik@snga.ru; arslan.bayschuakov@mail.ru

MONITORING OF THE AGRICULTURAL CROPS STATES AT DIFFERENT VEGETATION STAGES USING REMOTE SENSING DATA

The paper discusses the application of remote sensing data to solve the problems of agriculture, in particular, to control and monitor seasonal variability of agricultural crops.

Keywords: monitoring, remote sensing data, vegetation, NDVI, agriculture.

В.В. Латышева¹, Т.Н. Демьяненко¹, И.Ю. Ботвич², Д.В. Емельянов²

¹Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

²Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: latyshevavalentina1996@gmail.com; t-demyanen@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

Исследованы связи между спектральными характеристиками поверхности элементов структуры почвенного покрова и свойствами почв в условиях Красноярской лесостепи Средней Сибири. Выявлено, что наиболее информативными параметрами для полевой спектрометрии являются содержание гумуса, углекислоты карбонатов и преобладающих гранулометрических фракций. Опытным путем, средствами многомерной статистики подтверждена статистически значимая связь между элементами структуры почвенного покрова и отражательной способностью почв. Выделены длины волн с наибольшей силой связи. Получены регрессионные уравнения для дистанционного исследования структуры почвенного покрова, использовать которые возможно при условии проведения дополнительных точечных исследований в более широком диапазоне тестовых параметров.

Ключевые слова: структура почвенного покрова, коэффициент спектральной яркости, гумус, гранулометрический состав, множественная регрессия.

Для рационального и экологически безопасного растениеводства необходим учет всех факторов, в том числе и неоднородности почвенного покрова или его структуры (СПП) [1]. Наиболее оптимальным способом учета является цифровое картографирование СПП с последующим использованием цифровой карты в системе адаптивно-ландшафтного земледелия [2]. Крупномасштабное почвенное картографирование чрезвычайно экономически и трудозатратно в связи со спецификой картографируемого объекта. Использование данных дистанционного зондирования значительно облегчает работу, но требует детальной методической основы в условиях конкретного региона.

Целью настоящего исследования является выявление связей между спектральными характеристиками поверхности почвы и ее физико-химическими параметрами в условиях выраженного микрорельефа пахотных угодий Красноярской лесостепи.

Исследование проведено на тестовом участке площадью 10 га в ОПХ «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края (56°25', 92°53'), на который ранее составлена карта СПП. В мае 2019 г. (в этот период поверхность почвы открыта) из пахотного горизонта почв участка отобрано 153 точечных образца с параллельной спектральной съемкой поверхности почв полевым спектрометрическим комплексом, состоящим из спектрометра *Spectral Evolution PSR-1100F* с возможностью внутреннего хранения данных и калибровочного отражательного элемента. Дистанционный сбор и анализ данных произведен средствами совместного программного обеспечения *DARWin SP Data Acquisition Package*. Высота съемки 100 см над поверхностью почвы, площадь – 50 см². Съемка производилась в ясную

погоду с 11:00 до 15:00. Положение спектрометра устанавливалось вертикально над поверхностью съемочной площадки (в надир). В отобранных образцах проведен гранулометрический анализ, определено содержание гумуса и углекислоты карбонатов [3]. Математическая обработка результатов производилась при совместном использовании программ Microsoft Excel и StatSoft Statistica 8.0.

Коэффициенты спектральной яркости получены в диапазоне от 320 до 1 100 нм. Для удобства работы имеющийся спектральный диапазон средствами факторного анализа многомерной статистики был свернут до одного обобщенного показателя (фактора) в 11 категориях на основании деления спектра электромагнитного излучения на группы [4]. С помощью дискриминантного анализа из выбранных областей были выделены только те, в которых почвенные параметры значимо различаются по набору спектральных яркостей (табл. 1). Для группировки данных выделена переменная «Шифр», под которой подразумевается группировка точек по контурам в структуре почвенного покрова.

Таблица 1

Результаты дискриминантного анализа

Диапазон длин волн	Лямбда Уилкса	Частная лямбда	Значение <i>F</i> -критерия	<i>P</i> -значение
320–380	0,511696	0,793567	7,387798	0,0000035
451–480	0,564171	0,719755	11,05790	0,0000052
481–510	0,518220	0,783576	7,844115	0,0000015
621–700	0,482611	0,841391	5,353615	0,0001540
701–770	0,472976	0,858531	4,679756	0,0005510
771–820	0,456788	0,888957	3,547559	0,0047160

С помощью того же факторного анализа внутри каждого диапазона мы выделили конкретные длины волн по значению коэффициента корреляции с самой большой силой связи: 360, 465, 495, 660, 733 и 800 нм; и в дальнейшем для установления связи между почвенными параметрами и спектральными свойствами почв использовали коэффициенты спектральной яркости в данных длинах.

Зависимость отражательной способности от исследуемых почвенных параметров была установлена с помощью множественного регрессионного анализа (табл. 2).

Статистически значимая связь гранулометрического состава имеется только у преобладающих фракций: крупной пыли, ила и физической глины с длинами волн 360, 465 и 495 нм в ультрафиолетовой, голубой и синей части спектра соответственно. Связь гумуса с коэффициентами спектральной яркости наблюдается в тех же диапазонах (360, 465 и 495 нм). Карбонаты кальция демонстрируют связь с голубой, синей, красной и ближней инфракрасной областями спектра в длинах 465, 495, 660 и 800 нм соответственно.

Коэффициенты регрессии являются статистически значимыми в отношении всех почвенных параметров, однако полученные с их помощью регрессионные уравнения не могут быть применены на практике в силу большой погрешности результатов (рисунок). В случае с карбонатами кальция и гумусом такая погрешность является минимальной, с гранулометрическим составом – максимальной.

Результаты множественного регрессионного анализа

Почвенный параметр, %	Множественный R	P-Значение	Длина волны, нм	Коэф. регрессии
Фракция ила	0,5737	0,000279	360	35,733
			465	-160,425
			495	123,651
Фракция крупной пыли	0,5373	0,001043	360	-38,0765
			465	133,4074
			495	-99,1852
Физическая глина	0,6333	0,000021	360	46,041
			465	-169,569
			495	126,365
Гумус	0,5294	0,000001	360	10,9312
			465	-33,8066
			495	24,5224
CaCO ₃	0,5891	0,000001	465	2,20776
			495	-2,67923
			660	0,94665
			800	0,35709

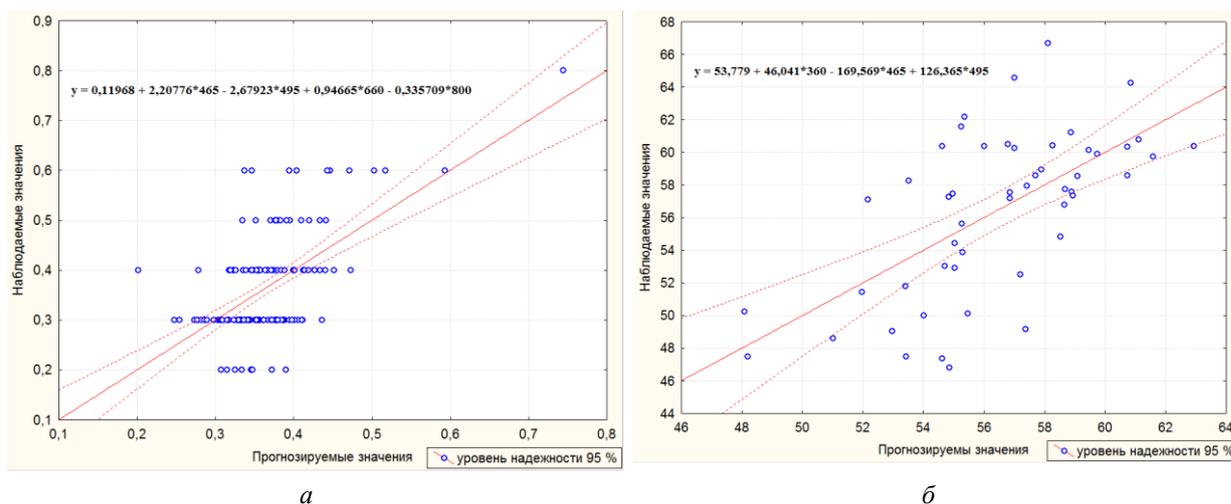


Рисунок. Прогнозируемые и наблюдаемые значения почвенных параметров при постановке в регрессионное уравнение, %: *а* – карбонаты кальция, *б* – физическая глина

Почти все точки лежат за пределами доверительного интервала. Причиной погрешности могут быть неучтенные факторы: влажность почвы, количество пожнивных остатков на поверхности и др. Несомненно, расширение диапазона тестируемых параметров за счет вовлечения дополнительных точек опробования за пределами поля будет положительно сказываться на результатах множественной регрессии.

Несмотря на значительный разброс значений, прямолинейная связь между фактическими значениями и прогнозируемыми просматривается отчетливо. Возможность использования данных характеристик подтверждают достоверные коэффициенты множественной корреляции (табл. 2), однако для повышения точности прогноза необходима доработка методов анализа данных.

Список литературы

1. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 410 с.
2. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. М.: Росинформагротех, 2005. 783 с.
3. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1965. 430 с.
4. Караванова Е.И. Оптические свойства почвы и их природа. М.: Изд-во МГУ, 2003. 153 с.

V.V. Latysheva¹, T.N. Demyanenko¹, I.Yu. Botvich², D.V. Emelyanov²

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

²Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: latyshevavalentina1996@gmail.com; t-demyanen@mail.ru

USE OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SURFACE FOR MAPPING THE STRUCTURE OF SOIL COVER IN THE CONDITIONS OF KRASNOYAR FOREST STEPPE

The relationships between the spectral characteristics of the surface of the elements of the structure of soil cover and the properties of soils in the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe of Central Siberia are investigated. It was revealed that the most informative parameters for field spectrometry are the content of humus, carbon dioxide of carbonates, and the prevailing particle size fractions. Empirically, by means of multidimensional statistics, a statistically significant relationship between the elements of the structure of the soil cover and the reflectivity of soils has been confirmed. The wavelengths with the highest binding strength are highlighted. Regression equations for remote study of the soil cover structure have been obtained, which can be used if additional point studies are carried out in a wider range of test parameters.

Keywords: structure of soil cover, spectral brightness coefficient, humus, particle size distribution, multiple regression.

УДК 528.88

Е.А. Мамаш¹, И.А. Пестунов¹, Д.Л. Чубаров

¹Кандидат физико-математических наук

²ФИЦ ИВТ, Новосибирск, Россия

e-mail: elenamamash@gmail.com; pestunov@ict.sbras.ru;

dmitri.chubarov@gmail.com

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ НОВОСИБИРСКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА LANDSAT-8

Исследована возможность использования спутниковых данных LST космического аппарата (КА) *Landsat-8* для анализа температуры подстилающей поверхности на территории Новосибирска. Обсуждаются результаты сравнения спутниковых данных с данными метеостан-

ций. С использованием современных систем и методов обработки временных серий спутниковых данных строится композитное изображение температурного поля Новосибирска, изучаются основные закономерности и аномалии в распределении температуры на городской территории. Полученные результаты имеют важное прикладное значение в области анализа динамики городской застройки и эффективного управления территорией города.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, температура подстилающей поверхности, городские острова тепла, температурные карты Новосибирска.

В настоящее время накоплены значительные объемы спутниковых данных низкого, среднего и высокого пространственного разрешения и созданы системы, позволяющие работать с распределенными архивами, в том числе в режиме онлайн. Наиболее яркими примерами таких систем могут служить *Google Earth Engine* и *VEGA-Science*, разработанная в ИКИ РАН [1]. В ФИЦ ИВТ накоплен архив спутниковых данных (начиная с 2007 г.) и функционирует уникальная информационная система, позволяющая извлекать и обрабатывать временные серии спутниковых данных [2]. При оценке параметров мониторинга окружающей среды, например температуры подстилающей поверхности, переход от обработки отдельных сцен к временной серии изображений позволяет проследить не только временную динамику изменений, но и вычислить средние значения исследуемых параметров, что, в свою очередь, дает возможность исключить из рассмотрения результаты, носящие случайный характер, и выявить устойчивые аномалии.

В последние годы температурные данные *Landsat LST* активно используются при решении самых различных прикладных задач, в том числе для исследования городских островов тепла, определения устойчивых тепловых аномалий, мониторинга изменений городской территории, связанных с застройкой новыми объектами. Так, на основе многовременных тепловых снимков, фиксирующих тепловые контрасты города в разные сезоны года, проведен ряд исследований городских островов тепла Москвы, Нижнего Новгорода, крупнейших городов Заполярья (Мурманск, Норильск, Воркута, Апатиты, Салехард, Новый Уренгой, Надым) [3–7]. В работе [8] опробована методика выявления изменений городской среды города Красноярска по температуре поверхности земли на основе спутниковых данных инфракрасного диапазона. Следует отметить, что в упомянутых работах картирование выполнено на основе отдельных снимков, а детектирование изменений – на основе пар снимков. Недостатком этого подхода является чувствительность метода к выбору снимков.

В статье [9] проводится сравнение температурных данных, полученных на АМС с данными спутника *Landsat-8* на основе 10 снимков и трех метеостанций.

В данной работе мы будем пользоваться наиболее распространённым методом для подсчета температуры, описание которого можно найти, например, в работах [10; 11]. Оценка коэффициента эмиссии, присутствующего в формуле для расчета LST, проводилась на основе вегетационного индекса NDVI в летний период и индекса снега NDSI – в зимний. Однако, как показали вычислительные эксперименты, применение того или иного индекса практически не влияет на качественную картину распределения температур. Кроме того, при построении композитного изображения накладывались маски, исключаяющие облачность и тени от облаков.

В качестве инструмента извлечения и обработки спутниковой информации использовалась система *Google Earth Engine*. В этой системе спутниковые данные представлены по коллекциям, в том числе имеется коллекция атмосферно-скорректированных данных *Landsat-8* (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>). Следует отметить, что у этого спутника данные термальных каналов

изначально имеют разрешение 100 м. Однако в коллекции *Google Earth Engine* они представлены в пересчете на разрешение в 30 м, что очень удобно для изучения объектов внутри городских территорий.

Для решения задачи сопоставления полученных температурных карт с наземными городскими объектами использовались векторные данные с сайта <https://data.nextgis.com/ru/?lvl=regions&country=RU>. А также карты *Google maps* и *Bing map*.

Для валидации спутниковых данных использовались данные с пяти метеостанций, расположенных в черте города. Очевидно, что температура воздуха, измеренная на расстоянии двух метров от подстилающей поверхности, может отличаться от данных LST, измеренных спутником, тем не менее естественным фактом здесь является присутствие значимой корреляции и различного рода зависимостей между исследуемыми выборками. Для всех метеостанций были извлечены архивные данные за период 2013–2019 гг., источником данных послужил сайт <https://rp5.ru>. Количество спутниковых измерений за каждый месяц на разных метеостанциях различно, но в целом присутствуют общие закономерности, а корреляция наземных данных и данных космического мониторинга составляет более 90 % во всех исследуемых случаях.

Возможность использования спутниковой информации для качественной оценки температурного поля, позволила построить и исследовать многолетние закономерности распределения температур в городе Новосибирске и ближайших его окрестностях, определить области существования устойчивых температурных аномалий, или «островов тепла». Определение локализации таких аномальных областей в черте города и пригородных территориях является важной задачей в решении вопроса эффективного управления городскими территориями, позволяет, например, оценить характер и масштабы воздействия промышленной зоны на прилегающие городские территории. На рис. 1, *а* приведен результат построения композитного изображения на территорию Новосибирска на основе серии тепловых снимков *Landsat-8* за бесснежный период (май – сентябрь 2013–2019 гг.). На следующем изображении (рис. 2, *б*) на полученную карту накладывается тематический слой, соответствующий промышленным зонам Новосибирска. На рис. 1, *в* приведенная карта дополнена векторным слоем с сетью автодорог и железнодорожных станций. Соответствующие изображения были получены и для снежного периода (ноябрь – март 2013–2019 гг.).

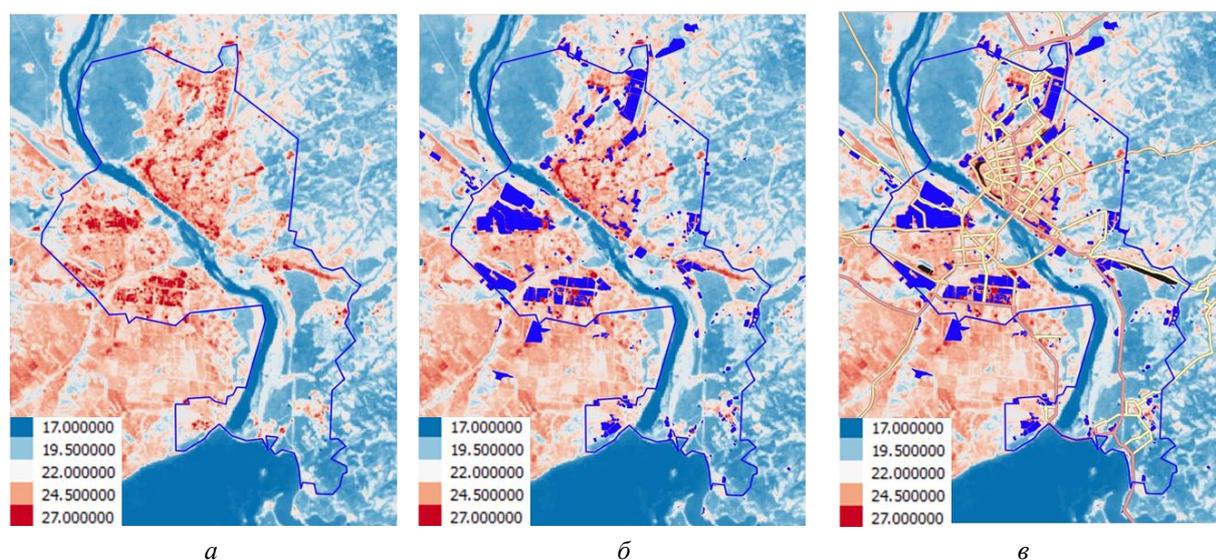


Рис. 1. Температурные карты Новосибирска: *а* – исходное композитное изображение; *б* – изображение, дополненное картой промышленных зон; *в* – изображение, дополненное картой промышленных зон и сетью авто- и железнодорожных дорог

Из рис. 1 видно, что большинство зон максимальных температур в пространстве хорошо привязаны к промышленным зонам и сети дорог, в дальнейшем планируется выполнить количественные оценки этой связи, что позволит оценить в динамике рост промышленных зон и других «островов тепла».

Также была изучена связь между распределением температурных данных на территории Новосибирска и типом подстилающей поверхности. Соответствующая гистограмма и интервал температур, отвечающий различным типам подстилающей поверхности, приведены на рис. 2.

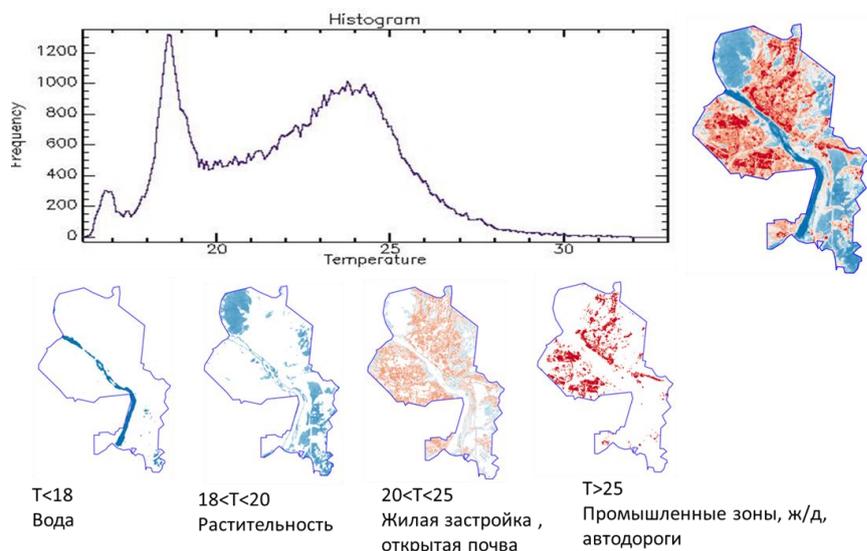


Рис. 2. Гистограмма средних многолетних температур (T) в Новосибирске и схематические изображения основных классов подстилающей поверхности

Эмпирическим путем, с наложением соответствующих тематических векторных слоев были выделены четыре основных класса (соответствующий интервал температур приведен на рис. 2): вода, растительность, жилая застройка и открытая почва, промышленные зоны, зоны ж/д и автодорог.

В ближайшее время планируется выполнить количественную оценку попадания в соответствующий класс, что позволит оценить перспективность использования температурных данных LST как дополнительного признака классификации для городской территории.

Таким образом, в работе показано, что использование современного аппарата для анализа серий температурных данных LST КА *Landsat-8* позволяет не только выявлять пространственно-временные закономерности в распределении температуры на территории города, но и может служить дополнительным признаком при выполнении процедуры классификации. А сами данные хорошо коррелируют с наземными измерениями и являются полноценным источником информации о состоянии подстилающей поверхности.

Список литературы

1. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга / А.А. Прошин, Е.А. Лупян, И.В. Балашов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.

2. Информационная система сбора, хранения и обработки спутниковых данных ИВТ СО РАН как инструмент для решения задач мониторинга природных и антропогенных объ-

ектов / Ю.И. Шокин, И.А. Пестунов, Д.Л. Чубаров [и др.] // Тр. Всерос. конф. «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов». SDM-2019. 2019. С. 229–241.

3. Baldina E.A., Grishchenko M.Y. Object oriented analysis of multi-temporal thermal infrared images // South-Eastern European J. of Earth Observation and Geomatics. 2014. Vol. 3, № 2S. P. 415–418. URL: <http://ejournals.lib.auth.gr/seejeog/issue/view/726>.

4. Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city / M.I. Varentsov, P.I. Konstantinov, T.E. Samsonov, I.A. Repina // Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2015. Vol. 11, № 4. P. 329–337.

5. Грищенко М.Ю., Варенцов М.И., Михайлюкова П.Г. Анализ острова тепла Москвы с использованием космических снимков разного пространственного разрешения и результатов климатического моделирования // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2019. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. С. 217–219.

6. Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H. Simultaneous assessment of the summer urban heat island in moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // Geography, Environment, Sustainability. 2019. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-10.

7. Грищенко М.Ю., Ермилова Ю.В. Картографирование застройки крупнейших городов российского Заполярья по космическим снимкам разных спектральных диапазонов // Геодезия и картография. 2018. Т. 79, № 3. С. 23–34

8. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э Поиск изменений температуры городской среды по спутниковым данным на примере города Красноярска // Тр. Всерос. конф. «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов». SDM-2019. 2019. С. 387–392.

9. Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Monitoring of land surface temperature in Krasnoyarsk and its Suburban area based on Landsat-8 satellite data // J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. Vol. 11 (8). P. 934–945.

10. Land surfacetemperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data / J.C. Jimenez-Munoz, J.A. Sobrino, D. Skokovic [et al.] // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2014. Vol. 11. P. 1840–1843.

11. Online global land surface temperature estimation from Landsat / D. Parastatidis, Z. Mitraka, N. Chrysoulakis, M. Abrams // Remote Sens. 2017. Vol. 9. P. 1208.

E.A. Mamash, I. A. Pestunov, D.L. Chubarov

FRC ICT, Novosibirsk, Russia

e-mail: elenamamash@gmail.com; pestunov@ict.sbras.ru; dmitri.chubarov@gmail.com

SPATIOTEMPORAL ANALYSIS OF THE LAND SURFACE TEMPERATURE DISTRIBUTION OVER THE TERRITORY OF NOVOSIBIRSK CITY BASED ON LANDSAT DATA

The paper discusses the applicability of Landsat 8 data for analyzing the land surface temperature distribution over the territory of Novosibirsk. The satellite data is compared with the data from ground meteorological stations. Using cloud-based systems and methods for processing time series of satellite data, a composite image of the temperature field for the territory of Novosibirsk is built; trends and anomalies in the temperature distribution in the urban area are studied. The results could be applied in urban development analysis and management of the city territory.

Keywords: remote sensing, land surface temperature, urban heat islands, temperature maps of Novosibirsk.

В.Г. Маргарян¹, Г.М. Цибульский², К.В. Раевич³

¹Кандидат географических наук, доцент,

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²Доктор технических наук, профессор, ³Кандидат технических наук, доцент

Институт космических и информационных технологий,

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: vmargaryan@ysu.am; GTsybulsky@sfu-kras.ru; KShatrova@sfu-kras.ru

**ОЦЕНКА ВНУТРИГОДОВОГО РЕЖИМА СКОРОСТИ ВЕТРА
СЮНИКСКОГО МАРЗА РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ**

На основе более 50-летних (1966–2018 гг.) фактических данных шести метеорологических станций обсуждены некоторые вопросы, связанные с внутригодовым режимом скорости ветра Сюникского марза Республики Армения. Выявлено, что разнообразие внутригодового режима скорости ветра обусловлено пересеченностью местности. На некоторых метеорологических станциях в течение года наблюдаются два максимальных и два минимальных значения скорости ветра, на некоторых из них – неясный годовой ход скорости ветра. Средняя годовая скорость ветра на исследуемой территории колеблется в пределах от 1,1 до 7,7 м/с.

Ключевые слова: Армения, Сюникский марз, внутригодовой режим, скорость ветра, изменение климата.

Характеристики режима скорости ветра необходимы при разработке ветроэнергетических кадастров территорий, при корректировке строительных нормативов, для обеспечения безопасности полёта воздушных судов, для проектирования и строительства различных инженерных сооружений. Целью данного исследования является анализ и оценка закономерности внутригодового режима скорости ветра. В качестве исходных данных в работе использованы материалы многолетних наблюдений за характеристикой скорости ветра за период 1966–2018 гг. (данные «Центра гидрометеорологии и мониторинга» ГНКО Министерства окружающей среды Республики Армения). Данные о скорости ветра в Армении приведены в ряде климатических справочников [2; 5]. Применялись методы математической статистики. Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакетов Statistica и Excel.

Исследованию стандартных климатических характеристик на территории Армении, таких как скорость ветра за год и отдельные месяцы, посвящены несколько научных работ [1; 3–5].

На изучаемой территории внутригодовой режим скорости ветра отличается разнообразностью, связанной с высотой местности, формой рельефа, экспозицией склонов, временем года и дня, характером подстилающей поверхности, формой долины, общециркуляционными синоптическими процессами, антропогенными факторами и т.д. Средняя годовая скорость ветра на исследуемой территории колеблется от 1,1 до 7,7 м/с (табл. 1). Из шести метеорологических станций наибольшие средние скорости ветра наблюдаются на Сисианском перевале (2 340 м), особенно летом. Наименьшие средние скорости ветра наблюдаются в Мегри (627 м), особенно осенью и зимой. Это обусловлено тем, что он расположен между южными склонами горных хребтов Мегри и Зангезур, в глубоком ущелье реки Мегри на 627 м высоте.

На некоторых метеорологических станциях (Сисианский перевал, Сисиан, Каджаран и Мегри) в течение года наблюдаются два максимальных и два минимальных значения скорости ветра (рис. 1, *a, б, д, e*) в Сисиане и Мегри первый минимум наблюдается в мае, второй минимум (который является главным) – в октябре – ноябре, а максимум наблюдается соответственно в марте и августе. Период регистрации минимума на Сисианском перевале совпадает, а максимум наблюдается в декабре – январе и августе. В Каджаране минимум наблюдается в феврале и ноябре, а максимум – декабре – январе и июле. Годовой ход скорости ветра в Горисе и Капане не ясен (рис. 1, *в, з*). В Горисе наблюдается рост средней скорости ветра с октября по январь, а потом уменьшается; в Капане – рост средней скорости ветра с января по апрель, а затем понижение.

Получены довольно тесные корреляционные связи не только между значениями соседних месяцев, но и между январем и остальными месяцами, а также между годовыми значениями.

В качестве примера на рис. 2 представлены корреляционные связи между значениями средних скоростей ветра в январе и феврале (рис. 2, *a*), между январем и годовыми значениями (рис. 2, *б*). На основе этой связи можно проанализировать режим скорости ветра не изученных и малоизученных районов обсуждаемой территории, а также спрогнозировать его.

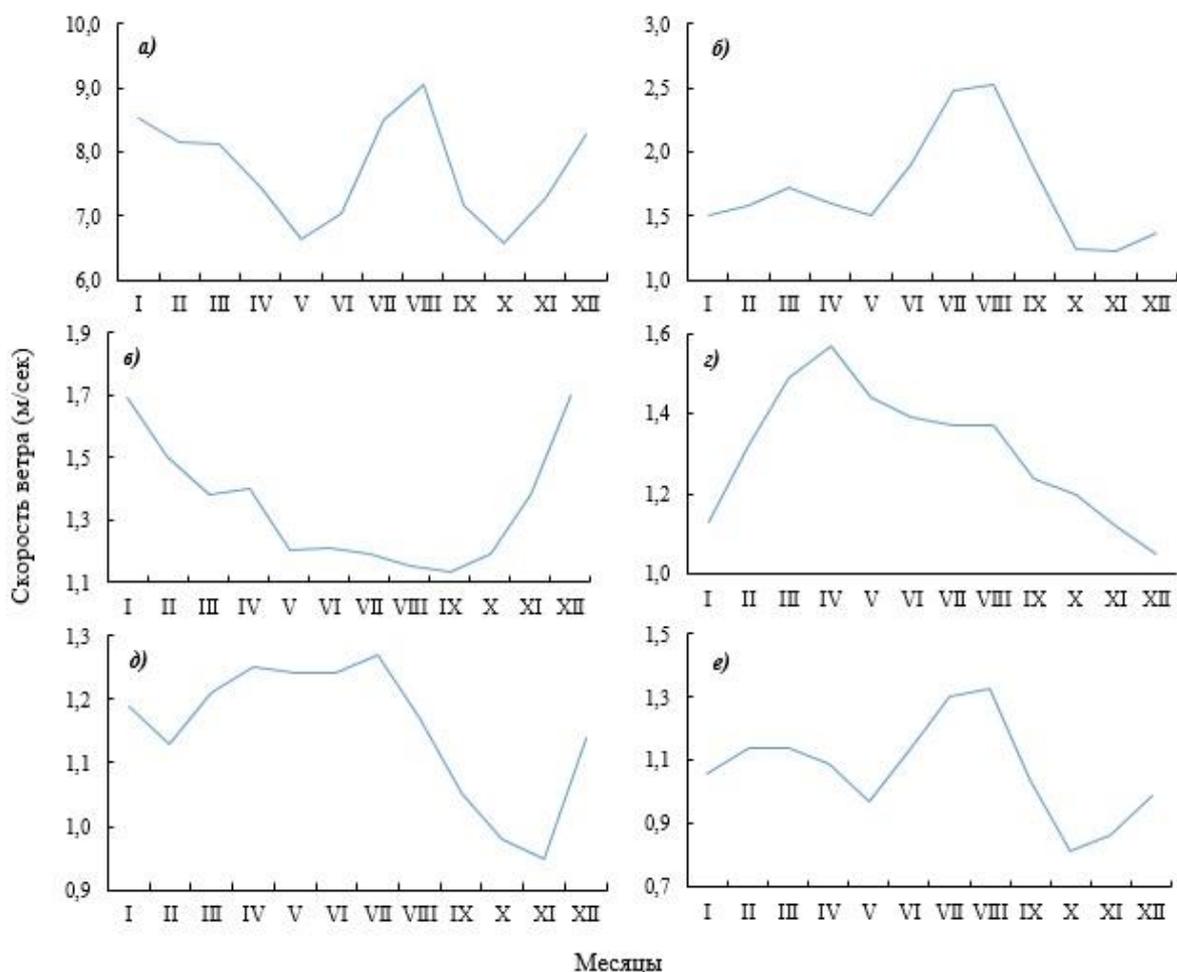


Рис. 1. Годовой ход скорости ветра, м/с, в марзе Сюник:
a – Сисианский перевал; *б* – Сисиан; *в* – Горис; *з* – Капан; *д* – Каджаран; *e* – Мегри

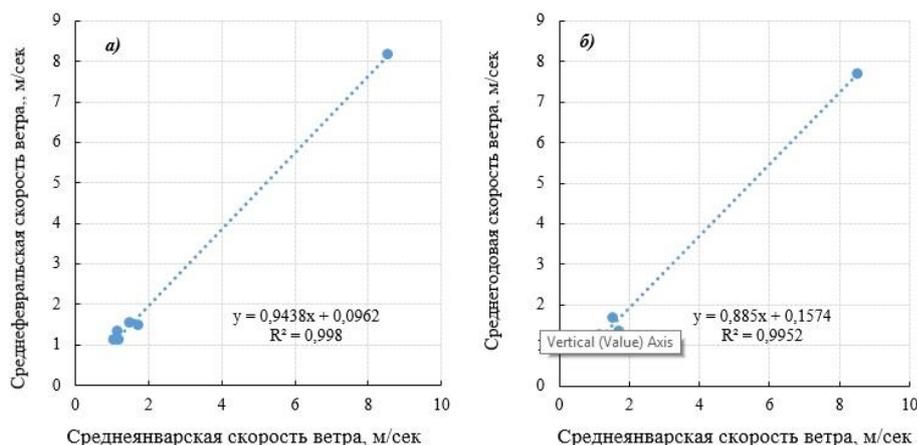


Рис. 2. Корреляционная связь между величинами среднеянварской и среднефевральской (а), между величинами среднеянварской и среднегодовой скорости ветра (б)

Таблица

Среднемесячная и годовая скорость, м/с, ветра
в марзе Сюник за период 1966–2018 гг.

Метеорологические станции	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Сисианский перевал	8,52	8,15	8,11	7,45	6,63	7,05	8,49	9,05	7,16	6,58	7,29	8,28	7,71
Сисиан	1,50	1,58	1,72	1,59	1,50	1,91	2,48	2,53	1,88	1,24	1,22	1,37	1,71
Горис	1,69	1,50	1,38	1,40	1,20	1,21	1,19	1,15	1,13	1,19	1,38	1,70	1,35
Капан	1,13	1,32	1,49	1,57	1,44	1,39	1,37	1,37	1,24	1,20	1,12	1,05	1,29
Каджаран	1,19	1,13	1,21	1,25	1,24	1,24	1,27	1,17	1,05	0,98	0,95	1,14	1,16
Мегри	1,06	1,14	1,14	1,09	0,97	1,13	1,30	1,33	1,04	0,81	0,86	0,99	1,08

В результате исследований пришли к следующим выводам:

- из-за пересеченности местности и сложной орографии изучаемая территория отличается разнообразными закономерностями годового хода скорости ветра. На некоторых метеостанциях в течение года наблюдаются два максимальных и два минимальных значения скорости ветра, а на некоторых из них – неясный годовой ход скорости ветра;
- средняя годовая скорость ветра составляет от 1,1 (Мегри) до 7,7 м/с (Сисианский перевал);
- как между значениями соседних месяцев, так и даже между январем и всеми остальными месяцами, а также и годовыми значениями скорости ветра получены тесные корреляционные связи, которые можно использовать для изучения режима скорости ветра не изученных и мало изученных районов обсуждаемой территории, а также для их прогнозирования.

Список литературы

1. Багдасарян А.Б. Климат Армянской ССР. Ереван: Изд-во АН АрмССР. 1958. 146 с.
2. Климатический справочник. Ч. III. Атмосферное давление и Ветер. Ереван. 2013. 160 с. (на армянском языке).
3. Нерсесян А.Г. Климат Армении. Ереван. 1964. С. 304.
4. Маргарян В.Г. Особенности режима климатических характеристик скорости ветра на территории Сюникского марза // Вестн. ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2020. № 2. С. 46–54. DOI: 10.17308/geo.2020.2/2885.
5. Справочник по климату СССР. Вып. 16. Ч. III. Ветер. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 168 с.

V.G. Margaryan¹, G.M. Tsibul'skii², K.V. Raevich²

¹Yerevan State University, Armenia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: vmargaryan@ysu.am; GTsybul'sky@sfu-kras.ru; KShatrova@sfu-kras.ru

THE ASSESSMENT OF INTRA-ANNUAL REGIME OF WIND SPEED OF SYUNIK MARZ OF THE REPUBLIC OF ARMENIA

On the basis of more than 50-year factual data (1966–2018) of 6 meteorological stations, some issues related to the intra-annual wind speed regime in the Syunik marz of the Republic of Armenia were discussed. It was revealed that the diversity of the intra-annual wind speed regime is due to the roughness of the terrain. At some meteorological stations, two maximum and two minimum values of wind speed are observed during the year, and some of them have an unclear annual variation of wind speed. The average annual wind speed in the study area are ranges from 1.1 to 7.7 m/s.

Keywords: Armenia, Syunik marz, inter-annual regime, wind speed, climate change.

УДК 528.852.8:528.8.044.1

Л.С. Миков¹, С.Е. Попов²

¹Младший научный сотрудник

²Кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемерово, Россия

e-mail: mikov@ict.sbras.ru; popov@ict.sbras.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА РАЗРЕЗЕ «КИЙЗАССКИЙ» ПО ДАННЫМ SENTINEL-1

Рассмотрены вопросы оценки состояния и изменения земной поверхности на территории разреза «Кийзасский» (Кемеровская область) в результате оползня, произошедшего в июне 2019 г. Продемонстрировано применение многопроходной серии спутниковых радарных данных *Sentinel-1* с использованием метода интерферометрии малых базовых линий (SBaS) для определения динамики смещений земной поверхности с помощью построенных карт вертикальных смещений.

Ключевые слова: радарные данные, разрез Кийзасский, метод малых базовых линий, Sentinel-1, смещения земной поверхности.

В настоящее время Кузбасс является одним из крупнейших горнопромышленных регионов в России. Высокая техногенная нагрузка, связанная с ежегодным увеличением объемов угледобычи, ведет к перераспределению напряженно-деформируемого состояния значительных объемов горной массы с неблагоприятными последствиями для окружающей природной среды [1]. Деформации земной поверхности в подобных регионах, возникающие вследствие неравномерных оседаний и горизонтальных сдвижений горных пород, достигают больших по протяженности территорий и являются источником аварийных ситуаций, которые, в свою очередь,

могут нанести вред не только окружающей среде и режиму работы предприятия, но также и человеческим жизням. Так, например, в июне 2019 г. на одном из отвалов разреза «Кийзасский» произошел оползень. В результате были повреждены опоры девяти ЛЭП и перекрыто русло реки Большой Кийзас на 750 м в длину и около 5 м в высоту [2] (рис. 1).



Рис. 1. Фото отвала разреза «Кийзасский» до оползня (слева) и после оползня (справа) [3]

Сегодня для определения деформаций земной поверхности активно используются спутниковые радиолокационные данные. Преимущество их заключается в относительно небольшой цене за квадратный километр, а также независимость съемки от погодных условий и времени суток. Для обработки таких данных были разработаны три основных метода:

- дифференциальная интерферометрия (DinSAR). Используются для обработки двух изображений;
- метод постоянных отражателей (PS). Используется для точечной оценки деформаций на основе многопроходной серии изображений;
- метод постоянных отражателей (PS). Используется для точечной оценки деформаций на основе многопроходной серии изображений;
- метод постоянных отражателей (PS). Используется для точечной оценки деформаций на основе многопроходной серии изображений;
- метод малых базовых линий (SBaS). Используется для площадной оценки деформаций на основе многопроходной серии изображений.

В нашей работе мы использовали последний метод, так как он позволяет выявить динамику площадных деформаций земной поверхности за длительный период времени.

В качестве объекта исследования была выбрана северная часть отвала разреза «Кийзасский», на территории которой произошел оползень. Для расчетов было отобрано 11 радиолокационных изображений с космического аппарата *Sentinel-1B* за период с 12 апреля 2019 г. по 29 июля 2019 г. с периодичностью съемки 12 дней. Вся обработка проводилась в программном комплексе SARscape. Для более точной корегистрации радарных изображений использовалась цифровая модель рельефа SRTM.

В ходе обработки исходных изображений методом SBaS была построена карта средних скоростей изменения вертикальных смещений земной поверхности (рис. 2). Данная карта представляет собой векторный файл с 4 909 точками. Каждая точка содержит набор атрибутов, например, географические координаты, значение средней скорости смещения и т.п. Синим цветом выделены точки с отрицательными вертикальными смещениями, означающие просадки земной поверхности, красным – поднятия земной поверхности.

На карте цифрой 2 обозначен отвал разреза Кийзасский, цифрой 1 – участок, заполненный горными породами, образовавшийся после оползня. Как видно из рис. 2, между участками 1 и 2 регистрируется провал, означающий сход горных пород с борта отвала. На участке 1 регистрируются положительные вертикальные смещения, связанные с увеличением высоты поверхности из-за схода горных пород с борта и дальнейшим их столкновением со склоном холма (рис. 1).

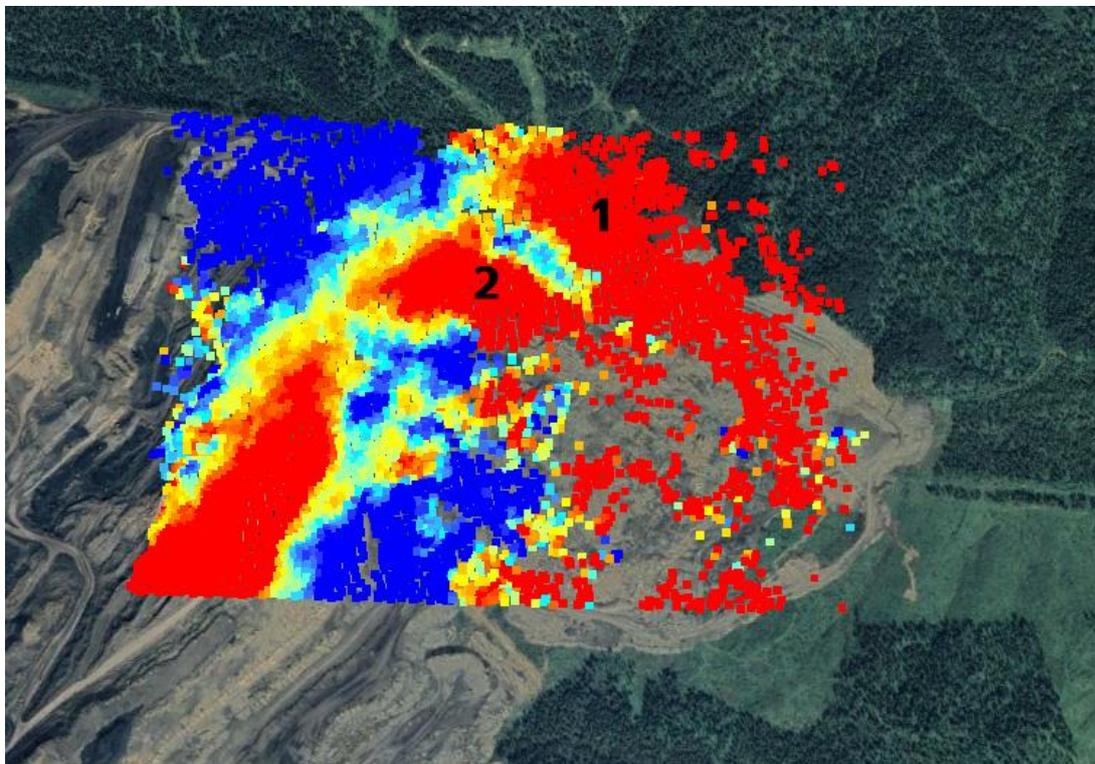


Рис. 2. Карта средних скоростей вертикальных смещений

Отдельно стоит отметить, что средние скорости смещений за период с 30 мая 2019 г. по 11 июня 2019 г. (оползень произошел ночью 7 июня) увеличились в три раза. Значения средних скоростей смещений за период наблюдения составили от -170 мм/год до $+200$ мм/год.

Таким образом, использование радарных данных с космического аппарата *Sentinel-1* целесообразно для задач мониторинга оползневых явлений, особенно в районах с интенсивными горными работами. Полученные результаты могут стать основой для разработки систем мониторинга и мероприятий по предупреждению оползней.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-47-420002 p_a.

Список литературы

1. Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дис. ... канд. техн. наук. Пермь. 2012. 146 с.
2. Стали известны причины ЧП на разрезе «Кийзасский» в Кузбассе. 2019. URL: https://gazeta.a42.ru/lenta/news/57608_stali-izvestny-prichiny-chp-na-razreze-kiizasskii-v-kuzbasse (дата обращения: 20.01.2020).

3. Оползень на разрезе Кийзасский снес шесть опор ЛЭП, завалил лес и реку Кийзас. 2019. URL: <http://kuzpress.ru/incident/09-06-2019/68082.html> (дата обращения: 20.01.2020).

L.S. Mikov, S.E. Popov

ICT SB RAS, Kemerovo, Russia

e-mail: mikov@ict.sbras.ru; popov@ict.sbras.ru

DETERMINATION OF THE EARTH'S SURFACE DEFORMATIONS IN THE "KIYZASSKY" OPEN PIT ACCORDING TO SENTINEL-1 DATA

The paper deals with the issues of assessment of the condition and changes in the land surface on the territory of the Kiiizassky open pit (Kemerovo Region) because of the landslide that occurred in June 2019. The application of the multi-pass series of *Sentinel-1* satellite radar data using the Small Baseline Subset (SBaS) method to determine the Earth surface displacement dynamics using constructed vertical displacement maps is demonstrated.

Keywords: radar data, Kiiizassky open pit, Small Baseline Subset, Sentinel-1, earth's surface deformations.

УДК 528.8

И.Д. Мухамеджанов, А.М. Константинова, Е.А. Лупян

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

e-mail: ildarmsu@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПРИ МОНИТОРИНГЕ РЕК БАССЕЙНА АМУДАРЬИ

Рассмотрены организация спутникового мониторинга водных объектов Центральной Азии на примере реки Амударья в специализированной системе спутникового мониторинга EcoSatMS (<http://suvo.geosmis.ru>). Освещены потенциал и перспективы использования новой технологии «космических гидропостов» для оценки состояния водных объектов, а также восстановления значений суточных стоков в точке, удаленной от физического гидропоста на некоторое расстояние. Оценка эффективности внедрения КГП в схему автоматизированных расчетов позволяет принять проведенные исследования за основу для дальнейшего развития отдельных инструментов анализа рядов спутниковых наблюдений и сервиса EcoSatMS в целом.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, водные ресурсы, космические гидропосты, Амударья, MNDWI, водное зеркало, EcoSatMS.

Введение. Для водных ресурсов центральноазиатского региона характерно наличие трансграничных рек. Амударья, самая полноводная река региона, одновременно является и основой водного потенциала южной части региона. Трансграничные воды Амударьи играют важную роль в ирригации и сельском хозяйстве, в частности для Узбекистана. В такой ситуации спутниковые данные помогают объектив-

но и своевременно оценить состояние отдельных участков русла рек и водных объектов иного происхождения (озер, водохранилищ, хаузов). Современные системы ДЗЗ позволяют организовать получение рядов наблюдений природных и антропогенных объектов с частотой в несколько дней. Для решения задач комплексного спутникового мониторинга водных объектов Узбекистана и Центральной Азии в целом в Институте космических исследований РАН была создана отдельная система спутникового мониторинга, получившая название EcoSatMS – Ecosystem Satellite Monitoring service (<http://suvo.geosmis.ru>).

Система EcoSatMS функционирует с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [1]. Сервис является частью семейства «Созвездие-Вега» (<http://sozvezdie-vega.ru>), развивается и поддерживается специалистами ИКИ РАН. Картографический интерфейс сервиса адаптирован для территории Узбекистана и граничащих с ним стран, интегрированы базовые картографические слои границ административных районов, дорожных сетей, водных объектов, населенных пунктов, границ водосборов рек Центральной Азии [2]. Долговременные архивы данных глубиной более 30 лет позволяют формировать широкие ряды спутниковых наблюдений, а также организовать онлайн доступ к оперативно пополняющимся каталогам спутниковых сцен и рассчитываемым продуктам.

Обработка данных. Принципиально новым инструментом в системе анализа водных ресурсов является «Наблюдение за объектами», реализующий технологию «космических гидропостов» (КГП). КГП представляет собой полигон произвольной формы, который пользователь сохраняет в базу данных в интерактивном режиме (рис. 1). При этом предоставляется возможность выбрать временное окно для анализа спутниковых сцен в архиве, либо постоянное наблюдение за объектом.

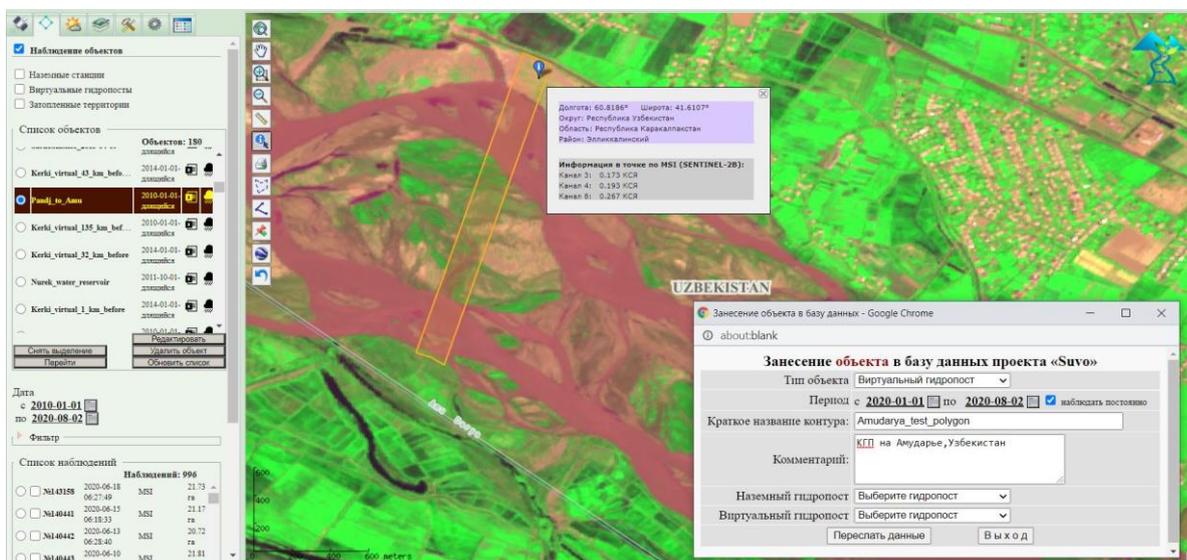


Рис. 1. Занесение космического гидропоста в проекте EcoSatMS

Сбор статистики в автоматическом режиме занимает несколько минут. Целевым показателем при расчёте наблюдений является площадь водного зеркала, вычисляемая на основе модифицированного разностного водного индекса MNDWI (modified normalized water index) по снимкам спутниковых систем OLI, TIRS (*Landsat-8*), MSI (*Sentinel-2A, -2B*), TM (*Landsat-4, -5*) и ETM+ (*Landsat-7*). Значения пикселей больше нуля образуют водную поверхность. Очевидно, что преимуществами такого подхода при оценке состояния водных объектов являются низкое потребление

ние ресурсов, независимость от географического расположения, оперативность, масштабируемость. Наблюдения, полученные за определенный период, могут в дальнейшем быть обработаны с помощью инструмента совместного анализа временных рядов.

Применение методики космических гидропостов. Установка наземных станций в требуемых местах для оценки обводненности реки часто бывает невозможной в силу морфологии рельефа или политических границ. В отличие от дорогостоящего физического объекта виртуальный полигон не требует материальных затрат и сводится к работе операторе в сервисе. Одним из ключевых показателей при оценке гидрологической обстановки на реке являются суточные стоки. Для того чтобы использовать КГП с целью оценки расхода воды в единицу времени, необходимо выявить взаимосвязь наземного показателя и наблюдений на КГП. Ряд экспериментов, проведенных с этой целью, позволил установить линейную зависимость площади водного от суточных стоков на гидропосту Керки (Туркменистан). Результаты анализа данных на физической станции Керки за 2018 г. и КГП, отстоящего в 1 км от станции, приведены на рис. 2 (расчеты произведены в инструменте онлайн-анализа временных рядов сервиса EcoSatMS). На данном этапе были рассчитаны также:

- $R = 0,957$ – коэффициент корреляции Пирсона;
- $R = 0,916$ – коэффициент детерминации модели;
- $MSE = 0,006$ – величина средней квадратической ошибки модели.

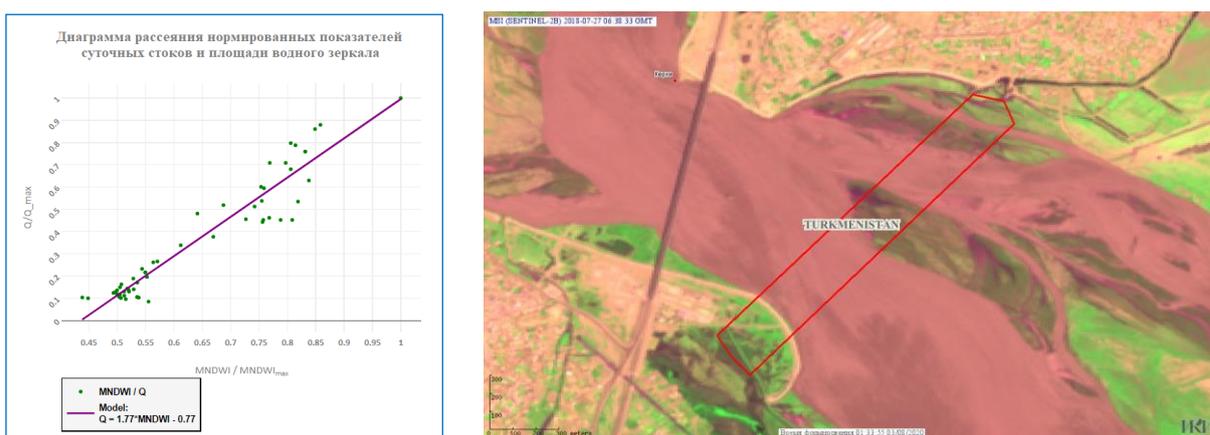


Рис. 2. График зависимости величины суточного стока и площади водного зеркала на КГП около Керки и расположение полигона

Наряду с наличием линейной зависимости исследованию подлежит вопрос том, насколько случайной может быть такая корреляция с точки зрения выбора КГП и можно ли путем последовательной связи КГП друг с другом, используя линейную зависимость, сохранить корреляцию, отдаляясь от станции. Для этого при заведении нового объекта в системе EcoSatMS была предусмотрена возможность связи КГП либо с физической станцией, либо с другим КГП. Такая цепь взаимосвязанных гидропостов получила название виртуальной сети КГП. В силу наличия корреляции между стоком и площадь водного зеркала для калибровки в данной работе выбрана линейная модель.

Калибровка сети КГП. Обозначим параметр суточного стока за Q , площадь водного зеркала за S . Тогда для того чтобы организовать цепь по нижеследующей схеме, необходимо на каждом шаге сохранить коэффициенты a и b линейного уравнения

$$Q = a \cdot S + b.$$

Ближайший КГП связывается с физической станцией:

$$Q_0 \sim Q1 = a_1 \cdot S_1 + b_1.$$

...

N+1. На (N + 1)-м шаге необходима связь типа КГП – КГП:

$$S_n = a_{n+1} * S_{n+1} + b_{n+1}$$

$$Q_n = a_n * S_n + b_n \sim Q_{n+1} = (a_n a_{n+1}) * S_{n+1} + (a_n b_{n+1} + b_n)$$

Восстанавливаем значения Q_0 через Q_{n+1} методом линейной регрессии:

$$Q_{n+1} \sim c_{n+1} Q_0 + d_{n+1}$$

Кроме того, на каждом шаге построения производится расчёт следующих параметров:

- S , га – площадь гидропоста;
- $R(Q_{ист}, Q_{восст})$ – коэффициент корреляции рядов истинных и восстановленных значений суточных стоков;
- $R(Q_{ист}, MNDWI)$ – коэффициент корреляции рядов площади водного зеркала с истинными стоками (критерий отбора наилучшего КГП на 1 шаге);
- $F(Q_{ист}, Q_{восст})$ – отношение дисперсий истинного и восстановленных рядов суточных стоков (тест Фишера). Принимается за критерий отбора КГП на (N + 1)-м шаге;
- $MSE(Q_{ист}, MNDWI)$ – величина средней квадратической ошибки для ряда нормированных значений истинных суточных стоков и площади водного зеркала на текущем КГП.

На каждом шаге также строится диаграмма, показанная на рис. 3. КГП установлен в 6 км от физической станции и откалиброван по ближайшему к Керки КГП.



Рис. 3. График восстановленных и истинных значений на КГП в 6 км от Керки (второй шаг построения сети Керки → 1 км → 6 км)

Результаты. Детальный анализ влияния формы, площади и ориентации полигонов, а также морфологии рельефа позволил построить качественную сеть из 12 КГП, которая дает возможность сохранить корреляцию восстановленных и выше 0,85 на расстоянии более 25 км от физической станции. Кроме того, в ходе исследования было установлено, что максимально расстояние, на котором калибровка, предлагаемая в работе, может сохранить корреляцию восстановленных и ис-

тинных значений суточного стока, зависит от изменчивости структуры русла и системы орошения на протяжении всего участка реки. В данном случае на расстоянии выше 22 км по течению от Керки из основного русла берет истоки канал, в результате поверхностный речной сток количественно будет отличаться от полученного на станции.

В результате анализа формы и расчета статистик для более чем 60 гидропостов были сформированы правила установки гидропостов для объединения в сеть:

- Необходимо избегать попадания в КГП зон, образованных многолетним размывом берегов между рукавами в период межени.
- В полигон не должны попадать заливные поля в граничной зоне.
- Зоны с устойчивым снежным покрытием следует исключить из КГП (снег и речной лёд учитываются при расчете водного зеркала по индексу MNDWI), поскольку они увеличивают площадь водного зеркала.
- Углубления в пойме или речной террасе реки, в результате которых появляется стоячая вода, вносят шумы при вычислении площади водного зеркала.
- Ориентация секущей части КГП должна быть по возможности перпендикулярна векторам частичных стоков [4].

Временные ряды стоков 2014 и 2016 гг. были выбраны для проверки качества сети КГП, построенной на данных 2018 г. Разница водного режима и обводненности в разные сезоны говорит о том, что модель должна быть более устойчивой в межгодовом аспекте и учитывать большее число факторов.

Заключение. Разработанная методика на текущем этапе помогает сформировать сеть КГП в разных точках для гидропостов Амударьи. Увеличение числа тестовых данных и расширений ряда наблюдений при калибровке поможет повысить точность нахождения коэффициентов линейной регрессии, что сделает текущую модель более устойчивой. Для повышения точности и устойчивости методики в межгодовом аспекте необходимо опробовать более сложные нелинейные модели, а также включение большего числа параметров. Полученные результаты являются основой для внедрения сетей КГП как сущности в сервисе EcoSatMS и автоматизации процесса формирования таких сетей.

Работа выполнена с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [1] при поддержке проекта РФФИ № 19-37-90114.

Список литературы

1. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
2. Подходы к построению системы дистанционного мониторинга реки Амударьи и ее притоков / И.Д. Мухамеджанов, А.М. Константинова, Е.А. Лупян, А.А. Гафуров // Материалы 17-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 ноября 2019 г. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 111. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
3. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географич. вестн. 2017. № 1 (40). С. 130–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137
4. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 448 с.

I.D. Mukhamedjanov, A.M. Konstantinova, E.A. Loupian

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

e-mail: ildarmsu@gmail.com

THE USE OF SATELLITE DATA FOR MONITORING RIVERS IN THE AMU DARYA BASIN

The paper explores the organization of satellite monitoring of water bodies in Central Asia on the example of the Amu Darya river in a specialized satellite monitoring system EcoSatMS (<http://suvo.geosmis.ru>). The potential and prospects of using the new technology of virtual gauging stations to control the state of water bodies, as well as restoring the values of daily runoff at a point remote from the ground station for some distance are highlighted. Evaluation of the effectiveness of the implementation of the virtual gauging stations technique in flow of automated calculations allows to take the research as a basis for further development of individual tools for analyzing satellite observation time series and the EcoSatMS in general.

Keywords: satellite monitoring, water resources, virtual gauging stations, Amu Darya, MNDWI, water surface area, СКР "IKI-Monitoring", EcoSatMS.

УДК 537.86

В.Г. Подопригора^{1,3}, А.В. Сорокин², Д.С. Макаров², Д.В. Харламов²

¹Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ СО РАН, Красноярск, Россия

²ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: ikivt@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ ДРЕВОСТОЯ

Исследованы рассеяние и ослабление сигналов навигационных спутников, взаимодействующих с разными слоями лесного массива: слоем стволов и слоем крон, состоящем из ветвей, листьев или хвои. Рассмотрено влияние границ раздела «подстилка – стволы» и «кроны – воздух» на характеристики рассеяния радиосигналов.

Ключевые слова: навигационные спутники, L-диапазон радиочастот, слои крон и стволов, рассеяние, ослабление сигналов, границы раздела, неровности.

Введение. В последние годы с целью дистанционного зондирования земных покровов успешно применяются радиоволновые измерения, эффективно использующие возможности глобальной навигационной спутниковой системы. Для извлечения информации о микро- и макропараметрах лесных насаждений из обработанных после прохождения через древостой спутниковых сигналов необходимо использовать модель механизма взаимодействия электромагнитного поля с элементами деревьев. Известно, что в настоящее время не существует универсального механизма, учитывающего: мультимасштабность лесной среды, разные диапазоны радиочастот, конфигурацию проводимого эксперимента, пространственное распреде-

ление деревьев, ориентацию ветвей, влажность древесины, диэлектрические свойства древесины, коры, листьев и хвои. Этим объясняется большое количество работ, в той или иной степени объясняющих особенности прохождения радиосигнала в лесу, но выполненных на различных объектах в разных условиях [1–2]. Однако взаимодействие радиоизлучения с древостоем рассматривается в основном для радарных измерений на очень малых и очень больших частотах и без учета влияния на параметры ориентаций элементов дерева, анизотропии и границ раздела разных сред.

Особенность используемого нами спутникового излучения заключается в том, что длина волны в L -диапазоне радиочастот (1,5–1,6 Гц, $\lambda \approx 20$ см) много больше поперечных размеров игл и листьев, но сравнима с диаметрами стволов и толстых ветвей дерева. В этом диапазоне частот выявляются особенности внутренней структуры деревьев, что дает возможность распознавать их виды и типы крон древостоя с помощью дистанционного зондирования. На этих частотах наблюдается также максимальный коэффициент эффективной площади рассеяния для хвойных деревьев.

Целью настоящей работы является исследование параметров рассеяния сигналов навигационных спутников L -диапазона от выделенных слоев стволов и крон деревьев с учетом влияния на эти параметры ориентации элементов дерева и границы «почва – слои стволов и крон».

Характеристики рассеяния и ослабления исследовались при рассеянии вперед радиосигналов навигационных спутников GLONASS и GPS на частоте 1,5–1,6 ГГц. Описание измерительной аппаратуры и схемы экспериментального исследования приведены ранее [3].

Модель взаимодействия сигналов НС со слоями древостоя. Элементы деревьев представлялись в виде дискретных рассеивателей, что, в отличие от модели сплошной среды, позволяет детектировать пространственные неоднородности (флуктуации плотности) в древостое. Модельное описание процессов взаимодействия сигналов НС в лесу предполагает выделение областей с определенным отношением размеров элементов дерева к длине волны падающего излучения, что позволяет корректно использовать соответствующее приближение. Поскольку механизмы рассеяния и ослабления радиоволн в верхней и нижней частях дерева значительно отличаются, естественным было выделение в качестве указанных выше областей слоя стволов и слоя крон, состоящих из ветвей и игл (листьев).

Каждый слой древостоя отличается от другого плотностью, формой, размером элементов дерева и их ориентацией в пространстве. Стволы рассматриваются как бесконечные диэлектрические цилиндры, большие ветви – как цилиндры конечной длины, иглы – сильно вытянутые эллипсоиды. Для описания малых рассеивателей использовалось обобщенное приближение Рэлея – Ганса – Дебая (РГД) для эллипсоидов, требующее выполнения соотношения $k_0 d(n-1) \ll 1$, где $k_0 = 2\pi / \lambda$ – волновое число в свободном пространстве; d – наименьший размер эллипсоида; n – индекс рефракции. Рассеивающая среда более прозрачна для волн по меньшей мере в направлении одной из осей эллипсоида.

Рассеяние на стволах и толстых ветвях деревьев отвечает приближению геометрической оптики для бесконечных и конечных цилиндров [4] с ограничениями последних по размерам: $h \gg r$, $k_0 h \gg 1$, где h и r – высота и радиус цилиндра. При этом допускалось, что внутреннее поле конечного рассеивателя может рассматриваться как поле внутри бесконечного цилиндра. Это приближение при решении дифракционной задачи на стволе дерева выполняется уже при $h / r > 5$ [4].

Немаловажную роль в процессе прохождения радиоволны в лесу играет ориентация рассеивателей относительно падающего и рассеянного лучей. Она может быть учтена в рамках ярусного подхода [5], при котором положение ветвей крон в пространстве описывается тензором ориентационной упорядоченности, а компоненты тензора сечения рассеяния пропорциональны квадрату анизотропии и компонент этого тензора. Здесь ярусы выполняют роль субслоев кроны, в каждом из которых наблюдается равномерное распределение толстых ветвей по азимутальному углу, а угол их наклона к вертикали меняется с синусоидальной функцией распределения от 30 до 120° – от верхних до нижних ярусов. Отдельный слой и ярус кроны состоит из групп рассеивателей, каждая из которых характеризуется определенными размерами и ориентацией тонких веток со своей функцией распределения.

Влияние границ раздела. При достаточно высоких частотах (больше 1 ГГц) в модельное описание процессов рассеяния и ослабления радиоволн в лесу можно включать неровности разного масштаба границ раздела, таких, как «почва – стволы», «кроны – воздух», «кора деревьев – воздух». Эти неровности могут влиять на характеристики рассеяния при рассмотрении выражений, отвечающих за взаимодействие волн с указанными границами. Форма отражающей поверхности этих границ всегда нерегулярна, а высота точек поверхности $h(x, y)$ описывается случайной функцией координат (статистически шероховатая поверхность). Обычно считают, что распределение высот h подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием $\langle h(x, y) \rangle = 0$ и дисперсией δ_h^2 . Пространственная корреляционная функция $L_h = \langle h(x_1, y_1) \cdot h(x_2, y_2) \rangle$ принимается изотропной, для нее часто используют гауссову кривую.

Поверхность считается мелкошероховатой, если высота $h(x, y) / \lambda$ и ее частные производные по координатам x и y много меньше единицы. В ряде случаев к таким поверхностям можно отнести границу «почва – слой стволов». Для матрицы рассеяния можно применять известную модель Киргофа (с ограничением $h / \lambda < 0,3$).

Крупномасштабные неровности (например, граница «воздух – кроны» для L -частоты) характеризуются радиусами кривизны $R_{x,y} \gg \lambda$, при этом ограничение на их высоты не накладывается. Для больших неровностей $\delta_h / \lambda = h / \lambda \gg 1$, дисперсии $h^2 \leq \lambda^2$ или $h^2 \geq \lambda^2$. С этими допущениями характеристики рассеяния могут быть рассчитаны.

Исследование показывает, что если при определении компонент матрицы рассеяния учитывать взаимодействия волн с элементами крон, стволов и поверхностью почвы, то неровности почвы могут существенно изменить угловые зависимости этих компонент. Так, моделирование зависимости удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) от угла падения с учетом взаимодействия волн с почвой и слоями древостоя показывает одинаковые значения δ_0 для гладкой и шероховатой поверхности в интервале углов падения θ 5–7°. В области $\theta = 30$ –40° разница значений УЭПР достигает почти 9 Дб, вклады в рассеяние от взаимодействия с почвой выше для неровной поверхности, чем для плоской, и сильно зависят от размеров шероховатостей и поляризации падающего излучения.

Таким образом, рассмотрена модель древостоя в виде слоев стволов и крон. При вычислении рассеяния в слоях крон выделяются группы мелких (хвоя, мелкие веточки) и крупных (толстые ветви) рассеивателей и ориентации элементов в группах. Ослабление радиоволн в L -диапазоне частот в кронах деревьев примерно в 4–5 раз выше, чем на стволах. Вклады взаимодействий слоев стволов и крон с почвой в рассеянии зависят от ее неровностей и влажности. В совокупности с ко-

герентностью сигналов навигационных спутников случайно неоднородное распределение эффективной диэлектрической проницаемости слоев кроны и стволов обеспечивает формирование спекл-структуры поля рассеянного лесом излучения.

Список литературы

1. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. М. Горячая линия «Телетом». 2015.
2. Чухланцев А.А. Шутко А.М., Голованов С.П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами. Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 11. С. 1285–1311.
3. Podoprigora V., Sorokin A. Forest vegetation Interaction with L-band Satellite Signals, E3S Web Conf. 2019. Vol. 75. 01007. Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197501007>.
4. Seker S.S., Schreider A. Electromagnetic scattering from dielectric cylinder of finite length // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1988. Vol. 36. P. 303–307.
5. Ориентационная упорядоченность элементов дерева в модели диэлектрической проницаемости древостоя / А.В. Сорокин, В.Г. Подопригора, Д.С. Макаров [и др.] // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63 (2). С. 50–54.

V.G. Podoprigora^{1,3}, A.V. Sorokin², D.S. Makarov², D.V. Kharlamov²

¹L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: podoprigora46@gmail.co

PECULIARITIES OF SCATTERING OF SIGNALS OF NAVIGATION SATELLITES IN THE LAYERED STRUCTURE OF THE TREE

The work investigates the scattering and attenuation of signals from navigation satellites interacting with different layers of the forest: a layer of trunks and a layer of crowns, consisting of branches, leaves or needles. The influence of the "litter – stems" and "crown – air" boundaries on the characteristics of radio signal scattering is considered.

Keywords: navigation satellites, L-band of radio frequencies, layers of crowns and trunks, scattering, attenuation of signals, interfaces, irregularities.

Л.Г. Свердлик

Кандидат физико-математических наук,
Научная станция РАН в Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В РЕГИОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Многолетние вариации эквивалентного уровня воды (*Equivalent Water Height, EWH*) над контуром геоида (2003–2015 гг.), полученные по данным спутниковых измерений (*GRACE*), проанализированы на предмет установления взаимосвязи между изменениями гравитационного поля с напряженно-деформированным состоянием геологической среды и сейсмическим процессом в регионе Центральной Азии.

Ключевые слова: Памир, Тянь-Шань, землетрясение, гравитационное поле, спутниковая миссия, *GRACE*, эквивалентный уровень воды, аномалия.

Введение. Данные спутниковой гравиметрии, полученные в ходе эксперимента *GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)*, широко используются для изучения различных геофизических явлений и процессов. Архив данных *GRACE* содержит спутниковые измерения за 15 лет (2002–2017 гг.). Ежемесячные модели гравитационного поля в виде разложений по сферическим функциям рассчитываются несколькими исследовательскими (аналитическими) центрами в Швейцарии (AIUB), Германии (GFZ), США (CSR и JPL) и Франции (CNES/GRGS) [1], которые генерируют ежемесячные гравитационные поля, равномерно покрывающие поверхность Земли. Высокая точность системы *GRACE*, составляющая $1 \cdot 10^{-10}$ м/с² (10 мкм), определяет чувствительность данного средства спутниковой гравиметрии к интегральному перераспределению массы, что позволяет изучать не только динамику океанов, объема ледников, сезонные и межгодовые гидрологические изменения, но и геодинамические процессы, сопровождающиеся флуктуациями плотности в коре и мантии Земли при крупных землетрясениях. Примером успешного обнаружения постсейсмических эффектов могут служить изменения гравитационного поля, связанные с несколькими сильнейшими землетрясениями, например, на Суматре (2004 г.) и в Чили (2010 г.) [2].

Данные гравитационных и сейсмических измерений. В настоящей работе использовались ежемесячные модели гравитационного поля Геофизического института в Потсдаме (GFZ-RL06) [3], Центра исследований в области космической геодезии, Тулуза, Франция (CNES/GRGS-RL05) и Астрономического института Бернского университета (AIUB-RL02) [4]. Исследование пространственно-временного изменения поля силы тяжести выполнено в наиболее сейсмоактивной области Центральной Азии, расположенной в зоне сочленения двух крупнейших горных систем – Памира и Тянь-Шаня, которая выделяется на карте распределения эпицентров землетрясений, произошедших в регионе, ограниченном координатами 37.0–44.0° N, 70.0–79.0° E, в 2003–2015 гг. (рис. 1). Сведения о землетрясениях получены по данным региональной сети сейсмических станций KNET ($M \geq 2,0$) и на интерактивном сервисе ISC ($M \geq 3,0$) [5].

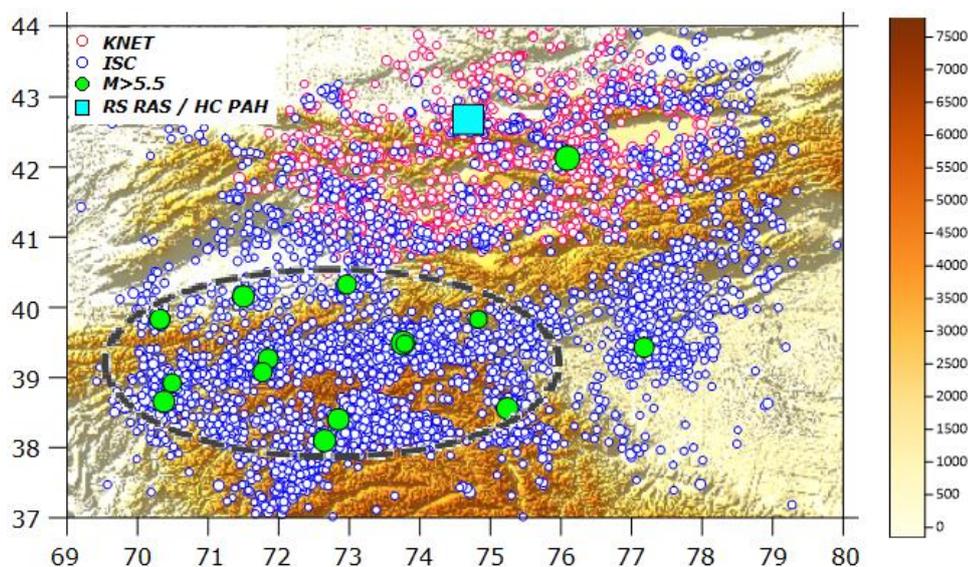


Рис. 1. Расположение эпицентров землетрясений $M \geq 2,0$ (KNET), $M \geq 3,0$ и $M \geq 5,5$ (ISC)

Изменения гравитационного поля, вызванные сильными землетрясениями. Исходными данными для анализа связанных с сейсмической активностью временных вариаций послужили спутниковые данные (GRACE) в виде решений двух аналитических центров AIUB-RL02 и CNES/GRGS-RL05 (рис. 2, а), отражающие интегральные изменения гравитационного поля (пересчитанные в толщину эквивалентного слоя воды EWH) в районе концентрации землетрясений $M \geq 5,5$. Как видно, наблюдается хорошее согласие между двумя моделями GRACE, которые имеют одинаковую фазу, близкую амплитуду и идентичный тренд. Однако временные ряды AIUB-RL02 имеют больше высокочастотных вариаций, чем CNES/GRGS-RL05, что позволяет выделить компоненту поля силы тяжести, которая может быть связана с сейсмической активностью.

Вычисление разности между временными рядами (ΔEWH) позволило исключить сезонные и трендовые изменения. Аномальность выделенной составляющей гравитационного поля δEWH (рис. 2, б) определялась по условию выхода значений за пределы интервала $\pm 1,34\sigma$ в соответствии с выражением, приведенным в работе [6]. Анализируя вариации EWH, можно видеть, что резкие аномальные изменения δEWH совпадают по времени с наиболее крупными землетрясениями ($M \geq 5,5$) или предвещают их на месяц (рис. 2, в). Это позволяет сделать вывод, что наблюдаемые аномалии имели разнонаправленный характер и были вызваны пред- и косейсмическими деформациями и перераспределением масс, возникающим в неоднородной по плотности геологической среде.

Пространственные изменения гравитационного поля. Наряду с временными изменениями, важную роль играет определение пространственного распределения гравитационного поля в периоды сейсмической активности, которые наблюдались в период миссии GRACE. Одним из показательных примеров являются семь землетрясений магнитудой $M > 5,0$, зарегистрированные с октября 2006 г. по январь 2007 г. (рис. 3).

За несколько месяцев (начиная с сентября 2006 г.) медленные изменения EWH постепенно сосредоточились вблизи эпицентральной области предстоящих сильных сейсмических событий: 8 ноября 2006 г. ($M = 5,8$), 25 декабря 2006 г. ($M = 6,4$) и 8 января 2007 г. ($M = 6,1$). Можно предполагать, что происхождение отрицательной аномалии гравитационного поля связано с изменениями плотности геосреды и напряженно-деформированного состояния всей сейсмогенной области.

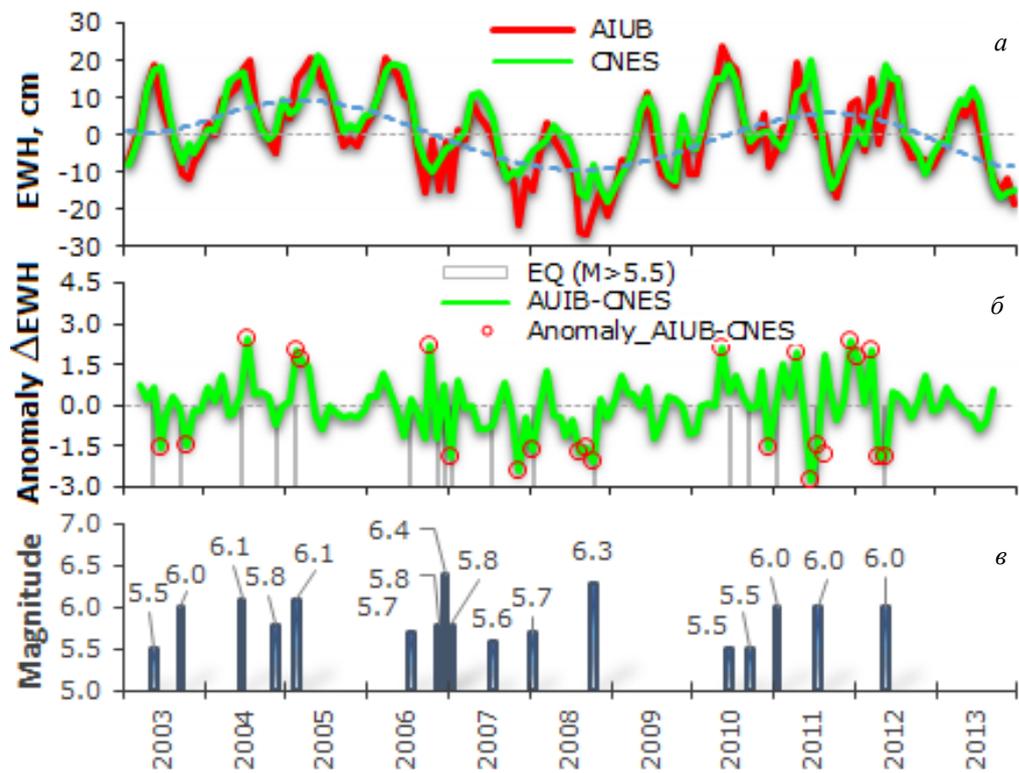


Рис. 2. Временные ряды вариаций гравитационного поля AIUB-RL02 и CNES/GRGS-RL05 (а), аномалии высокочастотной компоненты гравитационного поля (б) и последовательность магнитуд землетрясений $M \geq 5,5$ (в) в 2003–2013 гг.

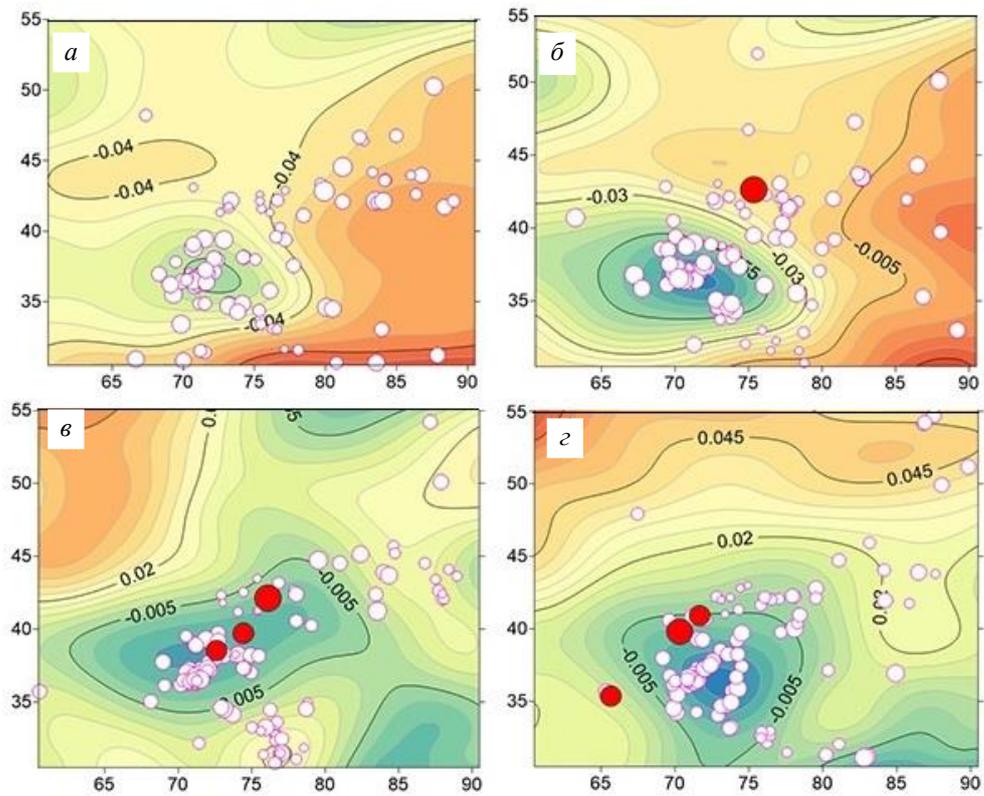


Рис. 3. Эволюция пространственного распределения гравитационного поля и сейсмичности в октябре (а), ноябре (б), декабре (в) 2006 г. и январе 2007 г. (г)

Заклучение. Исследование многолетних спутниковых данных GRACE в сейсмически активном регионе Тянь-Шаня и Памира показало, что вероятными причинами наблюдаемых аномалий гравитационного поля являются тектонические факторы, связанные с перераспределением масс в литосфере в результате крупных землетрясений ($M \geq 5,5$), а порог обнаружения гравитационных аномалий лежит, вероятно, существенно ниже общепринятого уровня магнитуд ($M = 7,5-8,6$). Распределение сейсмогенных зон приурочено к аномальным областям силы тяжести.

Список литературы

1. AIUB-RL02: an improved time series of monthly gravity fields from GRACE data / U. Meyer, A. Jaggi, Y. Jean, G. Beutler // *Geophys. J. Int.* 2016. Vol. 205, is. 2. P. 1196–1207. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw081>.
2. Li J., Chen J., Zhang Z. Seismologic applications of GRACE time-variable gravity measurements // *Earthquake Science*. 2014. Vol. 27, is. 2. P. 229–245. DOI 10.1007/s11589-014-0072-1.
3. URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/>.
4. URL: <http://www.thegraceplotter.com/>.
5. URL: <http://www.isc.ac.uk>.
6. Свердлик Л.Г. Аномальные вариации электрических характеристик земной коры и термического состояния атмосферы // *Вестн. КРСУ*. 2018. Т. 18, № 8. С. 187–193.

L.G. Sverdlik

Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyzstan
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

ANALYSIS OF MULTI-YEAR DATA OF GRAVITY AND SEISMIC MEASUREMENTS IN THE REGION OF CENTRAL ASIA

Multi-year variations of the Equivalent Water Height (EWH) over the geoid contour (2003–2015), obtained according to the data of satellite measurements (GRACE), have been analyzed with respect to interrelation between the gravity field with the stress-strain behavior of the geologic environment and seismic process in the region of Central Asia.

Keywords: Pamir, Tien-Shan, earthquake, gravity field, satellite mission, GRACE, equivalent water height, anomaly.

О.С. Сизов¹, А.В. Соромотин², Н.В. Приходько³, Л.В. Бродт³

¹Кандидат географических наук, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

²Доктор биологических наук, ³Аспирант

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

e-mail: kabanin@yandex.ru

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ПОСТПИРОГЕННОЙ ДИНАМИКИ ТУНДРОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 50 ЛЕТ (1968–2018)

Рассмотрены особенности восстановления тундровой растительности на участках природных пожаров на севере Западной Сибири. Основными исходными данными являются космические снимки *Corona/КН-4b*, *Landsat-1, 4, 5, 7, 8*, охватывающие период наблюдений с 1968 по 2018 г. Установлено, что за период наблюдений гари охватили более 60 % площади рассматриваемых ключевых участков (без учета площади повторных возгораний). При этом частота и интенсивность пожаров возрастает пропорционально расширению антропогенного воздействия, обусловленного добычей нефти и газа. Большую часть составляют моновозрастные гари (80,5 %), общая доля повторных возгораний – 19,5 %, участки с трех и четырехкратной повторяемостью – 2,8 %. Для всех гарей прослеживается стабильное превышение значений NDVI по сравнению с фоновыми тундровыми участками. Полевые наблюдения показали, что на месте тундры после пожаров формируются устойчивые кустаниково-березовые растительные сообщества.

Ключевые слова: тундра, растительность, Западная Сибирь, пожары, восстановление, дистанционное зондирование.

Современные исследования показывают, что в арктической зоне пожары являются одной из основных причин нарушения термических условий многолетне-мерзлых пород (ММП) [1]. В естественных условиях возгорания в тундре происходят гораздо реже, чем на лесопокрытых таежных территориях [1–3], однако их частота и интенсивность прямо пропорционально возрастают с усилением антропогенного воздействия, особенно в районах добычи нефти и газа [4; 5]. Для выявления, мониторинга и оценки последствий природных пожаров активно применяются дистанционные методы, основанные преимущественно на данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) среднего и низкого разрешения (*Landsat-4, 5, 7, 8*, *Sentinel-2, 3*, *Terra*, *Aqua*, *SuomiNPP* и др.) [3].

Целью данной работы является оценка постпирогенной динамики растительности в зоне тундры, лесотундры и северной тайги на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018 гг.) на основе данных ДЗЗ среднего разрешения.

Территория работ расположена в пределах Надымского района Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) и охватывает нижнее течение реки Надым и южное побережье Обской губы (Надымская Обь). Для проведения детального анализа выбраны три ключевых участка с преобладанием тундровой растительности: наиболее крупный участок 1 на правом берегу р.Надым, включающий бассейн реки Ныда и верховья реки Правая Хетта ($S = 15\,800\text{ км}^2$); участок 2, включающий

южное побережье Обской губы и бассейн реки Шуга ($S = 2\,500\text{ км}^2$); участок 3 к западу от города Надым, частично охватывающий бассейн реки Нгарка-Пыряха ($S = 2\,000\text{ км}^2$) (рис. 1). В ландшафтном отношении участки относятся к Тазовской южно-тундровой, Салехардской и Надым-Пурской лесотундровой, Полуйской и Надым-Пурской северо-таежной провинций Западно-Сибирской равнины [6; 7]. Растительность представлена:

- ерниковыми и ивняково-ерниковыми мохово-лишайниковыми тундрами в сочетании с плоскобугристыми трещиновато-полигональными болотами и лишайниково-кустарничковыми редколесьями (южно-тундровые формации);
- лиственничными и елово-лиственничными кустарничково-зеленомошными редколесьями в сочетании с лишайниковыми тундрами (лесотундровые формации);
- лиственничными и елово-лиственничными с примесью кедра и сосны кустарничково-зеленомошно-лишайниковыми лесами в сочетании с ерnikово-сфагново-лишайниковыми плоско- и крупнобугристыми болотами (северо-таежные формации).

Антропогенное воздействие определяется разработкой крупных нефтегазовых месторождений (Медвежье, Ярудейское). Кроме того, в пределах ключевых участков проходят крупные магистральные газопроводы («Ямбург-Тула», «Ямбург-Елец», «СРТО-Урал», «Уренгой-Центр», «Уренгой-Ужгород» и др.), ведется строительство Северного широтного хода «Салехард-Новый Уренгой» (авто- и железная дорога).

В качестве исходных данных использовались:

- панхроматические фотоснимки Corona/КН-4b [8], которые фиксируют начальное состояние территории до активного промышленного освоения (геологоразведочные работы начались в 1967 г.);
- данные *Landsat* – для определения площади природных пожаров за отдельные временные срезы, а также для оценки восстановления растительности на гарях (1973, 1988, 2001, 2016 и 2018 гг.).

Результаты дешифрирования показывают, что с 1968 по 2018 г. гари охватили более 60 % площади ключевых участков (без учета площади повторных возгораний) (рис. 1). Можно отметить явную асимметрию – удельная площадь гарей на участке 1 существенно выше доли на участках 2 и 3. При отсутствии природных различий наиболее вероятным объяснением данной особенности является различная степень антропогенной нагрузки.

Так, в пределах участков 2 и 3 до недавнего времени отсутствовали объекты нефтегазовой инфраструктуры, в то время как на участке 1 с 1967 г. начались геологоразведочные работы, а с 1971 г. – строительство инфраструктуры на Медвежьем газовом месторождении (запущено в эксплуатацию в 1977 г.). Кроме того, в середине 1970-х гг. по ключевому участку 1 были проложены газопроводы с Ямбургского месторождения.

Детальная статистика площади гарей по ключевым участкам показывает, что большую часть составляют моновозрастные гари (80,5 %), доля повторных возгораний – 19,5 %, участки с трех- и четырехкратной повторяемостью – 2,8 %. Периодически возникают крупные пожары, так с 2016 по 2018 г. доля вновь образованных гарей составила порядка 22,8 % (рис. 2). Примечательно, что по состоянию на 1968 г. доля разновозрастных гарей составляла только 25,7 %, т.е. основная часть природных пожаров произошла на современном этапе интенсивного хозяйственного освоения на фоне явных климатических изменений.

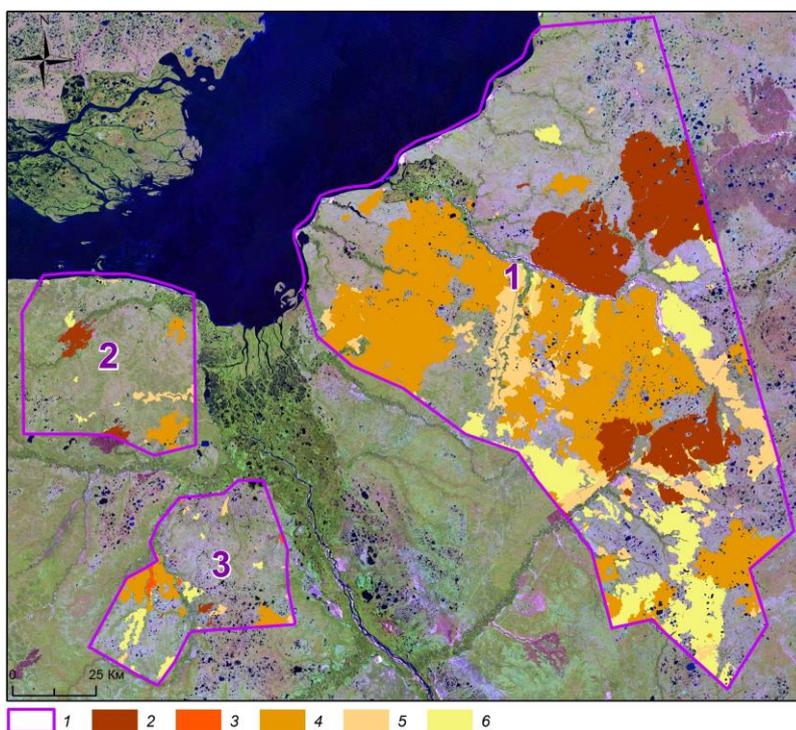


Рис. 1. Площади сгоревших территорий в пределах рассматриваемых участков по данным Corona/КН-4b и *Landsat-1, 4, 5, 7, 8*: 1 – границы ключевых участков; 2 – маска гарей 2017–2018 гг.; 3 – маска гарей 2002–2016 гг.; 4 – маска гарей 1989–2001 гг.; 5 – маска гарей 1969–1988 гг.; 6 – маска гарей до 1968 г.; подложка – *Landsat-8*, 2018 г.

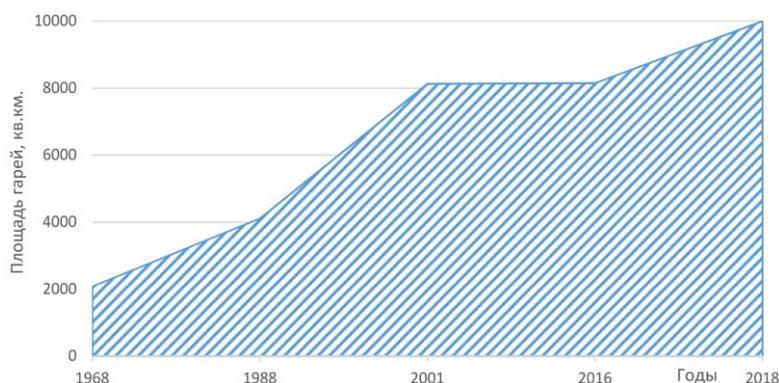


Рис. 2. Прирост площади гарей с 1968 по 2018 гг. (с учетом повторных возгораний)

Для оценки среднего объема фитомассы (фотосинтезирующих частей растений) на участках разновременных тундровых гарей и фоновых участках южной тундры и лесотундры на основе снимка *Landsat-8* за 3 июля 2019 г. был рассчитан *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*). В выборку попали участки с тундровой растительностью (в том числе для гарей), площадью 4 539 км² в пределах северной половины ключевого участка 1 (29 % его общей площади). На графике (рис. 3) прослеживается стабильное превышение по сравнению с фоновыми условиями запасов фитомассы для всех гарей за исключением самых свежих (2018 г.). По всей видимости, это связано с активным первичным восстановлением кустарников и подроста березы на сгоревших участках. Высокая плотность кустарников и уничтожение лишайникового покрова с низким запасом фитомассы в итоге дают более высокие значения *NDVI*. При этом для самых ранних гарей (1968 г.) характерны самые высокие показатели *NDVI*, что свидетельствует о длительном доминировании лиственной растительности на участках сгоревшей мохово-лишайниковой тундры и лесотундры.

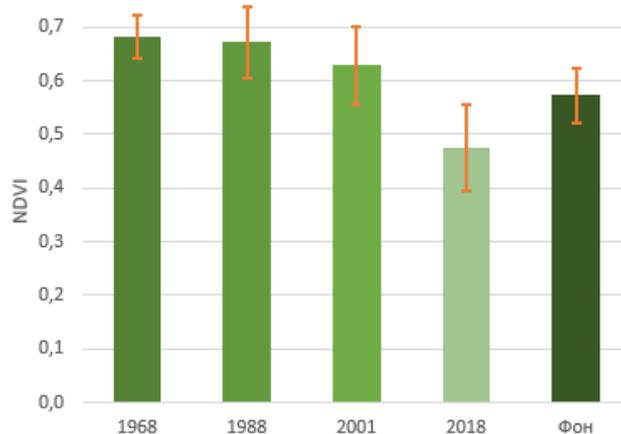


Рис. 3. Средние показатели NDVI на участках разновозрастных гарей и фоновых участках тундры и лесотундры (на основе данных *Landsat-8* за 3 июля 2019 г.)

В ходе рекогносцировочных полевых работ в августе 2019 г. удалось провести геоботанические описания с измерениями уровня СТС и температуры грунта на глубине 20 см на трех точках в пределах ключевого участка 1. Наблюдения показали, что в пределах фонового участка, который представляет собой анклав тундровой растительности вблизи южной границы зоны лесотундры, мощность СТС составляет в среднем около 38 см с незначительными вариациями, в то время как на участке пожаров 1968 и 1988 гг. талый слой достигает 170 см (в среднем 119 см). На участке гари 1988 г. мощность СТС также увеличена, составляя в среднем 102 см (интервал измерений 70–130 см. В 2020 г. планируется проведение более детальных измерений на различных участках разновозрастных гарей от п. Заполярный до п. Пангоды.

В ходе дальнейших исследований предполагается установить климатические пределы, препятствующие вторичному формированию мерзлоты в верхнем слое почвы. Кроме того, необходим сбор более подробных полевых данных по геоботаническим и мерзлотным условиям на участках разновозрастных тундровых гарей.

В целом можно сделать вывод, что основными факторами возможного замещения тундровых формаций производными сообществами являются природные пожары и прямое антропогенное воздействие. При этом прослеживается явная закономерность увеличения частоты и площади возгораний в районах активной хозяйственной деятельности. За 50-летний период наблюдений гари охватили более 60 % площади рассматриваемых ключевых участков (без учета площади повторных возгораний) с активно разрабатываемыми Медвежьим и Ярудейским месторождениями углеводородов. По всей видимости, на фоне изменений климата и расширения хозяйственного освоения Арктики роль природных пожаров в тундре, как одного из факторов ландшафтной дифференциации будет постепенно возрастать.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта № 19-45-890008.

Список литературы

1. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic / I. Nitze, G. Grosse, B.M. Jones [et al.] // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9, № 1. P. 1–11.
2. Оценка площадей повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2000–2003 годах по спутниковым данным инструмента SPOT-Vegetation / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Е.А. Лупян, И.А. Уваров // *Современные проблемы дистанционного зондиро-*

вания Земли из космоса. 2005. Т. 2, № 2. С. 354–366.

3. The footprint of Alaskan tundra fires during the past half-century: implications for surface properties and radiative forcing / A.V. Rocha, M.M. Loranty, P.E. Higuera [et al.] // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7, № 4. P. 1–8.

4. Московченко Д.В., Московченко М.Д. Оценка современной динамики ландшафтов Заполярного месторождения с использованием спутниковых данных // *Вестн. ТюмГУ. Экология и природопользование*. 2018. Т. 4, № 2. С. 6–16.

5. Cumulative geocological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska / M.K. Reynolds, D.A. Walker, K.J. Ambrosius [et al.] // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20, № 4. P. 1211–1224.

6. Ильина И.С., Лапшина Е.И., Лавренко Н.Н. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука. 1985. 248 с.

7. Сизов О.С., Лоботросова С.А., Соромотин А.В. Лишайниковые сосняки северной тайги Западной Сибири как индикатор ледниковых условий рельефообразования // *Проблемы региональной экологии*. 2017. № 2. С. 60–68.

8. Ruffner K.C. *Corona: America's First Satellite Program*. Paperback. 2005. 364 p.

O.S. Sizov¹, A.V. Soromotin², N.V. Prikhodko², L.V. Brodt²

¹Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow, Russia

²University of Tyumen, Tyumen, 625003, Russia

e-mail: kabanin@yandex.ru

REMOTE ASSESSMENT OF THE POST-PYROGENIC DYNAMICS OF TUNDRA VEGETATION IN THE NORTHERN PART OF WESTERN SIBERIA OVER THE PAST 50 YEARS (1968–2018)

The article discusses the features of restoration of tundra vegetation in areas of natural fires in the north of Western Siberia. The main source data are satellite images Corona / KH-4b, Landsat-1, 4, 5, 7, 8, covering the observation period from 1968 to 2018. It was found that during the observation period burns covered more than 60 % of the area of the key areas under consideration (excluding the area of repeated ignitions). At the same time, the frequency and intensity of fires increases in proportion to the expansion of anthropogenic impact due to oil and gas production. Most of them are single-burning burns (80,5 %), the total share of repeated fires is 19,5 %, and sections with three and four-fold repeatability are 2,8 %. For all burnt areas, a stable excess of NDVI values is observed compared to the background tundra sites. Field observations showed that on the site of the tundra after fires, stable shrub-birch plant communities are formed.

Keywords: tundra, vegetation, Western Siberia, fires, recovery, remote sensing.

**А.В. Сорокин¹, А.Н. Борисов², А.Н. Остыловский³,
В.В. Иванов², Д.С. Макаров¹, Д.В. Харламов¹**

¹ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

²Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: sorav@iph.krasn.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАСОВ СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Представлен метод определения запасов стволовой древесины древостоя с использованием данных измерений коэффициентов погонного ослабления сигналов навигационных спутников диапазона L1 в лесу и таксометрических особенностей лесного массива. Рассмотрен вариант определения запасов стволовой древесины на основе различий вкладов в ослабления слоями крон и стволов с учетом координатной привязки трассы зондирующего сигнала в древостое.

Ключевые слова: таксация древостоя, слои крон и стволов, радиоскопия, сигналы навигационных спутников, диапазон L1.

Введение. Задача восстановления запасов стволовой древесины дистанционным методом с использованием сигналов навигационных спутников (НС) имеет перспективу бесконтактного получения усредненного значения площади поперечных сечений стволов в лесном массиве. Этот показатель определяется по результатам таксации с использованием закономерностей распределения фитомассы в древостое. Расчет суммы поперечных сечений стволов выполняется по данным непосредственных измерений диаметров стволов на высоте 1,3 м, их распределения по диаметрам на 1 Га древостоя.

Структуры крон и стволов деревьев физически существенно отличается. Длина волны радиоизлучения НС диапазона L1 составляет порядка 19 см, что значительно больше линейных размеров элементов крон – хвои, листьев и мелких ветвей. Средние размеры диаметров стволов насаждения находятся в интервале 20–40 см.

Структура древостоя как смешанного диэлектрика из воздуха и морфоструктур деревьев пространственно неоднородна по распределению элементов деревьев и самих деревьев, имеет слоистую структуру, поэтому в ослабление сигналов НС вклады эффектов рассеяния и поглощения различаются. Слой крон является полупрозрачным, ослабление сигнала обусловлено поглощением элементами крон. Слой стволов, наряду с поглощением, является неоднородной рассеивающей средой. Изучение возможностей использования радиопросвечивания леса сигналами НС – актуальная задача.

Метод радиопросвечивания древостоя. Радиоскопия лесных массивов с использованием сигналов НС осуществляется путем регистрации сигналов навигационных спутников после прохождения древостоя. Схема измерений в варианте расположения антенны вблизи границы лесного массива [1] представлена на рис. 1.

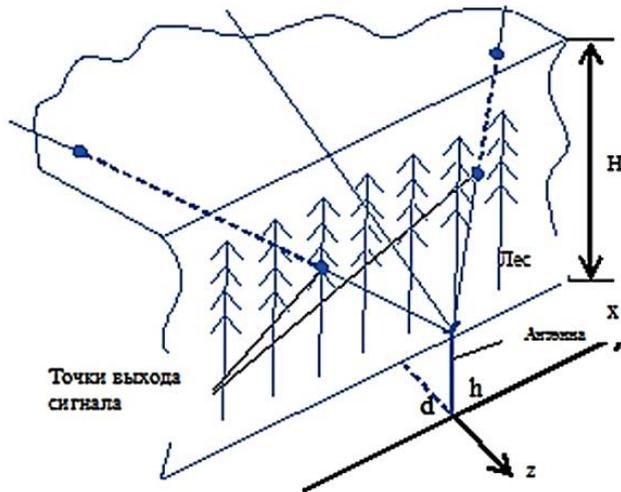


Рис. 1. Схема эксперимента по радиопросвечиванию древостоя

Координатная привязка траекторий сигнала, прошедшего сквозь лесной полог, позволяет однозначно определить пространственное положение аналитического конусного объема, формирующего регистрируемый сигнал [1]. Траектория, показанная сплошной линией, соответствует регистрации прямого сигнала, прошедшего выше верхней кромки леса. Две траектории проходят сквозь древостой в слое крон и обозначены пунктирными линиями. При изменении высоты расположения фазового центра антенны h и его расстояния d до кромки леса вклады слоев крон и стволов от рассеяния и поглощения в коэффициенты погонного ослабления на разных траекториях варьируются.

Метод определения объемной плотности биомассы древостоя основан на экспоненциальном законе ослабления сигналов навигационных спутников в коническом канале древостоя с вершиной на приемной антенне и телесным углом, соответствующим первой зоне Френеля. Расположение антенны в древостое с вертикально ориентированной осью диаграммы направленности позволяет регистрировать зондирующее излучение отдельных спутников в аналитическом объеме VF в виде конуса с углом 160° и вершиной на антенне. Основание конуса определяется высотой лесного массива H . Общие потери мощности сигнала в процессе распространения в лесу определяются поглощением и множественным рассеянием на стволах, ветвях, хвое или листьях.

В работе [2] получено выражение для доли биомассы древостоя μ в аналитическом объеме VF , выраженное через коэффициент погонного ослабления ν среды и отношения мощностей падающего на древостой и вышедшего из него сигнала. Расположение аналитического объема определяется однозначно из координатных данных траектории сигнала, регистрируемого приемником. Изменения положения антенны в слое крон дает возможность получения коэффициентов погонного ослабления на трассах в верхней части слоя крон относительно точки расположения антенны. По мере уменьшения высоты расположения антенны в коэффициенты появляется вклад верхней части слоя стволовой древесины. В целом объемная плотность стволовой древесины значительно больше, и поэтому вклад в ослабление сигналов будет наибольшим при расположении антенны у поверхности почвы. Анализ зависимости коэффициента погонного ослабления от высоты h и учет вклада от слоя крон позволит определить коэффициент погонного ослабления в слое стволовой древесины.

Пример тестового участка. Проведение измерений и последующего анализа данных для связи изменений мощности зондирующего излучения в лесном пологом с конкретными биометрическими показателями древостоя предполагает выбор тестового участка с минимальным количеством факторов, влияющих на поглощение сигнала НС. Данному критерию удовлетворяет чистое по составу сосновое насаждение стационара «Погорельский бор», территориально входящее в Красноярскую островную лесостепь. Сосняк в возрасте 55 лет представлен высокопродуктивным древостоем I класса бонитета. Размещение деревьев на участке равномерное без прогалин и явно выраженных биогрупп. Подрост, подлесок и кустарничковый ярус отсутствуют (рис. 2).



Рис 2. Размещение деревьев на тестовом участке:
слева – вид древостоя сверху, справа – структура слоя стволов

Структура крон и стволов деревьев физически существенно отличается, и параметры древостоя, влияющие на ослабление сигнала, будут различны. Для получения более объективных характеристик ослабления сигнала в насаждении необходимо иметь два основных показателя – сумму поперечных сечений стволов и фитомассу крон деревьев в верхней части. Запас стволовой древесины на участке вычисляется непосредственно по величине суммы площадей сечения. На основе проведенных измерений получены следующие характеристики ТО: средний диаметр ствола на высоте 1,3 м равен 18,6 см; средняя высота древостоя – 20,7 м; средний диаметр крон деревьев – 2,7 м; густота древостоя – 1950 шт/га; сумма площадей сечения – 53 м²/га; запас стволовой древесины – 514 м³/га. Соотношение долей фитомассы крон и стволов древостоя составляет около 1 : 6 [3]. По высоте деревьев с учетом коэффициента формы ствола можно рассчитать площадь сечения ствола для дерева на любой высоте. Учет вкладов компонентов биомассы в ослабление сигнала НС в зависимости от угла регистрации и высоты расположения антенны позволяет получить площадь сечения стволов и величину объема стволовой древесины участка леса с площадью до 3 Га.

Список литературы

1. Пат. 2 682 718 РФ. МПК G01S 19/03 (2010.01). Способ определения коэффициентов погонного ослабления сигналов навигационных космических аппаратов в лесном массиве с координатной привязкой // Макаров Д.С., Савин И.В., Сорокин А.В., Фомин С.В. Харламов Д.В. № 2018119448; заявл.25.05.2018; опубл. 21.03.2019, Бюл. № 9. 8 с.
2. Оценка объема биомассы древостоя по ослаблению сигналов навигационных спутников диапазона L1 / А.В. Сорокин, А.Н. Остыловский, А.Н. Борисов [и др.] // Материалы VI Междунар. науч. конф. Красноярск, 10–13 сентября 2019 г. С. 287–290.
3. Стаканов В.Д. Распределение органического вещества в различных частях сосны обыкновенной // Лесоведение. 1990. № 4. С. 25–33.

A.V. Sorokin¹, A.N. Borisov³, A.N. Ostylovsky², V.V. Ivanov²,
D.S. Makarov¹, D.V. Kharlamov¹

¹FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: sorav@iph.krasn.ru

USING NAVIGATION SATELLITE SIGNALS TO DETERMINE STOK OF STEM WOOD

The method for determining the stocks of stem wood of a stand using the data of measurements of the coefficients of linear attenuation of signals of navigation satellites of the L1 range in the forest and taxometric features of the forest is presented. The option of determining the stock of stem wood based on differences in contributions to attenuation by layers of crowns and trunks is considered, taking into account the coordinate reference of the probe signal path to the stand.

Keywords: stand taxation, layers of crowns and trunks, radioscopy, signals of navigation satellites, range L1.

УДК 537.86

А.В. Сорокин¹, Е.В. Кузьмин², Д.С. Макаров¹, Д.В. Харламов¹

¹ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: sorav@iph.krasn.ru

РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ЛЕДОВЫХ ПОКРОВОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЕЗОННЫХ СОСТОЯНИЯХ ПО СИГНАЛАМ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ В L1-ДИАПАЗОНЕ

Проведена серия регистраций интерференционных рефлектограмм от участка озера с ледовым покрытием в стадии ледостава, стационарном зимнем состоянии, а также в период прогрева и таяния. Представленные экспериментальные данные сезонных состояний ледовых покровов получены за счет обработки в приемнике суперпозиции прямых и отраженных сигналов навигационных спутников L1-диапазона. Выявлены особенности интерференционных эффектов в периоды ледостава, стационарного состояния льда (зимний период) и во время таяния (весенний период). Рассмотрен вариант объемного нарушения структуры льда в результате воздействия тепловых потоков через границы раздела воздух – лед и лед – вода.

Ключевые слова: ГНСС-рефлектометрия, ледовые покровы, L1-диапазон, состояние льда.

Ведение. Цикл формирования ледовых покровов рек и озер Сибири в естественных состояниях от ледостава до полного завершения процесса таяния льда длится 5–6 и более месяцев. Практическое использование ледовых покровов достаточно развито: ледовые переправы, зимники, наледи на реках, профессиональный и любительский подледный лов. Известно, что весной ледовый покров даже при зимней толщине становится менее прочным, его кристаллическая структура насы-

щается водой. Таким образом, задача бесконтактного мониторинга состояния ледовых покровов представляется востребованной и актуальной. Решение данной задачи целесообразно с использованием доступных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS и GALILEO. Применение сигналов ГНСС обеспечивает реализацию непрерывного мониторинга земных покровов, атмосферы, ионосферы. ГНСС-рефлектометрия с длительной регистрацией амплитудных вариаций сигналов навигационных спутников (НС) позволяет восстанавливать электрофизические характеристики природных сред методами рефлектометрии и радиоскопии [1; 2].

Динамика состояний ледовых покровов. Речные и озерные льды широко представлены на планете Земля. Значительная доля площадей водоемов Сибири в зимний период покрывается льдом, его толщины изменяется в широких пределах. Динамика ледостава на реках и озерах существенно различается при одинаковых погодных условиях. Определяющим фактором скорости роста толщины льда является сумма среднесуточных отрицательных температур. Наиболее однородный лед по геометрическим и электрофизическим характеристикам образуется на небольших озерных водоемах. В условиях стабильного похолодания в период ледостава формируются гладкие внутренние и внешние поверхности льда с малым количеством включений газовых пузырьков и других объемных дефектов. Вариант использования таких водоемов для исследований процессов взаимодействия сигналов НС с ледовыми покровами в целях разработки метода диагностики механической прочности льда является удобным для практики соответствующих экспериментов.

Измерения и ледовые покровы. Регистрация интерференционных рефлекторграмм (ИР) осуществлялась по традиционной схеме [2] на основе двух типов аппаратуры потребителя ГНСС. Использовался комплект антенн с линейной и правой круговой поляризациями. Фотографии образцов сухого и влажного льда представлены на рис. 1, *а* и *б* соответственно.



а



б

Рис. 1. Фотографии образцов льда:
а – новообразованный лёд (03.11.2018); *б* – влажный лёд (31.03.2019)

В точке расположения антенны формируется интерференционное поле в результате сложения прямой волны и многих отраженных. Мощности многократно отраженных внутри льда сигналов существенно уменьшаются, поэтому их вклад в формирование ИР мал. Устойчивые ИР ледовых покровов регистрировались в период от ледостава до таяния. Траектории перемещения НС и координаты расположения антенны позволяют однозначно определять координаты центра «сканирующей» площадки отражения на поверхности льда. Длительная регистрация ИР позволяет получать данные о локальной толщине льда [1]. Прочностные качества «весеннего» льда, наряду с толщиной, определяются структурными изменениями, связанными с появлением в его объеме талой воды. Отношение действительной ча-

сти диэлектрических проницаемостей воды (86) и льда (3,2) вблизи 0 °С в L1-диапазоне равно 26,9.

Результаты и обсуждение. Серия измерений ИР с использованием сигналов НС GPS и ГЛОНАСС в L1-диапазоне (1,5–1,6 ГГц) проведена на озере вблизи г. Красноярска с ледовым покрытием в стадии ледостава (октябрь – ноябрь), и весной, в период прогрева и таяния (март – апрель). Интервал толщин льда варьировался от 4,2 до 105 см. Приемные антенны устанавливались на льду либо на берегу (в период таяния) у кромки льда. Высота расположения фазового центра антенн варьировалась в интервале 3,8–4,4 м.

На рис. 2, *а* и 2, *б* представлены экспериментальные ИР $x(n)$ (n – номер временной выборки) для толщин льда 4,2 см (03.11.2018) и 105 см (31.03.2019) соответственно. Показанные ИР получены с частотой дискретизации 1 Гц по результатам обработки сигналов НС GPS 24 и GPS 27. Для выявления дополнительных особенностей ИР проведён их спектральный анализ – вычислено дискретное преобразование Фурье [3]. На рис. 3, *а* и 3, *б* представлены нормированные к своим максимальным значениям амплитудные спектры $S(k)$ (k – номер частотной выборки) экспериментальных ИР, показанных на рис. 2.

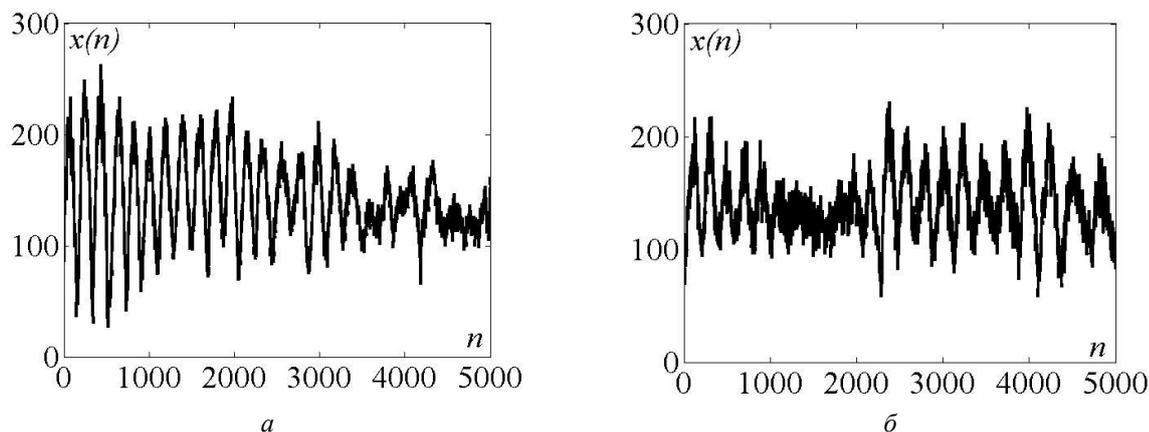


Рис. 2. Экспериментальные ИР: *а* – новообразованный лед (03.11.2018); *б* – влажный лед (31.03.2019)

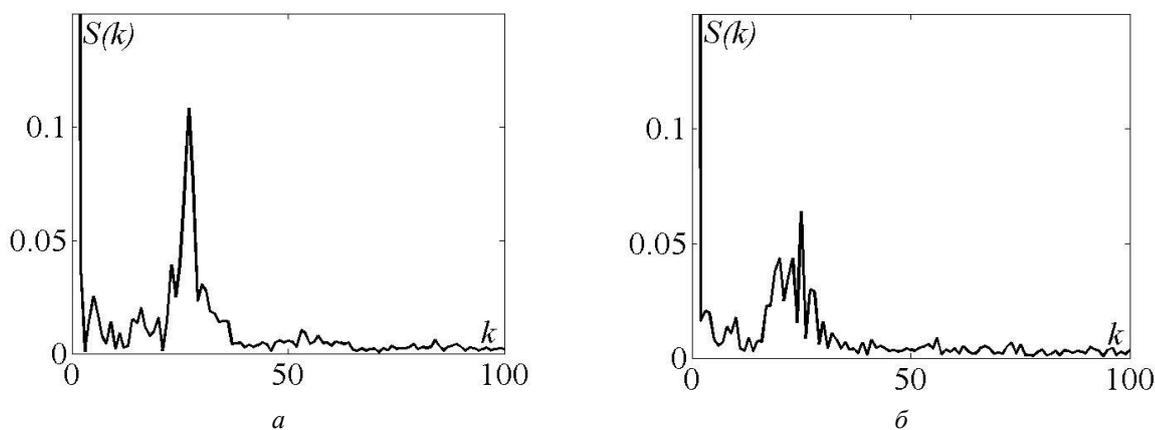


Рис. 3. Нормированные амплитудные спектры экспериментальных ИР: *а* – новообразованный лед (03.11.2018); *б* – влажный лед (31.03.2019)

Как видно из рис. 2 и 3, экспериментальные ИР имеют визуально различимую модуляционную структуру и заметные особенности амплитудных спектров. Зарегистрированное поведение ИР обусловлено как толщиной льда, так и его влажностью. Временные и частотные характеристики амплитудных вариаций суммарного сигнала, получаемого суперпозицией прямого и отражённых, зависят от рефракционных и геометрических характеристик льда, от количества и распределения талой воды в его объеме.

Выводы. Принципиальная возможность метода мониторинга состояния ледовых покровов обусловлена существенным различием комплексной диэлектрической проницаемости воды и льда. Наличие талой воды в структуре льда определяет рефракционные характеристики льда и параметры экспериментальных ИР. Использование аппаратуры потребителя ГНСС обеспечивает возможность регистрации амплитудных вариаций сигналов НС в течение нескольких часов и получение соответствующего массива данных, достаточного для изучения состояния льда.

Список литературы

1. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing. N.Y., London: Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. 286 p.
2. Макаров Д.С., Сорокин А.В., Харламов Д.В. Использование сигналов навигационных спутников в мониторинге земных покровов // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 1. С. 8–19. DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-8-19.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604 с.

A.V. Sorokin¹, E.V. Kuzmin², D.S. Makarov¹, D.V. Kharlamov¹

¹FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: sorav@iph.krasn.ru

REFLECTOMETRY OF ICE COVER AT DIFFERENT SEASONAL CONDITIONS BY SIGNALS OF NAVIGATION SATELLITES IN L1-RANGE

A series of recordings of interference reflectograms from a section of a lake with ice cover in the stage of freezing, stationary winter state, as well as during heating and melting was carried out. The presented experimental data were obtained in L1-range navigation satellites. The interference effects during periods of ice freezing, stationary state of ice (winter) and during melting (spring) were revealed. A variant of volumetric violation of the ice structure as a result of the influence of heat fluxes through the air-ice and ice-water interfaces is considered.

Keywords: GNSS-reflectometry, ice cover, L1-range, ice state.

Е.Н. Сутырина

Кандидат географических наук,
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
e-mail: ensut78@gmail.com

**ИЗУЧЕНИЕ ГОРОДСКОГО «ОСТРОВА ТЕПЛА»
АГЛОМЕРАЦИИ ИРКУТСК – АНГАРСК – ШЕЛЕХОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Представлены результаты изучения городского «острова тепла» агломерации Иркутск – Ангарск – Шелехов. С применением информации о температуре поверхности суши, восстановленной по данным радиометра AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) за период с 1998 по 2019 г. были определены размеры городского «острова тепла» изучаемой агломерации, проанализирована его суточная, сезонная и многолетняя динамика. Оценены значения разницы температур между городом и пригородом, которые достигают летом в дневное время суток 8–10 °С.

Ключевые слова: агломерация Иркутск – Ангарск – Шелехов, температура поверхности, данные радиометра AVHRR, городской «остров тепла».

Введение. Целью исследования является изучение изменения границ и интенсивности городского «острова тепла» агломерации Иркутск – Ангарск – Шелехов за многолетний период. Формирование так называемого городского «острова тепла» служит примером антропогенного влияния на климат города. «Острова тепла» проявляются более высокой температурой воздуха в городе по сравнению с окружающей территорией. Основные причины появления городских «островов тепла» – увеличение использования искусственных материалов и повышение антропогенного производства тепла. Важный индикатор интенсивности «острова тепла» – разница температуры между городом и его окрестностями [1].

Материалы и методы исследования. Спутниковые данные дают одновременное покрытие всей территории города. Это является одним из преимуществ использования данных дистанционного зондирования по сравнению с использованием данных, которые регистрируются на городских метеорологических станциях. В рамках данной работы для оценки пространственного распределения теплового загрязнения и исследования феномена «острова тепла» города Иркутска была использована информация о температуре поверхности суши (LST), восстановленная с применением LSE-алгоритма [2] по данным радиометра AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) на борту метеорологических спутников серии NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) за 1998–2019 гг. Температура поверхности суши и ее пространственно-временные вариации могут быть использованы для исследований городского «острова тепла», так как разница между температурой поверхности в пределах города и его окрестностей является результатом изменений в процессе урбанизации подстилающего покрова, теплоемкости и трехмерной структуры городских построек. В работе границы «островов тепла» выделялись по положению наибольшего градиента температуры поверхности суши.

Результаты исследования. В результате исследования были получены разно-временные карты с отображением участков тепловых аномалий, включая городские «острова тепла» в пределах агломерации Иркутск – Ангарск – Шелехов. «Тепловой остров» данной агломерации характеризуется хорошо выраженной суточной динамикой, что достаточно типично для этих тепловых аномалий, однако наибольших значений разница температур между городом и пригородом здесь наблюдается не ночью, а днем, может достигать летом 8–10 °С, вечером и ночью этот показатель существенно снижается до 3–5 °С. Такое явление может объясняться наличием сложных орографических и метеорологических условий влиянием крупных водных объектов на «остров тепла» данных населенных пунктов, а также тем, что в дневное время суток наибольший вклад в формирование данных «островов тепла» может давать недостаток растительности на городских и прилегающих к ним территориях. Размер островов тепла указанных городов в дневное время суток также превосходит их размер в вечернее и ночное время, что видно на рис. 1. «Острова тепла» также обнаруживаются зимой, но по размеру уступают «островам тепла» летом, что, видимо, также может быть связано с важной ролью недостатка растительности в формировании острова тепла летом в дневное время.

Кроме суточной и сезонной динамики в работе оценивалась межгодовая изменчивость в интенсивности и размерах «островов тепла». И если интенсивность, выраженная через перепад температуры между городом и его окрестностью, не показала статистически значимых тенденций за период исследования с 1998 по 2019 г., то площади островов тепла заметно выросли за этот период, что видно по положению островов тепла в июле 1998 и 2019 гг. в одно и то же время днем (рис. 2). Обнаруженное увеличение площади, по всей вероятности, связано с развитием исследуемых городов, а также с трансформацией ландшафтов и снижением плотности растительности в пригороде.

В работе для оценки вклада недостатка растительности в формировании «острова тепла» летом в дневное время были сопоставлены значения температуры (LST) с рассчитанным по данным видимого и ближнего инфракрасного диапазонов значениям вегетационного индекса (NDVI). NDVI широко используется для оценки растительности. Более высокие значения NDVI указывают на более высокую долю растительности от площади пикселя. Анализ взаимосвязей между этими показателями обнаружил, что температура поверхности (LST) находится в тесной обратной связи с NDVI, в то время как ночью и вечером эта связь оказалась менее выраженной.

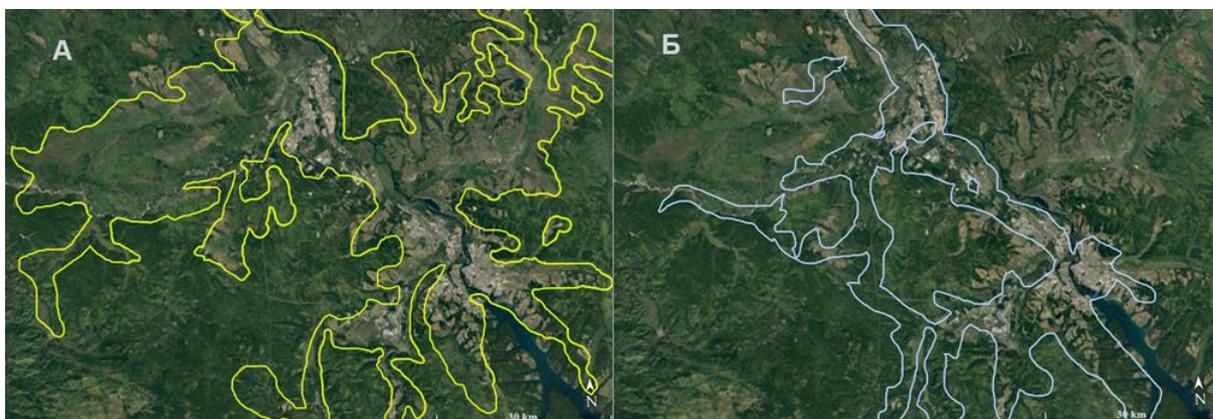


Рис 1. Положение «острова тепла» агломерации Иркутск – Ангарск – Шелехов днем (А) и ночью (Б) в июле 2019 г.

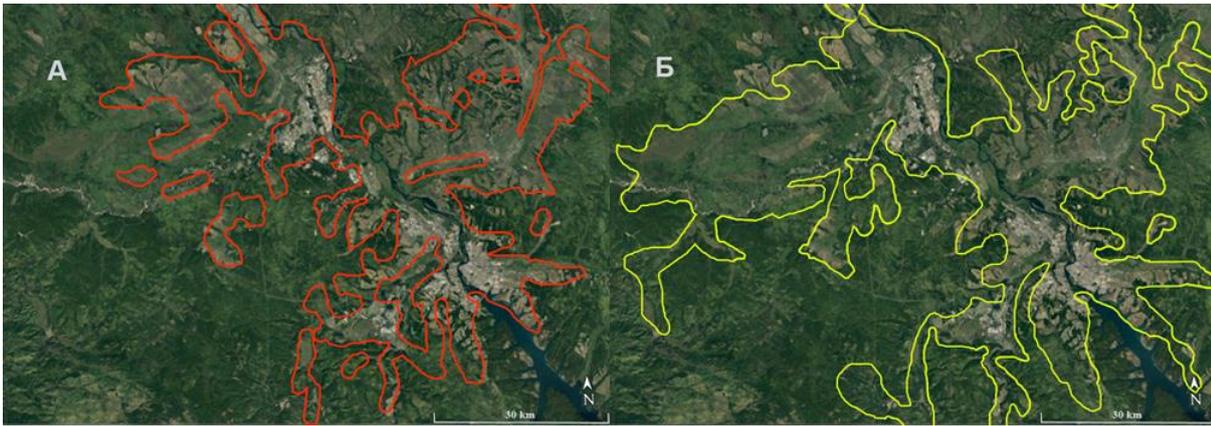


Рис. 2. Положение «острова тепла» агломерации Иркутск – Ангарск – Шелехов в 1998 (А) и 2019 гг. (Б) в июле днем

На рис. 3 приведено соотношение положения границ островов тепла исследуемых городов с характером растительности, демонстрирующее хорошее соответствие.

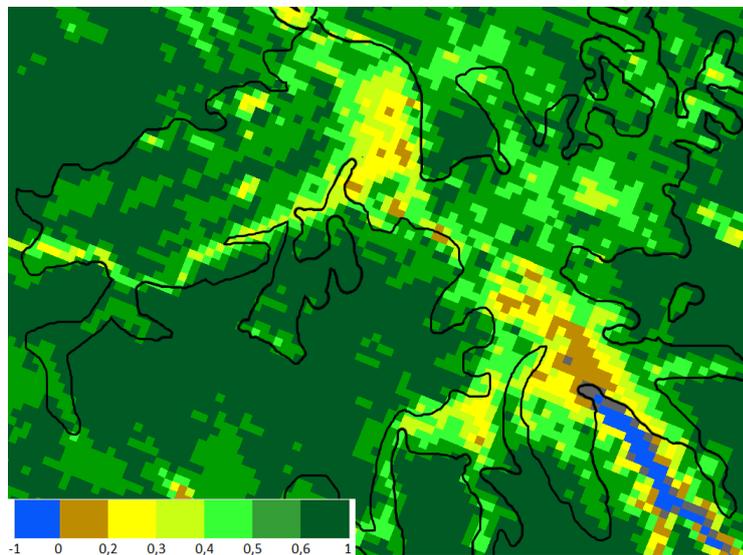


Рис. 3. Положение «острова тепла» агломерации Иркутск – Ангарск – Шелехов (показан черным контуром) по состоянию на 12 часов дня 1 июля 2019 г. в сопоставлении с распределением индекса NDVI (показан цветовыми градациями) на эту дату

Отрицательная корреляция между LST и NDVI указывает на то, что создание дополнительных зеленых зон в пределах городов и их пригородов могут ослабить эффект городских островов тепла данных населенных пунктов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, гранты № 17-29-05045, 20-45-380032.

Список литературы

1. Weng Q. Techniques and Methods in Urban Remote Sensing. New Jersey: Wiley-IEEE Press. 384 p.
2. LST estimation from NOAA-AVHRR data / J.A. Sobrino, Y. Julien, V. Hidalgo [et al.] // WATCH Technical Report. 2008. № 9. P. 9. URL: <http://www.eu-watch.org/media/default.aspx/emma/org/10039676/>. Watch+Technical+Report+Number+9+Estimation+of+Land+Surface+Temperature+using+AVHRR+sensors+on+the+NOAA+satellite.pdf.

E.N. Sutyrina

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

e-mail: ensut78@gmail.com

STUDYING THE URBAN HEAT ISLAND OF THE IRKUTSK – ANGARSK – SHELEKHOV AGGLOMERATION USING REMOTE SENSING DATA

The paper presents the results of studying the urban heat island of the Irkutsk-Angarsk-Shelekhov agglomeration. The dimensions of the urban heat island of the agglomeration were determined, and its daily, seasonal and long-term dynamics were studied based on AVHRR-derived land surface temperature data for the period from 1998 to 2019. The values of the temperature difference between the city and the suburbs was estimated, that reached 8–10 °C in summer during daytime.

Keywords: Irkutsk – Angarsk – Shelekhov agglomeration, surface temperature, AVHRR data, urban heat island.

УДК 528.8

Е.Н. Сутырина

Кандидат географических наук,

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

e-mail: ensut78@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ПРОБЕЛОВ В РЯДАХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Представлены результаты исследования возможности восстановления пропусков в рядах спутниковых наблюдений за температурой поверхности озера Байкал с применением интерполяции. Методом линейной интерполяции по времени восстановлены данные о распределении температуры поверхности озера и сопоставлены с опорными картохемами. Показано, что при незначительном, не превышающем 1,3 часа, расхождении по времени суток результата интерполяции и использовавшихся для интерполяции спутниковых данных можно восстанавливать значения температуры поверхности воды озера Байкал со средней абсолютной ошибкой не более 1 °C.

Ключевые слова: озеро Байкал, температура поверхности воды, данные радиометра AVHRR, линейная интерполяция по времени.

Введение. При изучении температурного режима озера Байкал по данным тепловых инфракрасных каналов приборов дистанционного зондирования серьезной помехой является облачность. Пропуски во временных рядах спутниковой информации, возникающие из-за облачного покрова, снижают полезность этих источников пространственных данных для оценки различных режимных характеристик водоёма, поэтому актуальным является вопрос о возможности применения интерполяции для устранения пропусков в данных о температуре поверхности воды при наличии облачности над акваторией озера Байкал.

Материалы и методы исследования. В работе использованы данные прибора AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), который установлен на борту околополярных метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). В рамках исследования отобрана серия снимков радиометра AVHRR с низким содержанием облачности за безледоставный период. По отобраным снимкам составлены картосхемы распределения температуры поверхности воды озера Байкал. Для картографирования температуры поверхности озера по данным AVHRR применялись адаптированные для региональных условий алгоритмы, основанные на дифференцированном определении температуры в различное время суток (день, ночь) и в различные месяцы (июнь – июль, август – сентябрь, октябрь–декабрь), использовании квадратичной модификации метода «расщеплённого окна прозрачности», и дополнительном привлечении информации видимого и ближнего инфракрасного каналов в дневное время суток. Применение разработанных региональных алгоритмов позволяет увеличить точность определения температуры поверхности воды до 0,4 °С в ночное время, и до 0,3 °С – в дневное время суток [1].

В рамках данного исследования анализируется возможность восстановления пропусков в рядах спутниковых данных о температуре поверхности озера Байкал с применением линейной интерполяции по времени. Расчёт интерполированных значений температуры поверхности воды $T_i^{(sim)}$, °С, в i -м пикселе в момент времени $\tau \in (\tau_1; \tau_2)$ произведён по формуле

$$T_i^{(sim)} = T_i^{(1)} \frac{\tau_2 - \tau}{\tau_2 - \tau_1} + T_i^{(2)} \frac{\tau - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (1)$$

где $T_i^{(1)}$ и $T_i^{(2)}$ – температура поверхности воды на обработанном с применением региональных алгоритмов спутниковом снимке в i -м пикселе в начальный τ_1 и конечный τ_2 моменты времени соответственно, °С.

Результаты исследования. Путём линейной интерполяции по времени спутниковых данных в итоге составлено 40 картографических изображений. Для интерполяции применялись пары спутниковых картосхем температуры, которые имели разницу по времени съёмки от 4 часов до 17 суток. На рис. 1А продемонстрирован пример распределения температуры на поверхности воды озера Байкал, полученной в результате линейной интерполяции спутниковых данных по времени (см. рис. 1, Б, В).

В ходе исследования проведено сравнение данных о температуре, полученных в результате интерполяции, с опорными, совпадающим по времени съёмки данными, оцененными по региональным алгоритмам непосредственно по спутниковым снимкам. На рис. 2 для примера приведено распределение опорных значений температуры поверхности воды озера Байкал, рассчитанных по региональным алгоритмам (см. рис. 2, А), и интерполированных значений температуры (см. рис. 2, Б), совпадающим по времени съёмки. Кроме этого, на рис. 2, В показано распределение абсолютных значений разности интерполированных и опорных значений температуры воды.

В работе также рассчитаны значения средней абсолютной ошибки интерполяции MAE по формуле

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i^{(sim)} - T_i|, \quad (2)$$

где T_i – опорное значение температуры поверхности воды в i -м пикселе, рассчитанное по данным AVHRR по региональным алгоритмам, °С; $T_i^{(sim)}$ – значение темпе-

ратуры поверхности воды, полученное с помощью интерполяции, °С; n – число пикселей, находящихся в пределах акватории озера Байкал.

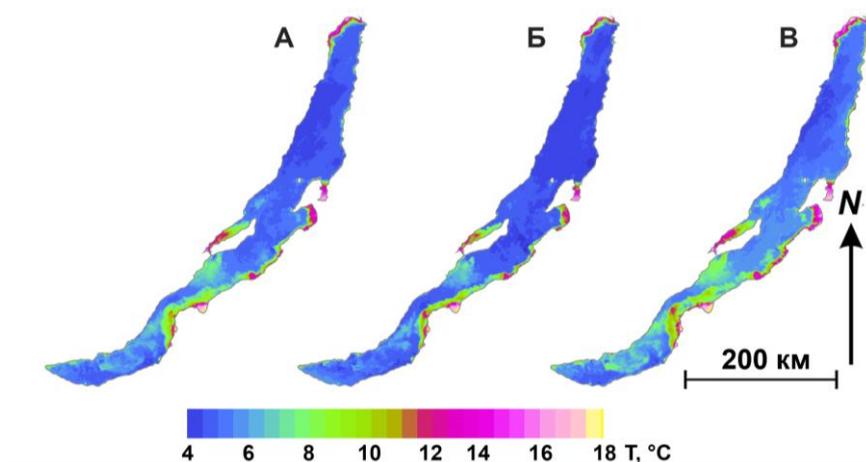


Рис. 1. Распределение температуры поверхности воды озера Байкал в 22:23 17 июня 2015 г. (А), полученное в ходе интерполяции спутниковых данных о температуре в 22:35 16 июня 2015 г. (Б) и в 22:12 18 июня 2015 г. (В) (время в UTC)

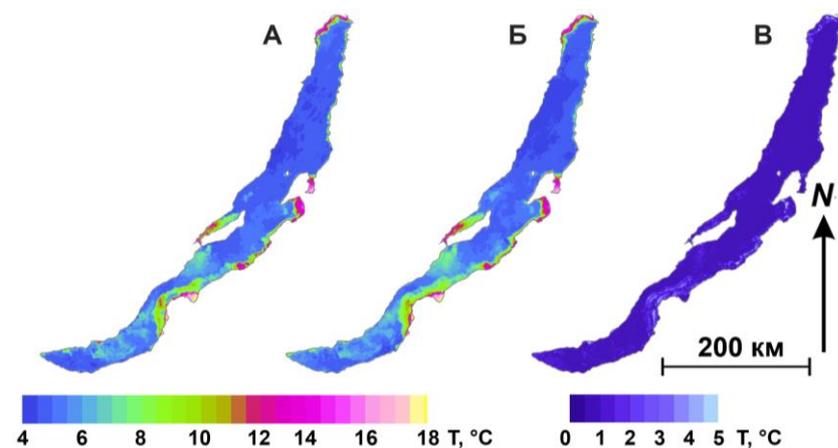


Рис. 2. Распределение температуры поверхности воды озера Байкал в 22:23 17 июня 2015 г.: А – рассчитанное по региональным алгоритмам по данным AVHRR; Б – полученное в ходе интерполяции спутниковых данных о температуре в 22:35 16 июня 2015 г. и в 22:12 18 июня 2015 г.; В – абсолютное значение разности интерполированной температуры и температуры, полученной по региональному алгоритму по данным AVHRR (время в UTC)

Величина MAE соотнесена со значениями сдвига по времени суток результатов интерполяции и исходных спутниковых данных о температуре, применявшихся для интерполяции (рис. 3). Видно, что, чем больше указанный сдвиг по времени суток, тем больше значение ошибки интерполяции MAE. Вероятно, это связано с суточной изменчивостью температуры поверхности озера Байкал, которая для водоёмов в умеренных широтах составляет около 2–5 °С [2].

При небольшом расхождении по времени суток результата интерполяции и использовавшихся для интерполяции снимков (см. рис. 2) – не более 1,3 часа, можно получать удовлетворительные результаты восстановления распределения температуры поверхности воды озера Байкал с ошибкой менее 1 °С (см. рис. 3), которая сопоставима с ошибкой определения температуры поверхности воды по данным AVHRR с применением ряда алгоритмов [3] и др. В случае незначительного сдвига по времени суток ошибки интерполяции связаны, как правило, с нелинейностью протекания различных динамических процессов в озере.

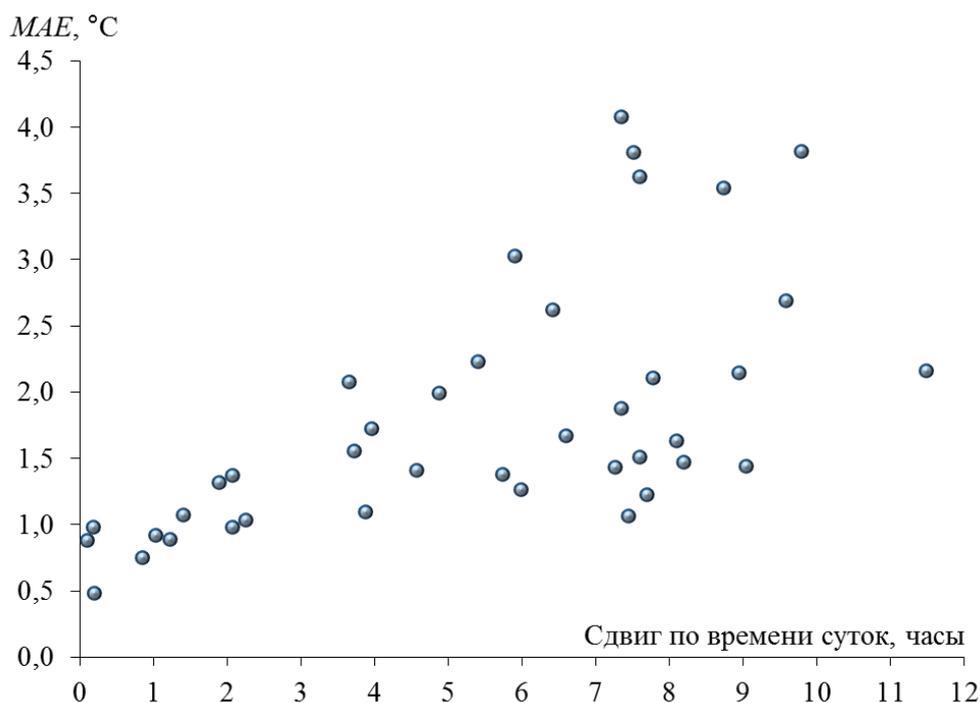


Рис. 3. Ошибки интерполяции температуры в сопоставлении со сдвигом по времени суток исходных снимков и результатов интерполяции

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 17-29-05045.

Список литературы

1. Сутырина Е.Н. Изучение внутренних водоемов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
2. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 2012. 584 с.
3. Comparison and validation of "sea surface temperature (SST)" using MODIS and AVHRR sensor data / M. Narayanan, D.T. Vasan, A.K. Bharadwaj [et al.] // International J. of Remote Sensing & Geoscience. 2013. Vol. 2, is. 3. P. 1–7.

E.N. Sutyryna

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
e-mail: ensut78@gmail.com

APPLICATION OF INTERPOLATION TO GAP-FILLING IN THE SERIES OF SATELLITE OBSERVATIONS OF THE TEMPERATURE REGIME OF LAKE BAIKAL

The paper is devoted to studying the possibility of filling gaps in the series of satellite observations of the water surface temperature of Lake Baikal using interpolation. The distribution of the surface temperature of the lake was reconstructed through time series linear interpolation and verified with reference maps. It was shown, that if the shift between the times of day of the interpolation result and of data used for interpolation was greater, then the error of interpolation was larger too. So, if the shift was not more than 1.3 hour, then the mean absolute error was less than 1 °C.

Keywords: Lake Baikal, water surface temperature, AVHRR data, temporal interpolation.

М.И. Таранюк¹, Ю.П. Мыльников Е.В. Колесникова

¹Кандидат географических наук

АО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия

e-mail: TaranyukMI@tomsknipi.ru; MylnikovYP@tomsknipi.ru;

KolesnikovaEV@tomsknipi.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ-НЕДРОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Рассмотрен опыт работы АО «ТомскНИПИнефть» в области экологического сопровождения с применением геоинформационных технологий и материалов космической съемки. Изучены материалы и методы дешифрирования на разных стадиях разработки месторождений, прямые и косвенные дешифровочные признаки. Проанализирована зависимость успешности косвенного дешифрирования от опыта и квалификации специалистов. Рассмотрено применение ДДЗ для решения задач паспортизации/инвентаризация и разработки планов производства работ по рекультивации загрязненных земельных участков. Используются архивы разновременных снимков для анализа динамики изменений состояния компонентов окружающей среды.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), дешифрирование, компоненты природной среды, антропогенное воздействие.

Экологическое сопровождение инвестиционно-строительных проектов – это система процедур, направленных на обеспечение экологической безопасности в районе строительства проектируемого объекта, охрану природной среды и здоровья человека от вредных воздействий работающего предприятия [1].

Экологическое сопровождение состоит из экологического обоснования и экологического мониторинга окружающей среды при реализации инвестиционно-строительного проекта.

В связи с наличием значительного массива данных различного формата, объединенных экологической тематикой, и необходимостью их применения для решения задач экологического сопровождения наиболее целесообразно применение геоинформационных технологий. В статье представлен опыт работы управления экологии АО «ТомскНИПИнефть» в части применении геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) для подготовки экологической документации на разных стадиях освоения месторождений.

Оценка современного состояния природной среды в рамках работ по экологическому обоснованию предполагает активное использование ДДЗ. Дешифрирование материалов ДДЗ позволяет получить качественную и количественную информацию о состоянии, составе, структуре, размерах, взаимосвязях и динамике процессов, явлений и объектов с помощью *дешифровочных признаков*. В зависимости от решаемых задач используется *визуальное дешифрирование* и *автоматическое* (автоматизированное). Последнее включает задачи классификации изображений, распознавания образов и, в итоге, машинного обучения как перспективного направления, обеспечивающего процесс самообучения алгоритмов распознавания [2].

На этапе предпроектной проработки для согласования размещения проектируемых объектов дополнительно используется метод визуального дешифрирования для уточнения фактического положения водных объектов, поскольку не всегда доступны актуализированные топографические карты. Особенностью данного этапа является широкий спектр используемых данных ДДЗ – от ортофотопланов, которые может предоставлять заказчик для организации и проведения инженерных изысканий, до снимков высокого и среднего разрешения, приобретаемых для различных видов работ по экологическому мониторингу. Дешифрирование проводится с учетом прямых и косвенных (индикационных) дешифровочных признаков. В качестве индикаторов используется информация о растительном покрове, рельефе и гидрографии прилегающей территории. В отличие от крупных и средних рек малые реки и ручьи на снимках среднего разрешения дешифрируются только по косвенным признакам, так как ширина русла значительно меньше размера пиксела изображения, к тому же русло обычно скрыто кронами деревьев. В лесной зоне индикатором наличия водотока может быть протяженный участок пойменно-луговой растительности [2].

Для подготовки и проведения работ по паспортизации/инвентаризации и разработки планов производства работ по рекультивации загрязненных земельных участков используется сочетание автоматизированного и визуального дешифрирования. Поскольку работы по геоинформационному экологическому сопровождению ведутся более 20 лет, то собран определенный объем информации об особенностях спектральных характеристик подстилающей поверхности, типичных для региона деятельности недропользователя, получивший свое отражение в серии публикаций «Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений» [3; 4]. Применение полученных данных позволяет сократить трудозатраты, затрачиваемые на предварительную обработку, в силу исключения необходимости повторных этапов классификации. Проведенные работы по выявлению загрязненных участков на основе ДДЗ и эталонных участков по материалам полевых работ предоставляют информацию для актуализации реестра загрязненных земель (33).

Таким образом, для каждого вида работ подбираются соответствующие материалы с необходимым пространственным разрешением, комбинацией спектральных каналов, что обеспечивает оптимальное различение объектов дешифрирования. Также в зависимости от длительности работ в регионе присутствия недропользователя формируются архивы разновременных снимков, позволяющих вести учет и анализ динамики изменений состояния компонентов окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов в границах лицензионного участка недр в период разработки, освоения, эксплуатации и ликвидации месторождений нефти и газа.

В перспективе накопленный опыт должен получить свое отражение в тематических каталогах дешифровочных признаков по регионам деятельности как составная часть системы сбора, обработки и хранения информации о состоянии окружающей природной среды.

Список литературы

1. Рекомендации по экологическому сопровождению инвестиционно-строительных проектов. М.: ГП «ЦЕНТРИНВЕСТпроект», 1998.
2. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учеб. пособие / А.Н. Шихов, А.П. Герасимов, А.И. Пономарчук, Е.С. Перминова. Пермь, 2020. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>.

3. Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений. Вып. 1. Инженерно-экологические изыскания территории нефтяных и газовых месторождений, инвентаризация и рекультивация нефтезагрязненных земель: аналит. обзор / А.Г. Гендрин, Г.А. Надоховская, Т.Н. Сидоренко [и др.]. Новосибирск, 2005. 112 с.

4. Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений. Вып. 3. Современные методы изучения болотных систем. Регламентирование деятельности недропользователей в условиях Западной Сибири: аналит. обзор / А.Г. Гендрин, Г.Г. Румянцева, В.П. Колмогоров [и др.]. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2007. 111 с.

M.I. Taranyuk, Y.P. Mylnikov, E.V. Kolesnikova

JSC TomskNIPIneft, Tomsk, Russia

e-mail: TaranyukMI@tomsknipi.ru; MylnikovYP@tomsknipi.ru;

KolesnikovaEV@tomsknipi.ru

THE USE OF EARTH REMOTE SENSINGS FOR SOLVING PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL SUPPORT OF ENTERPRISES-SUBSOIL USERS

The report examines the experience of JSC "TomskNIPIneft" in the field of environmental support with the use of geoinformation technologies and space survey materials. Materials and methods of decoding at different stages of field development. Direct and indirect decryption features. The success of indirect decryption depends on the experience and qualifications of specialists. The use of *ERS* to solve the problems of certification / inventory and development of plans for the remediation of contaminated land. Archives of multi-time images for analyzing the dynamics of changes in the state of environmental components.

Keywords: Earth Remote Sensing (ERS), image analysis and interpretation, components of the natural environment, anthropogenic impact

УДК 528.91:004.722.45

Р.А. Тисейко

Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Россия

e-mail: radiolyaria@gmail.com

ПРОЕКТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА БОГРАДСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ

Рассмотрены основы теории создания экологического каркаса как инструмента повышения функционально-целевых характеристик элементов региональной сети ООПТ. С помощью программного комплекса ArcGIS 10.1 на основе географических и экологических данных разработан ГИС-проект по созданию экологического каркаса Боградского района как части Республики Хакасия. Количество слоев в таблице содержания – 34, из них 11 линейных (гидрография, дорожная сеть, рельеф, граница района и др.), 20 полигональных, 2 точечных. Новизна исследования заключается в использовании комплексного и систематического подхода к разработке экологического каркаса, основанного не только на природной составляющей, но и отражающего систему природопользования территории.

Ключевые слова: ArcGIS, Богградский район, Республика Хакасия, экологический каркас, природный каркас, демозэкономический каркас.

Одной из важнейших задач современности является создание благоприятных условий для сохранения экосистем, рационального природопользования. С 2007 г. одним из этапов процесса формирования экологической устойчивости субъектов РФ является территориальное планирование [1]. Через него, в том числе, осуществляется создание ООПТ. Система ООПТ Республики Хакасия в настоящее время формируется без учета экологических и географических принципов. Функциональность охраняемых территорий регионального статуса ограничена нерациональным размещением. Инструментом, позволяющим повысить функционально-целевые характеристики элементов ООПТ, является экологический каркас (ЭК) территории.

В настоящее время имеется опыт формирования экологических каркасов (ЭК) для отдельных территорий Республики Хакасия [2]. Для устойчивого развития региона целесообразна разработка экологического каркаса всей Республики.

Представления о «экологическом каркасе» (ЭК) основаны на системе охраняемых природных территорий как пространственно и функционально взаимосвязанной совокупности участков различного назначения и использования [1]. Экологический каркас, по А.В. Елизарову (2006), – это вся территориальная совокупность геосистем (естественного и искусственного происхождения), выполняющих специфические функции по поддержанию экологического равновесия в регионе [3]. А.Г. Дюкарев (2001) указывает, что для поддержания основных функций ЭК должен включать следующие элементы: естественные и преобразованные природные территории и искусственные элементы. Основу ЭК составляет совокупность территорий с заповедным, регламентированным и щадящим режимами пользования (природный и демозэкономический каркасы) [4].

Наиболее доступным и техничным способом формирования ЭК является использование геоинформационных систем (ГИС), так как они способны обеспечить полноценное использование географической информации [5].

Проект экологического каркаса Богградского района разрабатывался с помощью программного комплекса ESRI ArcGIS 10.1. Количество слоев в таблице содержания – 34, из них 11 линейных (гидрография, дорожная сеть, рельеф, граница района и др.), 20 полигональных, 2 точечных. Подложкой проекта послужила базовая карта, основой для векторизации данных – топографическая карта масштаба 1 : 2 000 000. В качестве географической системы координат использовалась WGS1984. Для изучения растительного покрова применялись данные дистанционного зондирования.

Элементы демозэкономического каркаса на территории Богградского района представлены населенными пунктами и несанкционированными свалками, дорожной сетью, пашнями и экологически неблагоприятными территориями (Толчеинское месторождение баритов).

Элементы природного каркаса Богградского района представлены территориями с заповедным режимом, регламентированного и щадящего природопользования; территории с заповедным режимом – участком «Оглахты» ГПЗ «Хакасский». Территории со щадящим типом природопользования – землями лесного фонда, пастбищами и сенокосами. Территории реставрационного фонда составляют земли болот, гор без растительности, солончаков, степей, травянистой и кустарниковой поймы.

Конечным результатом картографического анализа стала интегральная карта угодий Богградского района. На основе информации, представленной в сводной карте, была выделена структура ЭК Богградского района. Ядрами являются ООПТ – участок ГПЗ «Хакасский», государственный природный заказник «Богградский». Коридорами ЭК будут являться водоохранные зоны и зеленые насаждения вдоль дорожной сети. Визуальный картографический анализ также показывает, что целесообразно расположение двух перспективных ядер.

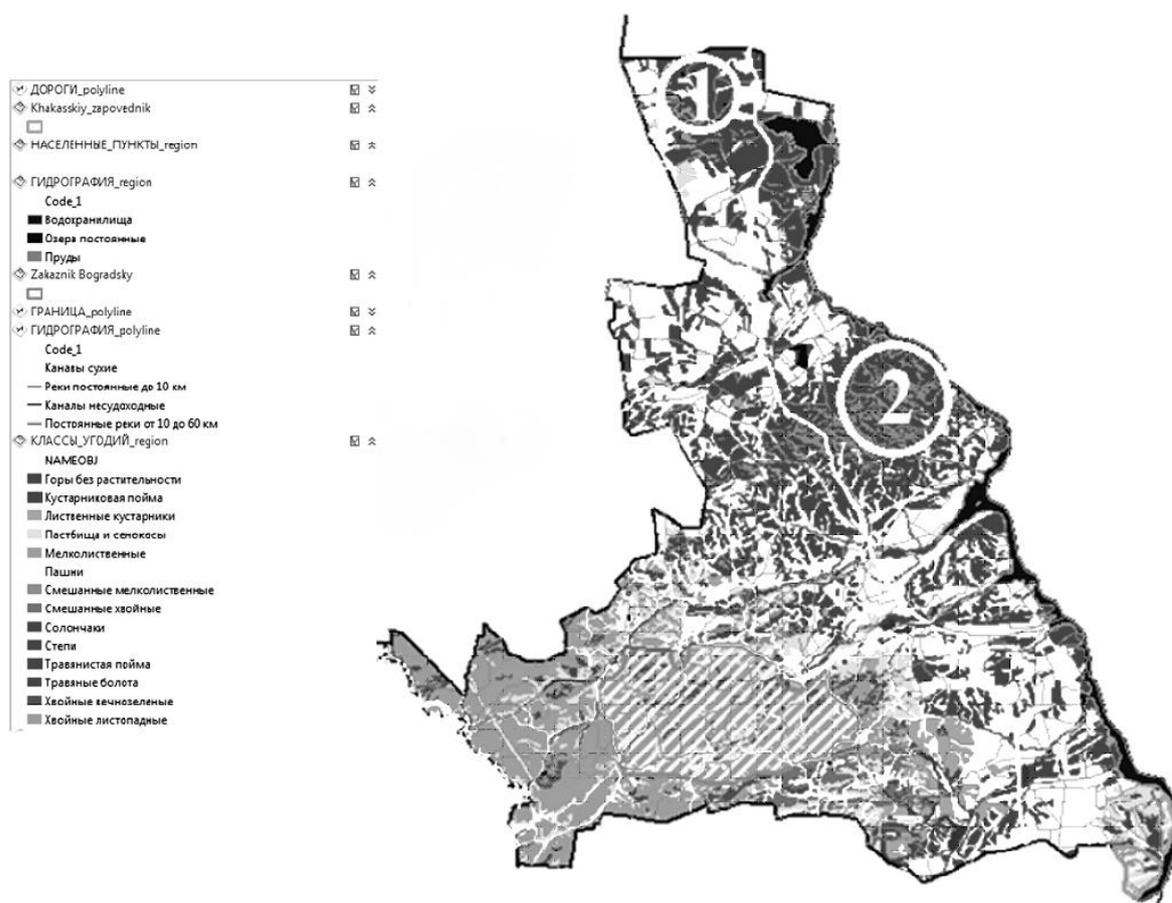


Рисунок. Интегральная карта угодий Богградского района; планируемое расположение перспективных ядер ЭК Богградского района

Участок 1 выбран ввиду расположения на данной территории неэксплуатируемых угодий – травяной и кустарниковой пойм. Участок 2 выбран по причине расположения на нем гор без растительности, солончаков, степей, травяных болот. Для повышения устойчивости возможно использование данных территорий для создания новых ядер в форме ООПТ регионального значения. Целесообразно проведение дополнительных исследований биоразнообразия, уточнение ареалов ряда редких видов флоры на данных землях.

Список литературы

1. Гриднев Д.З. Природно-экологический каркас в территориальном планировании муниципальных образований. URL: <https://www.dissercat.com/content/prirodno-ekologicheskii-karkas-v-territorialnom-planirovanii-munitsipalnykh-obrazovaniy>.

2. Павлова Е.В., Махрова М.Л. Экологический каркас Южно-Минусинской котловины. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23233788>.

3. Елизаров А.В. Экологический каркас – стратегия степного природопользования XX века. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskij-karkas-strategiya-stepnogo-prirodopolzovaniya-xxi-veka>.

4. Панченко Е.М., Дюкарев А.Г. Экологический каркас как природоохранная система региона. URL: <http://sun.tsu.ru/mminfo/000063105/340/image/340-216.pdf>.

5. Тисейко Р.А. Разработка пространственного модуля (ГИС-проект) экологического каркаса Богградского района Республики Хакасия. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-prostranstvennogo-modulya-gis-proekt-ekologicheskogo-karkasa-bogradskogo-rayona-respubliki-hakasiya>.

R.A. Tiseiko

Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

e-mail: radiolyaria@gmail.com

A PROJECT OF ENVIRONMENTAL FRAMEWORK OF THE BOGRAD DISTRICT OF THE REPUBLIC OF KHAKASIA

The article discusses the foundations of the theory of creating an ecological framework as a tool to improve the functional and target characteristics of the elements of the regional network of protected areas. A project was designed with the ArcGIS 10.1 software package and was developed on the basis of geographic and environmental data to create an ecological frame for the Bogradsky district, as part of the Republic of Khakassia. The number of layers in the table is 34, of which 11 are linear (hydrography, road network, relief, district border, etc.), 20 are polygonal, 2 are point. The novelty of the research contains in the use of an integrated and systematic approach to the development of an ecological framework, based not only on the natural component, but also reflecting the system of nature management of the territory.

Keywords: ArcGIS, Bogradsky District, Republic of Khakassia, ecological frame, natural frame, demoeconomic frame, the core of the ecological frame.

УДК 528.8

**К.А. Трошко^{1,2}, П.В. Денисов¹, О.Ю. Лаврова¹,
Е.А. Лупян¹, А.А. Медведев²**

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

e-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru; medvedev@igras.ru

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА НОРИЛЬСКОЙ ТЭЦ-3 29 МАЯ 2020 ГОДА

Представлены результаты дистанционного мониторинга последствий аварии на норильской ТЭЦ-3 29 мая 2020 г. и мероприятий по их ликвидации. Отмечается, что в течение суток после аварии пятно загрязнения прошло вниз по течению рек Далдыкан и Амбарная на 26,5 км, однако его дальнейшему распространению препятствовал, вероятно, ветровой нагон, что в целом способствовало локализации существенной части поверхност-

ных загрязнений в устье реки Амбарной и их последующему сбору. В результате наблюдения за озером Пясино по данным оптического и радиоволнового диапазонов не обнаружено явных поверхностных проявлений загрязнений. В работе обращается внимание на возможность затопления территории из-за паводков и сгонно-нагонных явлений, что необходимо учитывать при планировании дальнейших работ по ликвидации последствий аварии.

Ключевые слова: Норильск, разлив дизельного топлива, река Амбарная, озеро Пясино, чрезвычайная ситуация, спутниковый мониторинг.

29 мая 2020 г. около 12:45 по местному времени (5:45 UTC) на норильской ТЭЦ-3 (рис. 1) произошла авария – повреждение резервуара, в результате которого, согласно новостным источникам, утечке подверглось 20 тыс. м³ (17 тыс. т) дизельного топлива ([https://ru.wikipedia.org/wiki/Утечка дизельного топлива в Норильске](https://ru.wikipedia.org/wiki/Утечка_дизельного_топлива_в_Норильске)). Был загрязнен грунт, расположенные вблизи реки Далдыкан и Амбарная. Поскольку последняя впадает в озеро Пясино, отмечались возможные риски загрязнения как самого озера, так и Карского моря, связанных рекой Пясины. 3 июня 2020 г. в связи с разливом топлива в Красноярском крае был введен режим чрезвычайной ситуации федерального масштаба.

В работе кратко охарактеризованы результаты наблюдения последствий аварии и работ по их ликвидации по спутниковым данным дистанционного зондирования Земли.



Рис. 1. Район аварии. Розовая точка – расположение аварийного нефтехранилища, красная – участок реки Амбарной, на котором по спутниковым данным зафиксировано максимальное приближение пятна к озеру Пясино

В первые дни после аварии дистанционное наблюдение территории выполнено съемочными системами космических аппаратов *Landsat*, *Sentinel*, *PlanetScope* и *SkySat*. Самые ранние данные получены со спутников группировки *PlanetScope* 30 мая в 01:46 и 05:30 UTC (рис. 2, *а*) [1].



Рис. 2. Район аварии на разновременных спутниковых изображениях:
а – *PlanetScope*, 30.05.2020 (05:30 UTC); *б* – *Sentinel-2*, 31.05.2020 (06:09 UTC),
в – *Sentinel-2*, 01.06.2020 (06:29 UTC); *г* – *PlanetScope*, 04.06.2020 (05:31 UTC),
д – *Sentinel-2*, 13.06.2020 (06:20 UTC)

Полученные изображения интересны прежде всего тем, что активные мероприятия по ликвидации загрязнения начались лишь 31 мая – 1 июня, а на момент съемки нефтепродукты беспрепятственно распространялись по рекам Далдыкан и Амбарная. С момента аварии до съемки *PlanetScope* основная часть загрязнения прошла путь почти в 26,5 км и сконцентрировалась в устье реки Амбарной. Однако на изображении *Sentinel-2*, полученном на следующей день, можно заметить, что видимая часть пятна переместилась выше по течению реки Амбарной. Кроме того, видно, что загрязненной оказалась одна из проток, соединяющих реку Амбарную

с озером, расположенным восточнее нее (рис. 2, б). «Возвращению» пятна вверх по течению, не позволившему ему попасть в озеро, поспособствовал, вероятно, ветровой нагон: между съемками *PlanetScope* 31 мая в 01:46 UTC и *Sentinel-2* 31 мая в 06:09 UTC скорость ветра северного направления увеличилась с 2 до 8 м/с (<https://rp5.ru/>). 1 июня пятно вновь начало спускаться вниз по течению, но на момент съемки оно уже было остановлено боновыми ограждениями (рис. 2, в). 4 июня к востоку от реки Амбарной начали проследиваться следы движения транспорта (рис. 2, г), не наблюдавшиеся на изображении от 1 июня. Появление первых емкостей для сбора загрязненного грунта и топливно-водной смеси восточнее реки Амбарной зафиксировано на изображениях *SkySat* от 5 июня, 08:23 UTC. С тех пор их количество постоянно росло, и в середине июня их насчитывалось уже более 90. В основном они сосредоточены на участке, показанном на рис. 2, д, несколько емкостей размещено также выше по течению реки Амбарной и в районе ТЭЦ-3. В целом проведенный анализ серии спутниковых изображений позволяет сделать вывод, что значительная видимая часть пятна загрязнения после «возвращения» вверх по течению нагоном была локализована и собрана.

За период с момента возникновения аварии до середины июня также проведен детальный анализ спутниковых данных (как оптического диапазона, так и радиолокационных), полученных над акваторией озера Пясино. Проведенный анализ не выявил никаких проявлений наличия нефтепродуктов на его поверхности. В то же время нельзя исключать, что в озеро могли попасть растворенные в воде летучие органические вещества и некоторые тяжелые фракции дизельного топлива, не успевшие осесть на дне и берегах рек Далдыкан и Амбарная. Нельзя исключать и того, что в дальнейшем с берегов рек могут смываться и даже попасть в озеро остаточные загрязнения. Это обуславливает необходимость проведения дальнейшего мониторинга рек, ближайших мелких водоемов, в которые по протокам попали нефтепродукты, и озера Пясино.

Негативно повлиять на развитие ситуации с распространением загрязнений и ликвидацию последствий аварии могла бы достаточно большая динамичность положения кромки воды на берегах (особенно южных, куда впадает река Амбарная) озера Пясино. Например, на радиолокационных изображениях *Sentinel-1*, полученных 7 и 9 июня, видно, что в некоторых местах граница водного зеркала за два дня поменяла положение на несколько километров: участки, покрытые водой только 7 июня, показаны красным цветом на рис. 3. Это, вероятно, можно объяснить небольшой глубиной прибрежных частей озера и сгонно-нагонными явлениями (во время съемки *Sentinel-1* 7 июня, по данным аэропорта «Норильск», наблюдался ветер СВВ направления, дующий со скоростью 13 м/с, а 9 июня – ЗЮЗ направления и скоростью 2 м/с). Отмеченное на рис. 3 максимально близкое к озеру положение пятна загрязнения, зафиксированное по спутниковым данным от 30 мая, находится примерно всего в 400 м от границы водного зеркала, которая наблюдалась 7 июня.

Анализируя спутниковые изображения района аварии, полученные в предыдущие годы, можно сказать, что 2020 г. оказался достаточно благоприятным для проведения работ по локализации пятна загрязнения и его сбора. К концу мая в районе аварии практически полностью сошел снежный покров, крупных осадков и паводка в мае – июне не наблюдалось. В то же время в различные годы (например, в 2005, 2008, 2012, 2014, 2018, 2019) здесь наблюдались значительные весенние паводки, которые полностью или частично затапливали участки, где летом 2020 г. проводились работы по ликвидации загрязнений (рис. 4).

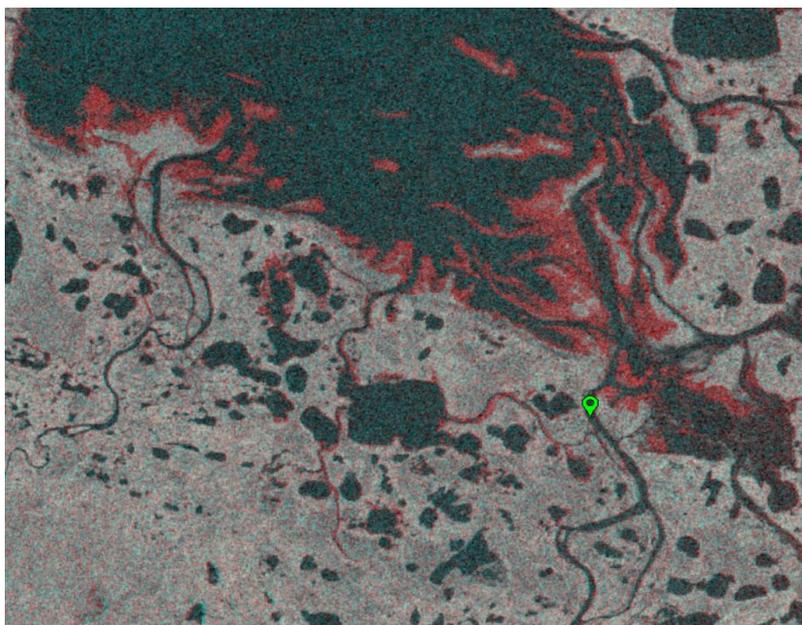


Рис. 3. Многовременное цветосинтезированное изображение *Sentinel-1*: *R* – 09.06.2020, *G* и *B* – 07.06.2020, поляризация ВГ. Зеленой точкой обозначен участок реки Амбарной, до которого, согласно данным *PlanetScope*, 30.05.2020 распространилось пятно загрязнения

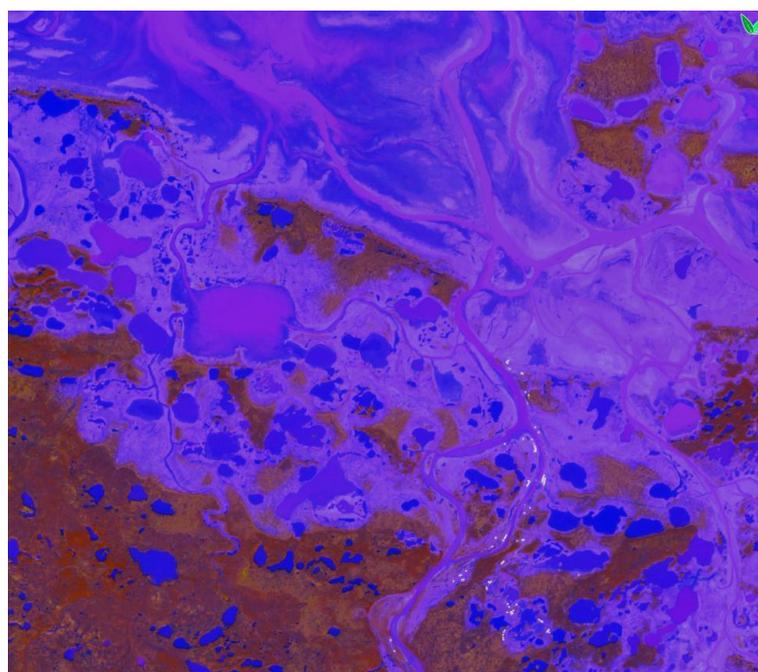


Рис. 4. Многовременное цветосинтезированное изображение, сформированное на основе данных *Sentinel-2* от 13.06.2020 и 11.07.2019. Белые точки – емкости для сбора топливно-водной смеси и грунта. Участки, покрытые водой в июле 2019 г., отображены оттенками синего и фиолетового цветов

В целом, по данным спутникового мониторинга о результатах аварии, произошедшей 29 мая 2020 г. на норильской ТЭЦ-3, можно сделать следующие выводы:

- существенная часть поверхностных загрязнений, попавших в реки Далдыкан и Амбарная (во многом благодаря сложившейся метеобстановке) локализовалась, и в ходе работ по ликвидации была собрана, т.е. масштабного попадания загрязнения в озеро Пясино допущено не было;
- наблюдение озера Пясино вплоть до середины июня не выявило существенных поверхностных проявлений загрязнений, которые могли быть связаны

с аварией. Однако вопрос попадания в озеро растворенных в воде загрязнений требует проведения дальнейших исследований;

- район проведения работ по ликвидации последствий аварии в различные годы подвергался масштабным затоплениям, и риски их возможного возникновения следует учитывать при планировании эвакуации собранных загрязнений с участков их текущего расположения.

Для анализа спутниковых данных использовалась система Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>) [2], входящая в состав Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [3], развиваемая и поддерживаемая в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164), в частности, использованы инструменты анализа данных, созданные при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-29-24121 мк). В рамках темы Госзадания ИГ РАН № АААА-А19-119022190168-8 собраны и обработаны данные высокого разрешения PlanetScope, полученные по индивидуальной научно-образовательной лицензии [4].

Список литературы

1. Planet Surface Reflectance Product. White paper. Planet Labs, 2018. 10 p.
2. 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.
3. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-163-151-170.
4. Planet Team. Planet application program interface // Space for Life on Earth. San Francisco, CA. 2020. URL: <https://api.planet.com>.

К.А. Troshko^{1,2}, P.V. Denisov¹, O.Yu. Lavrova¹,
Е.А. Loupian¹, А.А. Medvedev²

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

²Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

e-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru; medvedev@igras.ru

SATELLITE MONITORING OF THE CONSEQUENCES OF THE ACCIDENT AT THE NORILSK THERMAL POWER PLANT NO. 3 ON MAY 29, 2020

The paper presents the results of satellite monitoring of the consequences of the accident at the Norilsk power plant no. 3 on May 29, 2020 and the activity on its liquidation. During the first day after the accident the pollution slick passed downstream the Daldykan and Ambarnaya rivers by 26.5 km, however its further motion was probably prevented by a wind surge. Generally this contributed to the significant localization of the pollution and its subsequent collection. Monitoring of Pyasino Lake using optical and radar satellite data did not reveal notable traces of surface pollution associated with the accident at the power station. It is also noted that the area of interest is subject to floods and surges so this fact should be taken into account when planning further works to eliminate the consequences of the accident.

Keywords: Norilsk, diesel spill, Ambarnaya River, Pyasino Lake, emergency, satellite monitoring.

Р.Т. Хазияхметов

Аспирант, Ижевский государственный технический университет
им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия
e-mail: rysel777@inbox.ru

**ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ИНТЕРПРИТАЦИИ ГЕОДАННЫХ
СКАНИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД, ПОДВЕРГАВШИХСЯ
ТЕХНОГЕННЫМ И АНТРОПОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**

Работа посвящена внедрению искусственного интеллекта в геоинформационные системы с целью получения новых полезных знаний. Объектом исследования является природная среда, подвергавшаяся техногенным и антропогенным воздействиям. Проведена и обобщена терминология искусственного интеллекта, экспертных систем применительно к дистанционному зондированию земли. Цель работы – проанализировать необходимость создания прикладного программного обеспечения на основе технологии экспертных систем, нейронных сетей и искусственного интеллекта для анализа геоинформационных данных. Создание математического обеспечения с применением искусственного интеллекта, нейронных сетей и технологии экспертных систем существенно повысят качество и производительность анализа геоданных.

Ключевые слова: геоданные, антропогенное воздействие, техногенное воздействие, экспертная система, искусственный интеллект, эвристический метод.

Решение задач развития рационального природопользования невозможно без разработки новых эффективных методов оценки характеристик и состояния природных объектов и природных сред, подвергавшихся техногенным и антропогенным воздействиям. Объекты исследований: рациональное природопользование; площадные объекты растительных грунтов; локальные объекты исторических территорий и погребённых технических систем. Наиболее массовые – площадные объекты растительных покровов и грунтов, а также локальные объекты исторических территорий и погребённых технических систем. Эти объекты являются, с одной стороны, одним из основных ресурсов России, а с другой – они наиболее трудны для оценки их состояния ввиду значительного разнообразия и огромных площадей. Именно для таких объектов важно проводить мониторинг состояния и оценку ресурсов, в том числе потому что они являются индикаторами различных процессов загрязнения и чрезвычайных ситуаций. Для изучения природных сред разрабатывается технология искусственного интеллекта, нейронных сетей и экспертных систем.

Цель работы – проанализировать необходимость создания прикладного программного обеспечения на основе технологии экспертных систем, нейронных сетей и искусственного интеллекта для анализа геоинформационных данных.

Экспертной системой (*expert system*) признаётся компьютерная программа, разработанная для предоставления определённой базы данных, а также для оценки информации в определённой области. Изучение экспертных систем является одной из задач программы разработки искусственного интеллекта. Экспертные системы призваны дать возможность человеку, который не является в данной области специалистом, получить суждение по вопросу из этой области.

Основная идея создания экспертной системы состоит в предположении, что суммарный опыт нескольких специалистов может быть представлен в базе данных, которой может воспользоваться неспециалист. К настоящему времени эти системы созданы для таких областей, как химия, медицина (главным образом для практической деятельности врача, который занимается лечением определённой болезни), для промышленности, исследований космоса, метеорологии, в машиностроении, образовании, военном деле, робототехнике [1]. Самообучающаяся (*self-learning*) экспертная система способна автоматически добавлять новую информацию к своему банку данных, когда вопрос программы к пользователю приводит к вводу пользователем нового правила или дополнительной информации [1]. Экспертная система использует эвристический метод. Эвристический (*heuristic*) метод основан на опыте, главным образом на результате метода проб и ошибок. Эвристические программы могут изменяться в зависимости от воздействий пользователя и модифицировать сами себя. Программы такого типа являются предметом исследований по проблеме создания искусственного интеллекта [1].

Потребуем, чтобы искусственный интеллект (*artificial intelligence*), необходимый для анализа геоданных, имитировал решение человеком сложных задач, связанных с аккумулярованием и анализом различных видов геоданных. Примерами использования искусственного интеллекта является «экспертная система», «интеллектуальная система» и «компьютерное зрение».

Для исследования используются подготовленные геоданные, импортируемые в экспертную систему.

Под геоданными (*geodata*) понимаем данные о геосистемах или их компонентах, представленные в графической, цифровой или иной форме, удобные для фиксации и обработки человеком или автоматическим устройством. Обычно геоданные содержат сведения о местоположении объектов и их свойствах (атрибутах) [2].

Геоданные содержат информацию:

- об особенностях поверхности Земли;
- объектах, расположенных на поверхности исследований (дорога и др.);
- объектах, расположенных в грунте (трубопроводы, памятники археологии).

Отметим, что геоданные являются синонимом пространственных данных.

Пространственные данные (*spatial data, geographic(al) data, georeferenced data*) — данные о пространственных объектах, их местоположении и свойствах, представленные в аналоговой или цифровой формах, в том числе в виде геоизображений. В узком смысле под пространственными данными понимают только данные, представленные в виде, пригодном для автоматической обработки. Они составляют основу информационного обеспечения геоинформационных и автоматических картографических систем и состоят из двух взаимосвязанных частей: позиционных (тополого-геометрических) и атрибутивных (тематических, семантических) данных [2]:

- Геоданные (исходные данные) – данные дистанционного зондирования Земли (многозональная и тепловизионная съёмка) и данные геофизики приповерхностных слоёв грунта (электроразведка, магниторазведка, георадарная съёмка).
- Многозональная съёмка – это фитоиндикация, которая выявляет участки с большей мощностью гумусированного слоя.
- При анализе изображений тепловизионной съёмки «тёмные» области – это участки с большей мощностью гумусированного слоя.
- Георадар. В излучаемую среду излучается электромагнитная волна, которая отражается от разделов сред и различных включений. Отражённый сигнал принимается и записывается георадаром.

Задача исследования состоит в создании компьютерной программы, обнаруживающей области с характерными свойствами. Идентификация объекта на каждом типе данных проявляется по-разному. Например, лесная вырубка характеризуется отсутствием леса (форма и структура лесной вырубки однородна относительно окружающей территории, где произрастает лес). Вырубка леса имеет чёткую границу. Применительно к лесной вырубке перечислена оптимальная система признаков, которая обеспечит лучшую сегментацию.

Одна из первостепенных задач – найти математический метод, чтобы связать разрозненные данные. Другими словами, математический метод должен быть таким, чтобы выделить общие инварианты, которые не меняются от одних данных к другим; разработать алгоритм, позволяющий сравнивать цифровые изображения, содержащий разрозненные данные в виде набора пикселей с припиской к каждому пикселу некоторого числа. Математическая обработка геоданных позволяет выявить участки природной среды, отличающиеся от окружающей территории. Математические методы дают возможность распознавать области на снимке путём преобразования в численные данные. Пиксель можно сфотографировать и распознать. По пиксельному сравнению выделяется значение пикселя в разных диапазонах.

На начальном этапе возможно применение математического программного обеспечения ENVI версии 4.2 и выше или (и) Mapinfo.

Геоданные природных сред, подвергавшихся техногенным и антропогенным воздействиям, отличаются друг от друга.

Антропогенный (буквально – *порождённый человеком*) – каким-либо образом связанный с деятельностью человека. Антропогенное воздействие – прямое и косвенное влияние человечества на окружающую его среду. Например, антропогенное влияние на природу оказывают множество различных факторов (чаще негативных), изменяющих природные комплексы и процессы, сложившихся в ходе эволюции биосферы. К ним относятся преобразование ландшафтов (вырубка лесов, распашка земель, рост городов, трубопроводы, археологические памятники и др.), загрязнение окружающей среды, нарушение биогеохимических циклов, регулирование речного стока и другие [3].

К техногенным воздействиям относятся разливы нефти или химикатов при авариях, выбросы заводов, свалки промышленных отходов и др.

С помощью дистанционного зондирования определяются свойства объектов, подвергавшихся каким-либо воздействиям на земной поверхности, полученные с помощью воздушных летательных аппаратов и искусственных спутников Земли [4].

Рассмотрим принцип истинного и наблюдаемого изображения. Наблюдение за поверхностью Земли осуществляется авиационными и космическими средствами, оснащёнными различными видами съёмочной аппаратуры. Авиационные средства наблюдения за окружающей средой и полученные фото данные хорошо себя зарекомендовали в Удмуртской Республике. Например, с помощью беспилотных летательных средств проведено зондирование объекта по утилизации химического оружия в городе Камбарке. Полученные данные аэрофотосъёмки были импортированы в программное обеспечение Mapinfo, обработаны математиками отдела анализа сигналов и изображений БУН «Физико-технический институт» УРО РАН (Ижевск) как в ручном режиме с применением стандартных методик обнаружения патогенных химических веществ, так и с помощью различных индексов вегетации с применением собственных экспериментальных разработок. По данным аэросъёмки было установлено, что завод по утилизации химического оружия в городе Камбарке не оказывает губительного воздействия на окружающую флору и фауну.

По данным космической съёмки в видимом диапазоне земной участок можно классифицировать как линейный объект, площадной объект, компактный объект. Линейный объект является пространственно протяжённым с геометрическими параметрами как длина, которая во много раз больше ширины. Площадной объект с геометрической точки зрения имеет однородную структуру с протяжённой границей и измеримую площадь. Компактный объект является локализованным и обособленным, с геометрической точки зрения представляет точку на плоскости.

Факторы, влияющие на достоверность полученных данных, – рассеянные и взвешенные частицы, характеризующие состояние атмосферы.

Пусть x – истинное изображение, y – наблюдаемое изображение. Тогда получим уравнение вида $Y = Bx$, когда истинное и наблюдаемое изображение представляются векторами x , y , матрица линейного оператора «искажения» B может в общем случае оказаться необратимой, и различные решения x уравнения $A = Bx$ могут находиться далеко друг от друга.

Таким образом, проведен разбор терминологии, появляющийся с необходимостью проникновения новых информационных технологий в науку о Земле. Обобщённый материал позволяет достоверно определить и доказать возможность создания математического софта с искусственным интеллектом на основе экспертных систем и нейронных сетей в области дистанционного зондирования Земли.

Список литературы

1. Синклер А. Экспертная система. Большой толковый словарь компьютерных терминов. Русско-английский, англо-русский. М.: Вече: АСТ, 1999. 512 с.
2. Берлянт А.М. Картографический словарь. М.: Науч. мир, 2005. 424 с.
3. Наймарк Е.Б. Антропогенный. Большая Российская энциклопедия: в 30 т. / председатель науч. ред. совета Ю.С. Осипов; отв. ред. С.Л. Кравец. Т. 2. Анкилоз-Банка. М.: Большая Российская энциклопедия, 2005. 766 с.
4. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

R.T. Khaziyakhmetov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia
e-mail: rysel777@inbox.ru

EXPERT SYSTEM OF INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL DATE OBTAINED BY SCANNING NATURAL MEDIA SUBJECTED TO TECHNOGENIC AND ANTHROPOGENIC

The work is devoted to the introduction of artificial intelligence into geographic information systems in order to obtain new useful knowledge. The object of the research is the natural environment subjected to technogenic and anthropogenic influences. The terminology of artificial intelligence and expert systems as applied to remote sensing of the earth is carried out and generalized. The aim of the work is to analyze the need to create applied software based on the technology of expert systems, neural networks and artificial intelligence for the analysis of geoinformation data. Creation of software using artificial intelligence, neural networks and expert systems technology will significantly increase the quality and productivity of geodata analysis.

Keywords: geodata, anthropogenic impact, technogenic impact, expert system, artificial intelligence, heuristic method.

А.Н. Шихов, Р.К. Абдуллин, И.О. Ажигов

Пермский государственный национальный
исследовательский университет, Пермь, Россия
e-mail: and3131@inbox.ru

КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ БАЗА ДАННЫХ СЛУЧАЕВ КОНВЕКТИВНЫХ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Рассмотрена структура и информационное наполнение картографической базы данных конвективных опасных явлений погоды (КОЯП) для территории Центрального федерального округа (ЦФО). Отличием разрабатываемой базы данных от существующих аналогов является ее структура, включающая сведения о самих явлениях, их последствиях, а также связи с ранее опубликованными базами данных о случаях смерчей и крупных ветровалов в лесной зоне. База данных включает дополнительную информацию об условиях возникновения КОЯП, в частности характеристики мезомасштабных конвективных систем по данным с метеорологических спутников и параметры неустойчивости атмосферы по данным систем реанализа. База данных разрабатывается под управлением СУБД PostgreSQL, а доступ к ней будет реализован через картографический веб-сервис.

Ключевые слова: конвективные опасные явления погоды, мезомасштабные конвективные системы, Центральный федеральный округ, картографическая база данных.

Ежегодно на территории России фиксируется от нескольких десятков до сотен случаев конвективных опасных явлений погоды (КОЯП) – сильных ливней, шквалов крупного града и смерчей, которые характеризуются относительно низкой заблаговременностью прогноза. КОЯП приводят к существенным социально-экономическим последствиям, в том числе к гибели людей. Ряд исследований показывает, что на фоне современного изменения климата условия для развития глубокой конвекции и, соответственно, связанных с ней КОЯП могут стать более благоприятными [1–3]. Подтвердить или опровергнуть эту гипотезу применительно к конкретному региону часто не позволяет отсутствие многолетней и репрезентативной (независимой от плотности населения и наблюдательной сети) информации о случаях КОЯП. Закономерности пространственно-временного распределения КОЯП остаются сравнительно малоизученными по причине ограниченности выборки, обусловленной локальным характером этих явлений.

В последние годы в мире существует тенденция к более детальному документированию случаев КОЯП, в том числе пропущенных метеостанциями. Так, в США в течение многих лет ведется база данных о случаях смерчей (с геокодированием), включающая уже свыше 65 тыс. записей [4]. Европейская база данных опасных явлений погоды ESWD включает сведения о КОЯП, а также сильных осадках и гололедных явлениях [5]. Важнейшим источником пополнения ESWD являются сведения очевидцев и СМИ, которые затем проходят экспертную верификацию с присвоением соответствующего статуса каждому отчету об ОЯ. Создание подобных баз данных имеет значение не только для оценки пространственно-временного распре-

деления ОЯ, но и для последующего изучения условий их возникновения, а также для верификации моделей прогноза [6; 7].

Для территории России в настоящее время доступны следующие официальные источники данных о случаях КОЯП:

- данные метеостанций (срочные наблюдения <http://meteo.ru/data/345-atmosfernye-yavleniya-sroki>), а также отдельно наблюдения за характеристиками погоды (<http://meteo.ru/data/163-basic-parameters>);
- ежемесячные обзоры в журнале «Метеорология и гидрология»;
- база данных ЕСИМО об опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших ущерб (<http://data.oceaninfo.ru/applications/disaster/index.jsp>).

Перечисленные информационные ресурсы не являются репрезентативными. Большое количество явлений, в том числе со значительным ущербом, пропускается из-за редкой метеорологической сети, также в ряде случаев некорректно определяется тип явления (например, шквал или смерч). Это свидетельствует об актуальности систематизации данных о случаях КОЯП для территории России и их публикации на открытых сервисах. В последние годы повысить репрезентативность данных о случаях КОЯП (шквалов и смерчей) позволяет анализ нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам [8; 9]. В настоящей работе рассматривается структура и информационное наполнение картографической базы данных КОЯП, разрабатываемой авторами для территории ЦФО.

Основной в структуре базы данных является таблица отчетов о КОЯП, зафиксированных по данным метеостанций или в населенных пунктах (point reports). Данные об этих случаях получены на основе анализа нескольких основных источников: данных наблюдательной сети, сведений о случаях КОЯП и нанесенном ущербе, опубликованных в СМИ и социальных сетях, информации из внешних баз данных, в частности ESWD и базы данных ЕСИМО, ежемесячных обзоров в журнале «Метеорология и гидрология». Пространственная привязка отчетов осуществляется по положению пункта наблюдательной сети (через WMO ID) или по идентификатору населенного пункта в OpenStreetMap.

Для каждого точечного отчета о КОЯП определены следующие характеристики: дата, время, точность определения времени, способ регистрации явления (по данным наблюдательной сети, по данным очевидцев или по нанесенному ущербу), местоположение (субъект РФ, район, населенный пункт), тип явления, интенсивность, число погибших, пострадавших и величина нанесенного ущерба (при наличии). Также приведено краткое текстовое описание самого явления и нанесенного ущерба с указанием ссылок на источники информации.

Поскольку источником возникновения КОЯП являются мезомасштабные конвективные системы (МКС), следующим этапом формирования базы данных является получение информации об МКС. За период с 2001 по 2011 г. для этого использованы снимки Terra/Aqua MODIS, недостатком которых является сравнительно низкое временное разрешение (два раза в сутки для каждого спутника). В связи с этим лишь 53 % случаев КОЯП имеют привязку к характеристикам МКС. За период с 2012 г. по настоящее время доступны спутниковые данные Meteosat второго поколения (с 12-канального радиометра SEVIRI), с частотой съемки каждые 15 мин. Это позволяет получить информацию о характеристиках МКС для всех случаев КОЯП, за исключением тех, для которых не определено время возникновения. По спутниковым данным определены основные характеристики МКС на момент получения снимков: тип, минимальная температура верхней границы облаков (ВГО), диаметр по большой и малой полуоси, наличие сигнатур, указывающих на сильные восходящие потоки. Также для каждого

случая приведены изображения МКС в синтезе HRVCloud на основе видимого канала высокого разрешения (HRV) и теплового канала infrared 10.8 мкм [10], а также температура ВГО на основе канала infrared 10.8 мкм.

При формировании базы данных о случаях КОЯП на территории ЦФО также настроены связи с ранее опубликованными базами данных смерчей в Северной Евразии [11] и ветровалов в лесной зоне Европейской России [9]. Смерчи представлены в базе данных как линейные объекты (если известны координаты начала или конца пути смерча) или точечные по координатам местоположения, где наблюдался смерч. Всего для территории ЦФО за 2001–2020 гг. доступны данные о более чем 300 случаях смерчей (из них 54 с интенсивностью F2 и выше по шкале Фуджита) и 131 случае значительных ветровалов, вызванных шквалами или смерчами. Частично эти массивы данных пересекаются. В атрибутивных таблицах слоев смерчей и ветровалов содержится информация, которая отсутствует в основной таблице, поскольку она является специфичной именно для этого типа явлений (смерчей) или ущерба от КОЯП (ветровалов).

Для каждого случая смерчей и ветровальных нарушений лесного покрова определены идентификаторы, на основе которых реализована их связь с отчетами о КОЯП по данным наземных наблюдений, а также с характеристиками МКС по спутниковым данным. Таким способом решается важнейшая задача получения комплексной информации о каждом случае КОЯП, в том числе характеристик МКС, с которыми связаны эти явления. Также в виде отдельных таблиц в базе данных представлена информация об условиях возникновения КОЯП, которые определяются значениями диагностических переменных – индексов неустойчивости [11; 12]. Диагностические переменные рассчитываются по данным реанализов CFS и ERA5. Анализ их значений на обширной выборке данных позволит определить характеристики состояния атмосферы, благоприятные для возникновения КОЯП и значимые для их краткосрочного прогноза.

В настоящее время в базу данных включены 433 случая КОЯП за период с 2001 по 2012 г. Из них 230 зафиксировано по данным метеостанций и постов (в основном очень сильные дожди), 170 – по данным об ущербе и 33 – по фотографиям и видеозаписям очевидцев. В распределении по типам явлений преобладают очень сильные дожди и сильные ливни с комплексом неблагоприятных явлений (179 случаев), также зафиксирован 151 случай шквалов, 46 смерчей (наблюдавшихся очевидцами или нанесших ущерб) и 57 случаев крупного града. Важнейшими источниками данных о случаях КОЯП за период до 2012 г. являются данные метеостанций и обзоры в журнале «Метеорология и гидрология» (в сумме 59,8 % случаев), а также база данных смерчей в Северной Евразии (17,5 % случаев, часть из которых является скорее шквалами, чем смерчами). При этом важно отметить, что в ESWD имеется информация лишь о 40 % случаев КОЯП на территории ЦФО по обработанным данным за 2001–2012 гг.

Для управления базой данных и ее редактирования используется свободная объектно-реляционная СУБД PostgreSQL с установленным расширением PostGIS, которое обеспечивает возможность хранения пространственных данных в реляционной базе данных. Обеспечение открытого доступа к базе данных в сети Интернет будет реализовано путем создания картографического веб-приложения с использованием стека технологий HTML5, CSS3, JavaScript и PHP. Для публикации и отображения в веб-приложении пространственных данных о местоположениях случаев КОЯП будет использован открытый картографический сервер GeoServer.

Таким образом, разрабатываемая база данных позволит получить существенный объем новой информации о случаях КОЯП на территории ЦФО, систематизи-

ровать данные из разных источников и будет представлять значительную ценность для изучения условий их возникновения.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 20-35-70044.

Список литературы

1. Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J. Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. Vol. 110 (41). P. 16361–16366.
2. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme / E.P. Meredith, V.A. Semenov, D. Maraun [et al.] // *Nature Geoscience*. 2015. Vol. 8 (8). P. 615–619.
3. Proximity Soundings of Severe and Nonsevere Thunderstorms in Central Europe / T. Púčik, P. Groenemeijer, D. Rýva, M. Kolář // *Monthly Weather Review*. 2015. Vol. 143. P. 4805–21.
4. Schaefer J.T., Edwards R. The SPC tornado/severe thunderstorm database // *Preprints, 11th Conf. on Applied Climatology*. Amer. Meteor. Soc, Dallas, 1999. URL: <https://ams.confex.com/ams/99annual/abstracts/1360.htm> (6.11).
5. Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD / N. Dotzek, P. Groenemeijer, B. Feuerstein, A.M. Holzer // *Atmospheric Research*. 2009. Vol. 93. P. 575–586.
6. Groenemeijer P., Kuhne T. A climatology of tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database // *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142. P. 4775–4790.
7. Severe convective storms in Europe: Ten years of research and education at the European Severe Storms Laboratory / P. Groenemeijer, T. Púčik, A.M. Holzer [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017. Vol. 98 (12) P. 2641–2651.
8. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 204. P. 553–567.
9. A satellite-derived database for stand-replacing windthrows in boreal forests of the European Russia in 1986–2017 / A.N. Shikhov, A.V. Chernokulsky, I.O. Azhigovand, A.V. Semakina // *Earth Syst. Sci. Data Discuss*. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-2020-91>, in review, 2020.
10. MSG Channels Interpretation Guide / J. Kerkmann, H.J. Lutz, M. König [et al.] // *EUMETSAT*, 2006. URL: http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html.
11. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era / A. Chernokulsky, M. Kurgansky, I. Mokhov [et al.] // *Monthly Weather Review*. 2020. Vol. 148. P. 3081–3111.
12. Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I. On characteristic reanalysis-based values of convective instability indices for Northern Eurasia tornadoes // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 231 (1), Art. No. 012012.

A.N. Shikhov, R.K. Abdullin, Azhigov

Perm State University, Perm, Russia

e-mail: and3131@inbox.ru

GIS DATABASE OF HAZARDOUS CONVECTIVE WEATHER EVENTS IN THE TERRITORY OF CENTRAL FEDERAL DISTRICT

The paper discusses the structure and content of the GIS database of convective hazardous weather events for the territory of the Central Federal District (CFD). The difference between the

developed database and existing analogues is its structure, which includes information about the events themselves, related damage, as well as links to previously developed databases of tornadoes and large windthrows in the forest zone. The database includes additional information on the environments of occurrence of hazardous weather events, in particular, the characteristics of mesoscale convective systems according to meteorological satellites and atmospheric instability parameters according to reanalysis data. The database is developed under the PostgreSQL DBMS, and access to it will be implemented through the online web map service

Keywords: convective hazardous weather events, mesoscale convective systems, Central Federal District, GIS database.

УДК 528.88

М.М. Шляхова¹, В.В. Дедкова²

¹Кандидат технических наук, ²Аспирант
Сибирский государственный университет
геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
e-mail: m.m.shlyahova@sgugit.ru; v.v.dedkova@sgugit.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЭРОСЪЕМОК ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

На сегодняшний день контроль состояния защитных сооружений магистральных трубопроводов является актуальной задачей. Транспортировка нефти осуществляется трубопроводным транспортом, следовательно, протяженность трубопроводов распространяется на значительные территории. В связи с этим возникают риски утечки сырья, что провоцирует аварийные ситуации. Предотвратить или уменьшить негативные последствия аварий позволяют защитные сооружения. Одним из перспективных направлений мониторинга состояния защитных сооружений является применение беспилотных летательных аппаратов с использованием комплекса съемочных систем.

Ключевые слова: аэросъемка, мониторинг, магистральные трубопроводы, защитные сооружения.

Основная деятельность нефтегазовых компаний заключается в добыче, переработке нефти и в ее дальнейшей транспортировке. В зависимости от объемов добычи, нефтепромысла, размещения месторождений транспортировка углеводородного сырья реализуется различными способами – трубопроводным (самый популярный), грузовым и внутренним судоходством, нефтеналивными танкерами и прочее [1–4]. Система трубопроводного транспорта покрывает значительные территории. Рассмотрим анализ протяженности некоторых нефтепроводов (табл. 1).

К основным преимуществам транспортировки нефти через трубопровод относятся: независимость от времени года, автоматизация процесса, минимальная стоимость прокладки трубопровода в сравнении с использованием железнодорожных перевозок.

Недостатком данного метода транспортировки является риск возникновения аварий, так как трубопроводы могут располагаться вблизи населенных пунктов,

следовательно, подобные чрезвычайные ситуации представляют угрозу жизни населения, а их последствия влекут экономические и экологические потери. В связи с этим возрастают требования к контролю состояния защитных сооружений, обеспечивающих безопасность транспортировки углеводородного сырья по трубопроводам и прилегающих к ним территорий и объектов. Для решения задачи мониторинга состояния защитных сооружений эффективнее использовать данные аэро съемок, с помощью которых можно выявить различные повреждения как трубопровода, так и защитных сооружений, тем самым предотвратив аварийные ситуации.

Задачами защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов и сырья является защита нефтепровода от влияния внешних, внутренних факторов и человека.

Влияние природных явлений представляется геологическими, гидрогеологическими и гидрологическими процессами, которые являются основной причиной повреждения и/или разрушения нефтепровода. В свою очередь, основной вред человеческого фактора заключается в порче имущества и хищении и нефтепродуктов [5; 6].

Для гарантии надежной работы магистральных нефтепроводов учитывается создание защитных сооружений.

Явления, которые могут принести ущерб нефтепроводу и соответствующая техническая защита, приведены в табл. 2.

Таблица 1

Анализ протяженности трубопроводов

№	Наименование	Протяженность, км
1	Саудовская Аравия	17 000
2	Дружба (Россия – Европа)	8 900
3	East-West pipelines (Китай)	8 704
4	Туркменистан – Китай	7 000
5	Восточная Сибирь – Тихий океан	4 740
6	Tennessee (США)	3 300
7	Нефтепровод Сургут – Полоцк	3 250
8	GASBOL (Боливия – Бразилия)	3 150
9	Rockie Express (США)	2 702
10	Иран – Турция	2 577

Таблица 2

Техническая защита магистральных трубопроводов

	Явления	Причина	Техническая защита
Природные явления	Атмосферная коррозия	Высокая влажность воздуха	Электрохимическая защита
	Почвенная коррозия	Влажный грунт, болотистая местность (торф)	Протекторная защита, станции катодной защиты, дренажные установки, песчаный свай (болотистая местность)
	Геологические явления	Селевые потоки, камнепады, оползни, снежные лавина, землетрясения	Бетонирование участков, скрепление грунта растительностью, ячеистые покрытия
Человеческий фактор	Нарушение эксплуатационных режимов работы	Операции, связанные с резким изменением скорости потока нефти в трубе, гидравлический удар	Безопасность работы, контроль на местности
	Несанкционированная врезка в трубопровод	Постороннее вмешательство в технологический процесс, хищение нефти или газа	Защита от несанкционированных действий, антитеррористические защитные сооружения и мероприятия, защитные ограждения на вентиллях

Важным источником информации при проведении мониторинга объектов нефтегазового комплекса и защитных сооружений являются данные, полученные с воздушных систем – пилотируемых судов и беспилотных летательных аппаратов, на которых могут быть установлены различные измерительные датчики.

Оборудование может быть выбрано в зависимости от грузоподъемности платформы, дальности следования, масштаба съемки. Измерительной аппаратурой могут выступать цифровые камеры, лазерные сканеры, тепловизоры, ИК-радиометры и другие устройства.

Преимущества проведения аэросъемок для контроля состояния трубопроводов и защитных сооружений: большой охват территории, получение подробной информации о труднодоступных участках, круглогодичный мониторинг, различное спектральное разрешение, использование комбинированных данных, доступность.

Применение результатов аэросъемок является перспективным направлением, так как данная отрасль постоянно развивается, материалы съемок ежедневно используются в различных областях, в том числе для предупреждения аварий природного и техногенного характера, анализа и мониторинга природных ресурсов, а также для наблюдения за объектами нефтегазовой отрасли.

В зависимости от характеристик защитных сооружений трубопровода следует подбирать необходимые параметры для проведения мониторинга, а именно: периодичность и высоту съемки, разрешение сенсора и тип съемочного оборудования [7].

На сегодняшний день перспективным направлением в области аэросъемочных работ является применение комбинированной связки цифровой камеры и лазерного сканера, устанавливаемых на беспилотном летательном аппарате. Подобная съемка обеспечивает получение полноценных измерительных данных, необходимых для мониторинга защитных сооружений и магистральных трубопроводов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования» № 0807-2020-0002).

Список литературы

1. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М.: Науч. мир, 2012. URL: <http://www.aerocosmos.info/pdf/2012/2012.pdf>.
2. Statistical review of world energy. 2020. 69th ed. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-primary-energy.pdf>.
3. Мехдиев Э.Т. Обзор трубопроводной инфраструктуры Европы: транспортировка нефти и нефтепродуктов // Энергетический вестн. 2016. № 1. С. 108–119.
4. Прогноз развития энергетики мира и России 2019. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf.
5. Хренов Н.Н. Аэрокосмические методы в комплексе исследований по оценке технического состояния северных трубопроводов. М.: Геодезия и аэрофотосъемка, 2009. С. 55–59.
6. Стандарт организации положение о воздушном патрулировании трасс магистральных трубопроводов ОАО «Газпром». URL: https://zinref.ru/000_uchebniki/01500_gaz/301_00_STO_gazprom_raznie/154.htm.
7. Гук А.П., Шляхова М.М. Особенности современного этапа развития средств дистанционного зондирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – 2018: материалы XIV Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ. 2018. Т. 1 С. 7–13.

M.M. Shlyahova, V.V. Dedkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

e-mail: m.m.shlyahova@sgugit.ru; v.v.dedkova@sgugit.ru

PROSPECTS OF AERIAL SURVEY APPLICATION FOR MONITORING OF STATE OF PROTECTION STRUCTURES OF OIL PIPELINES

Monitoring of state of oil pipelines protection structures is actual problem. Oil transportation is carried out by pipeline transport, therefore, the length of pipelines extends over large areas. There are risks of raw material leakage, which provokes emergency situations. Protection structures can prevent or reduce negative consequences of accidents. One of the perspective directions of monitoring of protection constructions state is application of unmanned aerial vehicles with use of survey systems complex.

Keywords: aerial survey, monitoring, pipeline, protection structures.

УДК 528.8

I. Esau¹, V. Miles¹, A. Soromotin², O. Sizov³

¹Nansen Environmental and Remote Sensing Centre, Bergen, Norway

²Tyumen State University, Tyumen, Russia

³Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow, Russia

e-mail: igore@nersc.no

SURFACE URBAN HEAT ISLAND IN ARCTIC CITIES DERIVED FROM MODIS LAND SURFACE TEMPERATURE

Urbanization considerably modify the local land surface energy balance. These urban anomalies sustain significantly warmer land surface temperature (LST) – the effect known as the surface urban heat island (SUHI). The LST anomalies may be further enhanced by an anthropogenic urban heat flux that is waste heat from urban metabolism and heating. Arctic environment with its frozen soils and temperature-dependent vegetation is particularly sensitive to the SUHI. Vulnerability of the urban and transport infrastructure to raising LST has been widely reported. Nevertheless, the magnitude of the climatic SUHIs remains underexplored. Here, we use 19 years (2000–2018) of the LST data from the MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) to quantify the SUHI in all circum-Arctic settlements with the population larger than 5 000 inhabitants. The analysis reveals that the Arctic SUHI is strong and persistent both in summer and winter seasons as well as in day and night-time data. The SUHI exceeds 1,5 °C and even 3,0 °C in many cities; these thresholds emphasize the SUHI impact on the urban ground stability and risks for buildings. We conclude that the SUHI in the Arctic cities is an important climatic factor, which must be taken into account in urban safety and environmental quality assessment, and not least in future adjustment of the construction standards to the global warming.

Keywords: Surface Urban Heat Island, MODIS, Land Surface Temperature, Urban Climate, Arctic Climate Change, Infrastructure vulnerability.

Serios of extreme climate events, forest and tundra fires, and repeating summer heat waves in high northern latitudes has drawn the public attention to persistent and amplified Arctic warming. A number of recent research studies have already identified significant risks of permafrost degradation, changes of hydrological balance as well as ecological threats in the region. Hjort et al. [1] concluded on increased vulnerability of urban and transport infrastructure on the circum-Arctic territories. Since human and natural landscapes demonstrate strong sensitivity to climate warming, e.g., [2; 3], there is an urgent need to quantify the “hot spots” of the warming in the local areas with high concentration of social and economic values, i.e., in the Arctic urbanized areas, cities and towns.

Persistent urban climatic anomalies at high special resolution (1 km) could be derived using the long-term land surface temperature (LST) data product MOD 11A2 over 2000–2018 from the MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) archive of 8-day composites. The spatial and temporal resolution of this data product is sufficient to estimate surface urban heat island (SUHI) magnitudes in hundreds and thousands of urban areas around the globe, e.g., [4; 5]. However, quality of the existing SUHI datasets deteriorates in the high latitudes. For example, our inspection of the SUHI in Chakraborty et al. [5] dataset reveals that the Arctic cities in this dataset (<https://yceo.yale.edu/research/global-surface-uhi-explorer>) either mis-represented as in cases of Murmansk, Fairbanks and Tromsø, or not included as in cases of Apatity and Nadym. Therefore, we developed own SUHI dataset, which covers all Arctic cities and towns with the population of more than 5000 inhabitants. We identify the actual urban locations manually and use a buffer-zone method to derive the SUHI magnitudes.

The SUHI identification method is described in detail in [6]. We determine the SUHI as the magnitude $\Delta T = T_{\text{Umax}} - T_r$, where ΔT is the urban-rural LST difference, T_{Umax} is the maximum LST (the 8-day block composite) of the urban pixels of a given city, and T_r is the spatially average LST of rural pixels around this city. Urban pixels are taken within a city polygon; the rural buffer pixels are in a 2 km around the polygon. Water pixels are excluded. To identify the urban pixels, we utilize the Climate Change Initiative (CCI) land cover data from the European Space Agency (ESA) with 300 m spatial resolution. Fig. 1 graphically presents the method. We shall mention that the resulting SUHI magnitudes are sensitive to the land cover type composition around the cities [7].

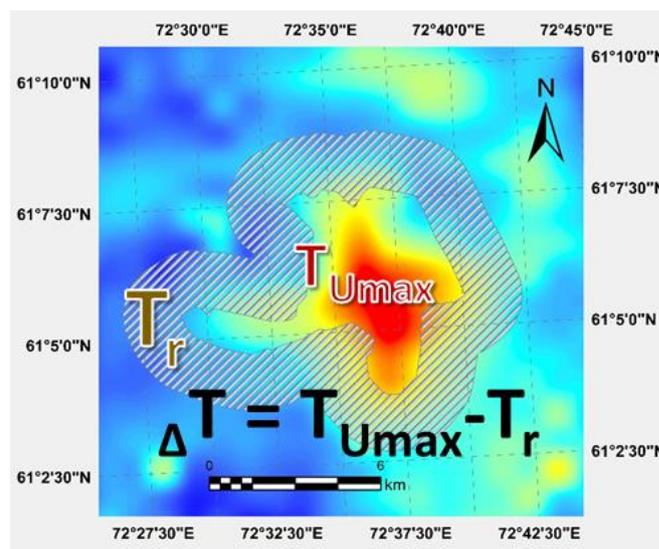


Fig. 1. The buffer-zone method of the SUHI determination in this study. The background MODIS LST image (color shading) is for Nefteyuganisk in West Siberia. The urban polygon is surrounded by a 2 km wide (hatched) buffer

SUHI studies in low- and mid-latitudes identify large warm temperature anomalies in the largest cities with millions of inhabitants [8]. The SUHI magnitudes in small and medium cities are smaller. Longitudinal analysis in [9] however discloses that the average SUHI magnitudes increase with latitude. We explain this effect by trapping of urban heat in shallow atmospheric boundary layers [10]. Indeed, direct in situ observations in several Russian Arctic cities confirmed that the strongest SUHI are found in the most stably stratified, and therefore shallow, boundary layers [11]. Thus, we shall likely expect stronger and more persistent SUHI in the Arctic cities than those found in their temperate counterparts.

The Arctic SUHI dataset reveals rather large magnitudes of the annual mean and seasonal mean LST anomalies in all Arctic cities. The largest cities show the SUHI magnitude up to 6.0 °C. The majority of cities have the anomalies between 1,0 °C and 2,5 °C. Fig. 2 presents the geographical distribution of the SUHIs in the region. Observe that also some smaller towns have prominent SUHI. Thus, the SUHI magnitude has weaker direct correlation with the city population and thus with the total anthropogenic heat flux; the coefficient of determination is 0.65 [6]. The SUHI factoring model from [12] is also of low explanatory power for our cities.

We derived the SUHI in all Arctic cities and towns with more than 5000 inhabitants. The study reveals that the SUHI magnitudes are rather large – comparable with those in significantly larger low- and mid-latitude cities. These 1.0°C to 6.0°C LST anomalies should be added on the top of already amplified climate warming in the circum-Arctic region. In fact, the urban climate measured by the LST corresponds to the expected regional temperature change by 2040–2080 and beyond [13]. We conclude that such a significant SUHI may present a considerable risk for the infrastructure stability in the most vulnerable areas of high concentration of values. Reported damage data indicate high sensitivity of urban infrastructure to the warm LST anomalies [14].

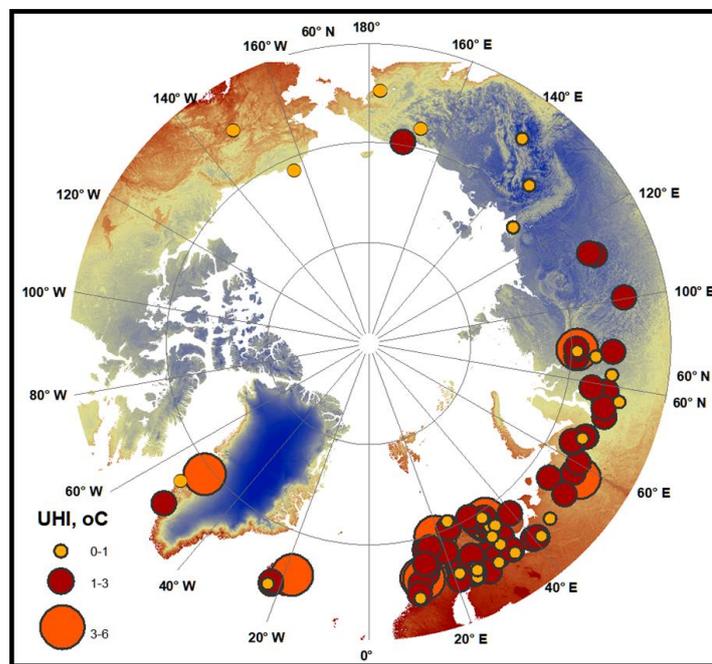


Fig. 2. Annual mean magnitude of the surface urban heat islands in circum-Arctic cities with more than 5 000 inhabitants. Data: MODIS LST for 2000–2018. The background color shading is the annual mean climatic LST

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-55-71004 and Belmont Forum project № 1729 SERUS.

References

1. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century / J. Hjort, O. Karjalainen, J. Aaltoet [et al.] // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9 (1). 5147. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>.
2. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia / I. Esau, V. Miles, R. Davy [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 16 (15). 9563–9577. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-16-9563-2016>.
3. Land Cover Change in the Lower Yenisei River Using Dense Stacking of Landsat Imagery in Google Earth Engine / E.K. Nyland, E. Gunn, I. Shiklomanov [et al.] // *Remote Sensing*. 2018. № 10 (8). 1226. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10081226>.
4. Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities / S. Peng, S. Piao, P. Ciais [et al.] // *Environmental Science and Technology*. 2012. № 46. P. 703–796. URL: <https://doi.org/10.1021/es2030438>.
5. Chakraborty T., Lee X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability // *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. № 74. P. 269–280. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015>.
6. Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities // *Remote Sensing*. 2017. № 9 (10). 989. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9100989>.
7. Esau I., Miles V. Exogenous drivers of surface urban heat islands in northern West Siberia // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. № 11 (3). P. 83–99. URL: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-3-83-99>.
8. Tan M., Li X. Quantifying the effects of settlement size on urban heat islands in fairly uniform geographic areas // *Habitat International*. 2015. № 49. P. 100–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.05.013>.
9. Wienert U., Kuttler W. The dependence of the urban heat island intensity on latitude – A statistical approach // *Meteorologische Zeitschrift*. 2005. № 14 (5). P. 677–686.
10. Davy R., Esau I. Differences in the efficacy of climate forcings explained by variations in atmospheric boundary layer depth // *Nature Communications*. 2016. № 7 (1). 11690. URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms11690>.
11. Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic // *Environmental Research Letters*. 2018. № 13 (7). 075007. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84>.
12. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population / G. Manoli, S. Fatichi, M. Schlöpfer [et al.] // *Nature*. 2019. № 573 (7772). P. 55–60. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>.
13. Warmer Climate of Arctic Cities. Ch. 3 // *The Arctic: Current Issues and Challenges: monography* / I. Esau, M. Varentsov, M. Laruelle [et al.]; O. Pokrovsky [et al.] (Eds). 2020. NOVA Publishers. URL: <https://novapublishers.com/shop/the-arctic-current-issues-and-challenges/>.
14. Khrustalyov L.N., Davidova I.V. Forecast of climate warming and account of it at estimation of foundation reliability for buildings in permafrost zone // *Earth Cryosphere*. 2007. № 11 (2). P. 68–75.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	3
<i>Дмитриев Е.В., Мельник П.Г., Донской С.А., Зотов С.А., Соколов А.А.</i> Классификация структурных особенностей почвенно-растительного покрова по космическим изображениям сверхвысокого разрешения.....	3
<i>Романов А.Н., Хвостов И.В.</i> Дистанционная оценка гидролого-климатических изменений в Арало-Каспийской низменности по данным спутника <i>SMOS</i>	9
<i>Свердлик Л.Г., Имашев С.А.</i> Эффекты когерентных колебаний температуры атмосферы, предшествующие сильным землетрясениям.....	13
<i>Соколов А.А., Дмитриев Е.В., Челиотис И., Дельбар Э., Дьедонне Э., Агустан П., Фурмантен М.</i> Автоматизированное мультиклассификаторное распознавание атмосферных турбулентных структур, полученных с помощью доплеровского лидара	17
<i>Терехов А.Г., Абаев Н.Н.</i> Спутниковый мониторинг условий маловодья в китайской части бассейна реки Или в сезоне 2020 года	21
<i>Харук В.И., Двинская М.Л.</i> Климатогенная динамика пожаров в арктической зоне Сибири.....	25
СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	29
<i>Казаков М.Ф., Казаков Ф.А.</i> Специфика использования беспроводных технологий для систем дистанционного зондирования Земли	29
<i>Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С.</i> Возможности системы «Вега-Лес» для решения задач регионального мониторинга лесов на примере Тунгусско-Чунского лесничества	32
<i>Матина П.Н., Колотков Г.А.</i> Перспективы изучения радиационного фона Томской области с помощью дистанционных методов мониторинга	35
<i>Середа И.И., Денисов П.В., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А., Трошко К.А.</i> Развитие озимых и яровых культур России в 2020 году на основе данных дистанционного мониторинга	39
МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	43
<i>Бучнев А.А., Гетлинг А.В.</i> Визуализация процессов развития активных областей в фотосфере Солнца	43
<i>Вахнин М.Г.</i> Использование дистанционных методов для решения экологических проблем, возникающих при разработке месторождений на севере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции	47
<i>Добронец Б.С., Попова О.А., Мерко А.М.</i> Вычислительный вероятностный анализ и метод трансформации в задачах дистанционного зондирования Земли.....	51

<i>Евстратова Л.Г., Пеньшин И.Н.</i> Построение сети пространственной маршрутизации для точек панорамной съемки при мониторинге городской территории	56
<i>Ерофеев Е.А., Катаев В.Н.</i> Геологические условия развития карста Нижеиренско-ординского опорного участка	60
<i>Жуковская А.Н.</i> Применение сверточной нейронной сети для комплексного картографирования земного покрова с использованием мультиспектральных изображений дистанционного зондирования Земли	66
<i>Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В.</i> Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН.....	70
<i>Зотов С.А., Дмитриев Е.В., Кондранин Т.В.</i> Сравнительный анализ методов определения параметров древостоев по мультиспектральным космическим изображениям различного пространственного разрешения	73
<i>Кадочников А.А., Токарев А.В., Якубайлик О.Э.</i> Система каталогизации спутниковых данных, поступающих с российских космических аппаратов: основные характеристики и опыт эксплуатации	78
<i>Картушинский А.В., Огородов Н.А., Картушинский С.А.</i> Градиентные свойства экологических систем и динамика пространственных неоднородностей по спутниковым данным.....	82
<i>Катковский Л.В., Беляев Б.И., Давидович Ю.С.</i> Дистанционные спектральные методы диагностики усыханий хвойных насаждений	85
<i>Ким П.А.</i> О географической сетке трехмерной гиперсферы	89
<i>Колесников А.А.</i> Эталонные тесты семантической сегментации данных, получаемых методами активного дистанционного зондирования	92
<i>Колесников А.А., Кикин П.М., Нунгессер А.Д.</i> Построение модели прогнозирования уровня воды в реке по данным дистанционного зондирования из открытых источников.....	95
<i>Лещенко С.Л.</i> Технология экологического мониторинга для предотвращения загрязнений атмосферы.....	98
<i>Марков Н.Г., Маслов К.А., Керчев И.А., Токарева О.С.</i> Сверточная нейронная сеть для сегментации пораженных деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов.....	102
<i>Перфильев Д.А.</i> Сегментация частотной неоднородности изображения	105
<i>Полевщикова Ю.А.</i> Оценка динамики изменения земного покрова с использованием данных дистанционного зондирования	109
<i>Прошин А.А., Матвеев А.М., Кашицкий А.В.</i> Организация динамического блочного доступа к данным в архивах для проведения их эффективной обработки	114
<i>Русин Д.С., Сафонова А.Н.</i> Использование эволюционных алгоритмов для построения нейронных сетей в задачах классификации данных дистанционного зондирования Земли	117
<i>Рылов С.А.</i> Использование активного обучения для выделения водных объектов на спутниковых изображениях	122

<i>Саринова А.Ж.</i> Методика разработки алгоритмов для сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений, применимых на борту космических аппаратов	126
<i>Сенин А.В.</i> Перспективы и проблемы применения данных дистанционного зондирования Земли в инженерно-экологических изысканиях	130
<i>Синявский Ю.Н., Рылов С.А., Пестунов И.А.</i> Экспериментальное сравнение непараметрических алгоритмов автоматической классификации для сегментации изображений	133
<i>Тарасов А.В.</i> Оценка точности методов маскирования облачности по снимкам <i>Sentinel-2</i> и <i>PlanetScope</i>	139
<i>Терехов А.Г., Абаев Н.Н., Архипкин О.П.</i> Спутниковая морфометрия котловины Сардобинского водохранилища (Узбекистан), разрушенного 1 мая 2020 года	144
<i>Толмачева А.Е., Сафонова А.Н.</i> Классификация степени повреждения дерева на аэросъемках с помощью архитектур YOLO	148
<i>Тутатчиков В.С., Дрозд О.В., Капулин Д.В., Овчинников Н.Н.</i> Компьютерная модель высокоточной навигации группировки малых космических аппаратов для задач дистанционного зондирования Земли	153
<i>Тутатчиков В.С., Носков М.В.</i> Применение высокочастотной фильтрации для устранения облачности на снимках дистанционного зондирования Земли	157
МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ	161
<i>Архипкин О.П., Сагатдинова Г.С., Бралинова Ж.А.</i> Анализ многолетних временных рядов данных космического мониторинга паводков	161
<i>Белоносов А.Ю.</i> Геологическая интерпретация материалов дистанционного зондирования Земли и космоса южного сегмента Урало-Казахского краевого прогиба в связи с нефтегазоносностью Доюрского фундамента	165
<i>Бродт Л.В., Соромотин А.В., Heim R.J., Hölzel N.</i> Дистанционный мониторинг послепожарных сукцессий субарктической зоны Западной Сибири.	169
<i>Волкова М.А., Кужевская И.В., Чурсин В.В., Нечепуренко О.Е.</i> Спутниковый мониторинг зон обледенения	173
<i>Волкова А.И., Павлова Е.В., Демина Е.А.</i> Оценка современного состояния сельскохозяйственных земель Алтайского района Республики Хакасия	177
<i>Гаченко А.С., Хмельнов А.Е.</i> Анализ участков реки Ангары, подверженных затоплениям	180
<i>Гордиенко А.С., Андриевская Е.Д.</i> Применение снимков <i>PlanetScope</i> при мониторинге территорий	184
<i>Дагуров П.Н., Балтухаев А.К., Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н.</i> Радарное рассеяние микроволн снежным покровом на слоисто-шероховатой земле	188
<i>В.В. Дедкова, М.М. Шляхова</i> Мониторинг технического состояния магистральных трубопроводов методами дистанционного зондирования	192

<i>Дергунов А.В., Пономарев Е.И.</i> Динамика нарушенности лесов мерзлотной зоны Сибири за 20 лет по данным в ИК диапазоне	196
<i>Дергунов А.В., Якубайлик О.Э.</i> Анализ температурных инверсий в периоды неблагоприятных метеословий в Красноярске	199
<i>Дунаева Е.А.</i> Оценка уровня варьирования биопродуктивности посевов.....	203
<i>Жуков А.А., Жукова Е.Ю.</i> Динамика продуктивности рекультивируемой растительности Изыхского разреза (<i>Terra Modis</i>).....	206
<i>Зоев И.В., Марков Н.Г., Рыжова С.Е.</i> Система мониторинга опасных технологических объектов на основе беспилотных летательных аппаратов	210
<i>Иванова К.В., Лапина А.М.</i> Использование данных <i>Sentinel-2</i> для выделения разных типов местообитаний в полосе лесотундры.....	213
<i>Им С.Т.</i> Динамика темнохвойных лесов Кузнецко-Салаирской горной области в XXI веке	217
<i>Кауазов А.М., Жолдасбек А.Е., Нурлан А.Н.</i> Анализ данных космического мониторинга снеготаяния в Казахстане и форматов представления результатов	221
<i>Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Симонов К.В., Кабанов А.А., Мальканова А.В., Одинцов Р.В.</i> Уточнение параметров сильнейших землетрясений на основе ретроспективного анализа данных GRACE	224
<i>Копысов С.Г., Елисеев А.О.</i> Моделирование ступеней увлажнения Л.Г. Раменского для регионального экологического мониторинга	230
<i>Краснощеков К.В., Пономарев Е.И.</i> Корреляционный анализ связи масштабных тепловых аномалий подстилающей поверхности с величиной стока рек Сибири	233
<i>Краснощеков К.В., Якубайлик О.Э.</i> Оценка качества атмосферного воздуха по спутниковым данным	236
<i>Кремнева О.Ю., Данилов Р.Ю., Тутубалина О.В., Серeda И.И., Зимин М.В., Курилов А.А.</i> Разработка методических основ диагностики раннего развития экономически значимых возбудителей болезней пшеницы с использованием наземных гиперспектральных измерений и средств дистанционного мониторинга	240
<i>Кулик Е.Н., Байкин Д.А.</i> Мониторинг растительности в районах добычи и транспортировки нефти методами автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли	244
<i>Кулик Е.Н., Байшуаков А.Т.</i> Мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур на различных стадиях развития вегетации по данным дистанционного зондирования Земли	248
<i>Латышева В.В., Демьяненко Т.Н., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В.</i> Использование спектральных характеристик поверхности для картографирования структуры почвенного покрова в условиях красноярской лесостепи.....	251
<i>Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Чубаров Д.Л.</i> Анализ пространственно-временного распределения температуры подстилающей поверхности на территории Новосибирска на основе данных космического аппарата <i>Landsat-8</i>	254

<i>Маргарян В.Г., Цибульский Г.М., Раевич К.В.</i> Оценка внутригодового режима скорости ветра соницкого марза Республики Армения	259
<i>Миков Л.С., Попов С.Е.</i> Определение деформации земной поверхности на разрезе «Кийзасский» по данным <i>Sentinel-1</i>	262
<i>Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лупян Е.А.</i> Использование спутниковых данных при мониторинге рек бассейна Амударьи	265
<i>Подопригора В.Г., Сорокин А.В., Макаров Д.С., Харламов Д.В.</i> Особенности рассеяния сигналов навигационных спутников в слоистой структуре древостоя.....	270
<i>Свердлик Л.Г.</i> Анализ многолетних данных гравитационных и сейсмических измерений в регионе Центральной Азии.....	274
<i>Сизов О.С., Соромотин А.В., Приходько Н.В., Бродт Л.В.</i> Дистанционная оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018)	278
<i>Сорокин А.В., Борисов А.Н., Остыловский А.Н., Иванов В.В., Макаров Д.С., Харламов Д.В.</i> Использование навигационных спутниковых сигналов для определения запасов стволовой древесины	283
<i>Сорокин А.В., Кузьмин Е.В., Макаров Д.С., Харламов Д.В.</i> Рефлектометрия ледовых покровов при различных сезонных состояниях по сигналам навигационных спутников в L1-диапазоне	286
<i>Сутырина Е.Н.</i> Изучение городского «острова тепла» агломерации Иркутск – Ангарск – Шелехов с применением данным дистанционного зондирования	290
<i>Сутырина Е.Н.</i> Применение интерполяции для заполнения пробелов в рядах спутниковых наблюдений за температурным режимом озера Байкал	293
<i>Таранюк М.И., Мельников Ю.П., Колесникова Е.В.</i> Применение данных дистанционного зондирования Земли для решения задач экологического сопровождения предприятий-недропользователей.....	297
<i>Тисейко Р.А.</i> Проект экологического каркаса Боградского района Республики Хакасия.....	299
<i>Трошко К.А., Денисов П.В., Лаврова О.Ю., Лупян Е.А., Медведев А.А.</i> Спутниковый мониторинг последствий аварии на Норильской ТЭЦ-3 29 мая 2020 года	302
<i>Хазияхметов Р.Т.</i> Экспертная система интерпритации геоданных сканирования природных сред, подвергавшихся техногенным и антропогенным воздействиям	308
<i>Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Ажигов И.О.</i> Картографическая база данных случаев конвективных опасных явлений погоды на территории Центрального федерального округа	312
<i>Шляхова М.М., Дедкова В.В.</i> Перспективы применения аэросъемок для контроля состояния защитных сооружений магистральных трубопроводов	316
<i>Esau I., Miles V., Soromotin A., Sizov O.</i> Surface Urban Heat Island in Arctic Cities Derived from Modis Land Surface Temperature	319

Научное издание

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы VII Международной научной конференции

Красноярск, 29 сентября – 2 октября 2020 г.

Научный редактор
Ваганов Евгений Александрович

Корректурa и компьютерная верстка *А.А. Быковой*

Подписано в печать 21.09.2019. Печать плоская. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,1. Тираж 90 экз. Заказ № 11724

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-16; <http://bik.sfu-kras.ru>
e-mail: publishing_house@sfu-kras.ru