



РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы VIII Международной научной конференции

Красноярск, 14–17 сентября 2021 г.

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

*Мероприятие проведено при поддержке Правительства Красноярского края,
Госкорпорации «Роскосмос», ФГБУН ИКИ РАН, КРОО «Ассоциация выпускников
КГТУ», компании «ИТ-Восток», автомобильной компании «Медведь Холдинг»,
компании «Наш Двор [Сибирь]»*

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы VIII Международной научной конференции
Красноярск, 14–17 сентября 2021 г.

Электронное научное издание

Научный редактор
Е. А. Ваганов

Красноярск
СФУ
2021

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, заведующий кафедрой Б-ГИС ИКИТ СФУ; *Ю. А. Маглинец*, кандидат технических наук, профессор, руководитель НУЛ «ИПКМ» ИКИТ СФУ; *Р. В. Брежнев*, кандидат технических наук, доцент кафедры СИИ ИКИТ СФУ

Р326 Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы VIII Междунар. науч. конф. Красноярск, 14–17 сентября 2021 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Электрон. дан. (14,1 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2021. – Электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования : PC не ниже класса Pentium I ; 128 Mb Ram ; Windows 98/XP/7 ; Adobe Reader v 8.0 и выше. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7638-4566-2

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**

© Сибирский федеральный университет, 2021

ISBN 978-5-7638-4566-2

Электронное научное издание

Компьютерная верстка *А. А. Быковой*

Подписано в свет 13.09.2021. Заказ № 14387
Тиражируется на машиночитаемых носителях

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
e-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

СОДЕРЖАНИЕ

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ.....	7
<i>Сушкевич Т. А.</i> Математик-легенда М. В. Келдыш – главный теоретик космонавтики, идеолог и организатор космических исследований. К 110-летию со дня рождения М. В. Келдыша и 60-летию полета в космос Ю. А. Гагарина в Год науки и технологий.....	7
СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	13
<i>Вечерков В. В., Филина Я. А., Дунаева Е. А.</i> Оценка состояния посевов с использованием беспилотного воздушного судна и данных дистанционного зондирования Земли	13
<i>Зимин И. И., Валов М. В., Скутин В. А.</i> Перспективные проекты малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли АО «ИСС»	17
<i>Карпухин С. С.</i> Системные основы космической географии.....	22
<i>Куклин А. С., Иванов С. В., Федоркова Ю. В.</i> Система обеспечения данными ДЗЗ региональных органов управления при их функционировании в режиме ЧС	28
<i>Кузнецов М. О., Брежнев Р. В.</i> Разработка мобильного приложения для локализации геопространственных объектов в системе дистанционного мониторинга Института космических и информационных технологий.....	31
<i>Лошкарев П. А., Пушкарский С. В.</i> Технологии федерального фонда данных дистанционного зондирования Земли в интересах решения региональных задач.....	35
<i>Лошкарев П. А., Черногузов С. А., Пушкарский С. В.</i> Современное состояние и перспективы развития единой территориально распределенной информационной системы дистанционного зондирования Земли	37
<i>Лошкарев П. А., Федоткин Д. И., Белый А. Н., Пушкарский С. В., Сысенко Д. В.</i> Информационная система «Цифровая земля» для формирования постоянно обновляемого единого сплошного многослойного динамического покрытия территории Российской Федерации данными дистанционного зондирования Земли различного пространственного разрешения и обеспечения доступа потребителей к его данным, продуктам и сервисам	39
<i>Толкачев Я. М., Набиев М. А., Пожидаетов Н. К., Баталов П. В., Константинов Е. В.</i> Web-система мониторинга и прогнозирования неблагоприятных явлений на объектах топливно-энергетического комплекса.....	41
<i>Находкин А. Н.</i> Практический опыт применения мобильного приемопередающего комплекса ГК «Роскосмос» на территории Республики Саха (Якутия)	45
<i>Сорокин А. В., Васильев Е. Н., Макаров Д. С.</i> Тепловые потоки в ледовых покровах и ГНСС-рефлектометрия в мониторинге состояния льда	47
МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	51
<i>Данилова И. В., Рыжкова В. А.</i> Картографирование растительности горных территорий на основе спутниковых изображений и данных о характеристиках рельефа.....	51
<i>Дзюба А. В., Пятаева А. В.</i> Применение нейронных сетей для визуального распознавания речи по видеоданным.....	55

<i>Дмитриев Е. В., Зотов С. А., Донской С. А., Мельник П. Г., Соколов А. А.</i> Спектрально-текстурная обработка разномасштабных спутниковых изображений в задаче определения структурных особенностей и породного состава древостоев.....	59
<i>Добронец Б. С., Попова О. А., Мерко А. М.</i> Визуальное исследование многомерных данных в задачах дистанционного зондирования Земли.....	65
<i>Добронец Б. С., Попова О. А., Вюст К. В.</i> Подходы к исследованию больших временных рядов спутниковых данных	69
<i>Евстратова Л. Г., Антошкин А. А.</i> Выявление зарастания пахотных земель по космическим снимкам на основе структурных признаков	73
<i>Им С. Т., Петров И. А., Харук В. И.</i> Съемка CORONA в анализе динамики экотона лесотундры Кузнецкого Алатау (гора Орлигтасхыл)	77
<i>Колбудаев П. А., Плотников Д. Е., Лупян Е. А., Прошин А. А., Матвеев А. М.</i> Методы и автоматическая технология географической привязки, маскирования мешающих факторов и атмосферной коррекции разнозональных изображений КМСС-М на больших территориях.....	81
<i>Кузнецова А. С., Ерунова М. Г., Якубайлик О. Э.</i> Применение спутниковых данных высокого пространственного разрешения для мониторинга сельскохозяйственных угодий	87
<i>Кузьмин Е. В., Сорокин А. В., Реушев М. Ю., Подопригора В. Г.</i> Цифровая фильтрация данных рефлектотрии лесных покровов сигналами навигационных спутников L1-диапазона.....	91
<i>Лескова Ю. А., Музалевский К. В., Ружичка З.</i> Измерение толщины льда арктических озер в дельте реки лены по наблюдениям спутника Sentinel-1	95
<i>Мальканова А. В., Забродин А. Н., Пономарев Е. И.</i> Прогноз пожарных режимов Восточной Сибири на основе пролонгированных хронологий спутниковых данных.....	99
<i>Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев И. А., Токарева О. С.</i> Модели полносверточных сетей для семантической сегментации поврежденных деревьев пихты сибирской на изображениях с беспилотных летательных аппаратов.....	103
<i>Михеев А. П., Пятаева А. В.</i> Использование технологий глубокого обучения для распознавания лиц	107
<i>Плешкова Т. С., Краснов Д. А., Алехина А. Е., Сафонова А. Н.</i> Сегментирование отдельных деревьев нейросетью MASK R-CNN на изображениях Google	111
<i>Русин Д. С., Алехина А. Е., Сафонова А. Н., Дмитриев Е. В.</i> Использование алгоритмов глубокого обучения для текстурной сегментации спутниковых изображений сверхвысокого разрешения	114
<i>Саринова А. Ж.</i> Сжатие гиперспектральных изображений с потерями	119
<i>Сорокин А. В., Борисов А. Н., Реушев М. Ю., Иванов В. В., Харламов Д. В.</i> Влияние горизонтальной структуры древостоя на распространение сигналов навигационных спутников диапазона L1	124
<i>Тутатчиков В. С., Носков М. В.</i> Цифровая обработка космоснимков при помощи глобальной фильтрации в частотной области	128
<i>Федотова Е. В., Гостева А. А.</i> Использование Google Earth Engine в системах мониторинга.....	132
<i>Гаченко А. С., Хмельнов А. Е.</i> Технологии моделирования рельефа рек и водохранилищ.....	136

<i>Шевырногов А. П., Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В.</i> Построение карт урожайности посевов зерновых культур по спутниковым и беспилотным данным.....	140
<i>Шляхова М. М.</i> Использование 3D-моделей для контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов	144
МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ	148
<i>Варламова Е. В., Соловьев В. С.</i> Исследование динамики растительного покрова Восточной Сибири по данным дистанционного зондирования Земли	148
<i>Васильева С. А.</i> Пространственно-временные вариации распределения атмосферного метана на высоких широтах Северного полушария	151
<i>Восидов Ф. К., Курбонов Н. Б., Митусов А. В., Халимов А. М.</i> Дистанционный мониторинг подвижка ледника Русского географического общества в условиях изменения климата.....	155
<i>Голуков А. С., Петров И. А., Шушпанов А. С., Им С. Т., Харук В. И.</i> Гравиметрическая спутниковая съемка в анализе динамики прироста деревьев лиственницы	162
<i>Гордиенко А. С., Дыбина К. Д.</i> Мониторинг нефтеразливов по космическим снимкам.....	166
<i>Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю.</i> Разработка методических основ использования гиперспектрального оборудования для мониторинга сорной растительности	170
<i>Дергунов А. В., Якубайлик О. Э.</i> Влияние температурных инверсий на загрязнение воздуха в Красноярске	174
<i>Емельянов Д. В., Ботвич И. Ю., Шевырногов А. П.</i> Разность температур листовой поверхности и почвы – дополнительный фактор для анализа состояния посевов	178
<i>Забродин А. Н., Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В., Одинцов Р. В.</i> Вариации полной электронной концентрации в ионосфере в сейсмоактивных регионах.....	183
<i>Кулик Е. Н., Байкин Д. А.</i> Анализ влияния разлива нефтепродуктов на состояние природных комплексов в условиях Восточной Сибири	187
<i>Кулик Е. Н., Байшуаков А. Т.</i> Идентификация генетических типов почв по данным дистанционного зондирования Земли....	191
<i>Игнатъева А. В.</i> Место пожаров в общей динамике возникновения и распространения чрезвычайных ситуаций в Республике Бурятия.....	195
<i>Ильина С. П., Гостева А. А.</i> Применение данных дистанционного зондирования Земли в задачах мониторинга атмосферного загрязнения.....	199
<i>Картушинский А. В.</i> Глобальные и региональные условия взаимодействия климата океана и атмосферы на территории Евразии	203
<i>Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э.</i> Применение данных дистанционного зондирования для оценки экологической обстановки в Красноярске	208
<i>Крук Н. В., Мерко М. А., Мерко И. С.</i> Дистанционное зондирование в мониторинге золоотвалов ТЭС в климатических условиях Сибири.....	212

<i>Куулар Х. Б.</i> Оценка земного покрова на ключевых участках Республики Тыва предложенным индексом по данным Landsat.....	216
<i>Кудряшова С. Я., Чумбаев А. С., Мамаш Е. А., Пестунов И. А.</i> Совместный анализ наземных и спутниковых данных температурного мониторинга почв плоскогорья уюк (Юго-Восточный Алтай, Россия).....	220
<i>Попов В. Ф., Легостаева Я. Б., Гололобова А. Г., Козлова И. В., Ноев Д. С.</i> Изучение геоэкологической обстановки территории Далдынского кимберлитового поля по данным дистанционного зондирования	226
<i>Мальканова А. В., Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В., Кабанов А. А.</i> Уточнение областей гравитационных аномалий по данным КС GRACE, обусловленных процессами в очаговых зонах катастрофических землетрясений	230
<i>Маргарян В. Г., Азизян Л. В., Мисакян А. Э., Гайдукова Е. В., Цибульский Г. М., Раевич К. В.</i> Особенности максимальных расходов воды реки Арпа в современных условиях.....	234
<i>Матушко А. К.</i> Соотношение промышленных объектов и многолетних городских островов тепла.....	239
<i>Павлова Е. В.</i> Геоэкологическая оценка постагрогенных земель Республики Хакасия.....	243
<i>Перфильев Д. А., Авдюкова Т. В.</i> Сегментация изменения кислотности сельскохозяйственных земель Восточной Сибири.....	248
<i>Перфильева О. В., Рыбкин А. С., Сидоренков С. М.</i> Методологические аспекты зонирования территории по комплексной доступности лесов (на примере территории Тверской области).....	256
<i>Свердлик Л. Г., Имашев С. А.</i> Исследование предсейсмических эффектов когерентных вариаций температуры атмосферы	260
<i>Свердлик Л. Г.</i> Использование модифицированного критерия STA/LTA для выделения предсейсмических возмущений в атмосфере.....	264
<i>Сенин А. В., Маглинец Ю. А., Лосев В. И.</i> Автоматизация геологического картирования с использованием методов дистанционного зондирования Земли.....	268
<i>Синюткина А. А.</i> Пространственно-временное картографирование осушенных верховых болот Томской области.....	272
<i>Содномов Б. В., Аюржанаев А. А.</i> Оценка изменения лесистости бассейна р. Селенга по данным дистанционного зондирования Земли.....	276
<i>Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Маглинец Ю. А.</i> О некоторых особенностях снежного покрытия Центральной Азии в период 2001–2021.....	279
<i>Халимов А. М., Курбонов Н. Б., Митусов А. В., Восидов Ф. К.</i> Исследование процесса деградации ледника Гидрографическая партия с учетом климатического колебания	283
<i>Якимов Н. Д., Пономарев Е. И., Пономарева Т. В.</i> Дистанционный мониторинг состояния посттехногенных территорий по спектральным характеристикам.....	291

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 629.7; 51-7; 519.6

Т. А. Сушкевич

Главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук»,
Москва, Россия
e-mail: tamaras@keldysh.ru

МАТЕМАТИК-ЛЕГЕНДА М. В. КЕЛДЫШ – ГЛАВНЫЙ ТЕОРЕТИК КОСМОНАВТИКИ, ИДЕОЛОГ И ОРГАНИЗАТОР КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ. К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ М. В. КЕЛДЫША И 60-ЛЕТИЮ ПОЛЕТА В КОСМОС Ю. А. ГАГАРИНА В ГОД НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

В год 110-летия со дня рождения Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911–24.06.1978) и 60-летнего юбилея первого полета человека в космос 12 апреля 1961 года – это был гражданин СССР Юрий Алексеевич Гагарин (09.03.1964–27.03.1968), первый космонавт в истории человеческой цивилизации – необходимо отдать дань памяти и отметить исторические достижения в покорении космоса и космических исследованиях в «Эпоху Келдыша». С 1939 года М. В. Келдыш был засекреченным и говорили о нем мало: талантливый молодой математик, Главный Теоретик космонавтики, Президент Академии наук СССР, Трижды Герой Социалистического Труда. М. В. Келдыш с 1946 года отвечал за математику, расчеты, ЭВМ и заложил фундамент информационного общества и «цифровизации».

Ключевые слова: Келдыш, Гагарин, покорение космоса, космические исследования, всемирные программы, Будущее Земли.

Двадцать первый год двадцать первого века знаменателен двумя историческими юбилейными датами, которые разделяют ровно двести лет: **310 лет со дня рождения Михаила Васильевича Ломоносова (1711–1765) и 110 лет со дня рождения Мстислава Всеволодовича Келдыша (1911–1978) – Ломоносова XX века.** Никто и никогда не сделал так много для науки и научно-технического прогресса XX и XXI веков как математик-легенда М. В. Келдыш – Ученый и Президент Академии наук СССР (1961–1975). М. В. Келдыш реализовал пророческие слова К. Э. Циолковского: *«Математики, более знающие и более сильные, dokonчат, может быть, решение поставленных мною задач».* М. В. Келдыш был мечтателем. Но в отличие от К. Э. Циолковского, имел счастливую возможность воплотить мечты в жизнь. Он глубоко верил, что космос – удел человечества, это была его философская политика. С 1954 по 1978 г. Главный Теоретик космонавтики М. В. Келдыш – единственный из математиков Трижды Герой Социалистического Труда (1956, 1961, 1971) был идеологом и руководителем космических исследований [1–14].

В 2021 году отмечается **75-летие** ракетно-космической отрасли (1946-1971). **1946 г.** – ключевой в судьбе и жизни М. В. Келдыша. Датой основания ракетно-космической отрасли считается **13 мая 1946 г.**, когда И. В. Сталин подписал Постановление Совета министров СССР № 1017-419сс (гриф снят) «Вопросы реактивного вооружения», благодаря которому были определены конкретные меры по созданию ракетно-ядерного оружия.

Ключевым было Постановление Совета Министров СССР № 443-213сс от 13 февраля 1953 г. «О плане научно-исследовательских работ по ракетам дальнего действия на 1953-1955 гг.», которое успел подписать И. В. Сталин, лично курирующий ракетную отрасль и руководящие кадры... М. В. Келдыш **в 35 лет** (30 ноября 1946 г.) избран академиком, 2 декабря 1946 г. И. В. Сталин назначает его Начальником Реактивного научно-исследовательского института (РНИИ, НИИ-1 МАП); при поддержке И. В. Сталина в возрасте 42 лет в 1953 г. М.В.Келдыш основал Первый в мире Институт прикладной математики АН СССР (ОПМ МИАН СССР) для выполнения «Трех проектов» – «Атомный», «Космический», «Ракетно-ядерный щит» – на основе «новых технологий» – прикладная математика, расчеты, ЭВМ и т.д.

Историческая дата: 14 февраля 1954 г. в кабинете М.В.Келдыша (ныне Мемориальный музей-кабинет) – директора ОПМ МИАН СССР прошло ПЕРВОЕ совещание по искусственному спутнику Земли (ИСЗ). В этом совещании участвовали его ученики и те ученые и специалисты, кто был непосредственно связан с созданием космической техники и кто мог высказать предложения по научным исследованиям, которые нужно было бы проводить со спутников. По указанию М.В.Келдыша в 1955 г. из Академии наук с помощью Г. А. Скуридина разослали письма в разные организации и ученым разных специальностей с одним вопросом: **«Как можно использовать космос?»** Мнений и предложений было много и разных. Для убеждения руководителей СССР в необходимости освоения космического пространства и запусков космических спутников и кораблей М. В. Келдыш выделил **две главные задачи: разведка и наблюдения Земли**, вокруг которых сформировались многие научно-исследовательские проекты. В ноябре 1955 г. из АН СССР в ЦК КПСС и Совет Министров было направлено письмо с Программой космических исследований. Родилось новое научное направление **REMOTE SENSING** – дистанционное зондирование.

8 августа 1955 г. прошло заседание Президиума ЦК КПСС «О создании искусственного спутника Земли». Из Постановления Совета Министров СССР № 149-88с от 30 января 1956 г. «О создании объекта «Д»». План разработки и изготовления объекта «Д», проведения научно-исследовательских работ: «организовать при Президиуме Академии наук СССР Комиссию по осуществлению научного руководства при создании объекта «Д» во главе с академиком Келдышем и с участием ведущих ученых.» С.П.Королев и М.К.Тихонравов – заместители.

Из Постановления Совета Министров СССР «О присуждении Ленинских премий конструкторам, ученым..., отличившимся при создании первого в мире искусственного спутника Земли» № 1418-657сс от 18 декабря 1957 г. (гриф снят):

«Королеву Сергею Павловичу – главному конструктору ИСЗ и ракеты-носителя, ОКБ-1 ГК по оборонной технике СМ СССР за разработку научно-теоретических вопросов по созданию ИСЗ Келдышу Мстиславу Всеволодовичу –

научному руководителю работ по созданию научной аппаратуры для ИСЗ, АН СССР».

Из Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О развитии исследований по космическому пространству» от 10 декабря 1959 г. № 1388-618 (секретно особой важности – гриф снят):

«Придавая важное значение делу дальнейшего освоения космического пространства и обеспечению ведущей роли нашей страны в этой области, Центральный Комитет КПСС и Совет Министров Союза ССР ПОСТАНОВЛЯЮТ:

4. Для научно-технического руководства работами по исследованию космического пространства организовать при Академии наук СССР постоянно действующий Межведомственный научно-технический совет по космическим исследованиям (МНТС по КИ).

Утвердить Президиум Межведомственного научно-технического совета в составе тт. **Келдыша М. В. (председатель)**, Королева С. П. (заместитель председателя), Благоднарова А. А (заместитель председателя), Бушуева К. Д. (заместитель председателя); членов совета тт. Седова Л. И., Глушко В. П., Рязанского М. С., Янгеля М. К., Тюлина Г. А., Соколова А. И., Федорова Е. К., Амбарцумяна В. А., Агальцова Ф. А., Лейпунского А. И., Пашкова Г. Н., Гришина Л. А., Шокина А. И.».

С 1959 по 1978 г. М. В. Келдыш – Председатель МНТС по КИ в статусе Министра СССР. В апреле 1961 г. К. Н. Руднев – председатель Госкомиссии по подготовке к запуску корабля «Восток-3А», С. П. Королев и М. В. Келдыш – его заместители – отвечали за успех полета. Ю. А. Гагарин: На космодроме ... мы встретили многих знакомых специалистов и Главного Конструктора. Прибыл на космодром и Теоретик Космонавтики — так мы между собой называли видного советского учёного, под руководством которого составлялись сложнейшие расчёты космических рейсов. Он всё время находился вместе с Главным Конструктором.

Г. А. Скуридин: Первое десятилетие космической эры (1957–1967) явилось грандиозной эпопеей человеческого дерзновения, небывалой по размаху и неповторимой по своим научно-техническим результатам. Первый искусственный спутник Земли, первый полет к Луне и передача на Землю фотографий ее невидимой стороны, первая мягкая посадка на поверхность Луны, первые спутники Луны, полеты к Марсу и Венере, первый плавный спуск в атмосфере планеты Венеры автоматического аппарата, первый полет человека в космос, первый выход человека в космическое пространство. Ни одна эпоха не знала такого величественного взлета науки и техники!

Л. М. Зеленый: ...нельзя ни подробно описать, ни даже перечислить все достижения, которым мы обязаны этому выдающемуся ученому. ... приведем небольшую статистическую справку, позволяющую оценить масштабы космической программы СССР... лунная программа: «Луна-1»-«Луна-24» и «Зонд-3», «Зонд-5»-«Зонд-8»; исследования Марса («Марс-1»-«Марс-7», «Зонд-2»-«Зонд-3»), Венеры («Венера-1»-«Венера-10»). Серия спутников «Космос» для изучения различных явлений на околоземных орбитах. Исследования околоземного пространства и радиационных поясов («Электрон-1»-«Электрон-4»), космических лучей («Протон-1»-«Протон- 4»), Солнца, солнечно-земных связей и земной магнитосферы

(«Прогноз-1»-«Прогноз-6»). Программа совместных экспериментов со специалистами стран-участниц Совета экономического содружества (СЭВ) «Интеркосмос-1»-«Интеркосмос-17».

М. В. Келдыш – единственный в мире Ученый, именем которого названа Эпоха в истории развития не только российского государства, но и мировой цивилизации. «**Эпоха Келдыша**» – «**властелина цифры**»: при жизни реализовал свои «формулы и цифры» в проектах покорения авиации, атома, космоса, ракет, гиперзвука и изобретения ЭВМ; запустил ПЕРВЫЙ СПУТНИК и космический корабль с ПЕРВЫМ человеком в космос, создал пилотируемую космонавтику, осуществил полеты АМС на Луну, Марс, Венеру; предложил и реализовал космическую компоненту ПРО и систему «космического землеобзора»; заложил основы прикладной математики, современной «информатики» и «цифровизации» («computer science») и т.д.

Какие выводы и уроки для нас следуют из Эпохи М. В. Келдыша? Этот вопрос редакция РАН задала нескольким крупным ученым в дни празднования 100-летия М. В. Келдыша в феврале 2011 г., т.е. за два года до «реформы» РАН и передачи институтов в ФАНО.

Академик Гурий Иванович Марчук, президент Академии наук СССР (1986–1991): ... Мы преклоняем голову, когда речь идет об этом выдающемся ученом и президенте Академии наук. ... его имя еще долго будет для людей **символом** того, как нужно бороться за науку, особенно – за фундаментальную науку, и каким образом ее применять.

Академик Сергей Михайлович Алдошин, вице-президент РАН: Насколько я сейчас понимаю историю Академии наук, в разработке как современных видов оружия, так и новых ядерных технологий определяющую роль сыграла Академия наук. И именно президент Академии наук академик М. В. Келдыш был, как теперь выясняется, основным теоретиком атомной бомбы и водородной бомбы. ... основную роль играла Академия наук.

Академик Анатолий Иванович Григорьев, вице-президент РАН: Эпоха Мстислава Всеволодовича Келдыша охватывает значительный период в жизни страны. М. В. Келдыш прекрасно понимал, что полеты человека в космос, работа в космосе и безопасность космонавтов потребуют проведения большого объема медицинских и биологических исследований. Он стал инициатором создания Института медико-биологических проблем...

М. В. Келдыш в полной мере оценил необходимость объединения международных усилий в освоении космоса и его детищем стал «ИНТЕРКОСМОС». Ему принадлежит заслуга в установлении сотрудничества в этой области с США, Францией и другими странами. ... Эти годы были венцом его творческой жизни и плодотворным периодом в жизни нашей Академии. Он во многом способствовал авторитету Академии наук... Каковы уроки для нас? Нужна высокая компетенция, правильный выбор целей и путей развития, ответственность, умение координировать усилия многих людей, организаций и стран ... защищать авторитет Академии наук, быть патриотами своей Родины. Мы должны воспитывать молодое поколение на примере таких людей, каким был М. В. Келдыш.

Академик Валерий Васильевич Козлов, вице-президент РАН:

– Мстислав Всеволодович Келдыш – не просто наша история, я бы даже сказал – это наша легенда. **Время, когда Мстислав Всеволодович был президентом нашей Академии наук, вероятно, было временем одной из реальных вершин развития науки в нашей стране.** Когда были поставлены масштабные задачи, то – поскольку Академия наук всегда была, есть и, надеюсь, будет государственной Академией наук – все научное сопровождение этих великих проблем было поручено Академии наук. Мстислав Всеволодович Келдыш как раз был лидером Академии наук, нашим лидером в научном сопровождении этих программ. ... И просто **поразительно, что одному человеку удалось так много сделать.** М. В. Келдыш обладал какой-то магией, которая притягивала людей, создавала исключительно уважительное отношение к Академии наук, к науке в целом, и к нему персонально. Он как бы **лицетворял собою науку.** В России еще сохранен серьезный, солидный, мощный научный потенциал. Потенциал фундаментальной науки, в основном, сосредоточен в Российской академии наук. И важно, чтобы наш потенциал был в максимальной степени использован для развития России.

М. В. Келдыша знали во всем мире, отождествляя успехи советской науки с его личностью. Это были годы, когда в космосе мы были впереди планеты всей! После каждого космического успеха М. В. Келдыш сам лично проводил пресс-конференции в Актовом зале МГУ, который всегда был переполнен представителями со всего мира! Признанными мировыми державами были только СССР и США! Наука СССР одна могла противостоять науке всего мира!

Список литературы

1. Эпоха М. В. Келдыша: выводы и уроки.
2. URL:<http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=6531c71e-d91f-44a2-bd7e-812a1405cffc>.
3. Творческое наследие академика Сергея Павловича Королева. Избранные труды и документы / под ред. М. В. Келдыша. М.: Наука, 1980. 591 с.
4. Келдыш М. В., Маров М. Я. Космические исследования. М.: Наука, 1981. 192 с.
5. Келдыш М. В. Избранные труды. Математика. М.: Наука, 1985. 447 с.
6. Келдыш М. В. Избранные труды. Механика. М.: Наука, 1985. 567 с.
7. Келдыш М. В. Избранные труды. Общие вопросы развития науки. М.: Наука, 1985. 703 с.
8. Келдыш М. В. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988. 493 с.
9. Ченцов Н. Всемирно известный, всемерно засекреченный // Наука и жизнь. 1991. № 2. С. 102–107.
10. Келдыш М. В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 416 с.
11. Сушкевич Т. А. Главный Теоретик М. В. Келдыш и Главный Конструктор космонавтики С. П. Королев – покорители космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 9–25.
12. Сушкевич Т. А. М. В. Келдыш – организатор международного сотрудничества в космосе и первой советско-американской Программы «Союз-Аполлон» (ЭПАС) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 9–22.
13. Мстислав Келдыш // «Великие умы России» / под ред. В. С. Губарева. Вып. 2. М.: Изд. дом «Комсомольская правда», 2016. 96 с.
14. Освоение космического пространства в СССР. Официальные сообщения ТАСС и материалы центральной печати, 1957–1967 гг. / отв. ред. Скуридин Г. А. М.: Наука, 1971. 555 с.
15. Задача особой государственной важности. Из истории создания ракетно-ядерного ору-

жия и ракетных войск стратегического назначения (1945-1959 гг.): сб. док. / сост. В. И. Ивкин, Г. А. Сухина. М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2010.

T. A. Sushkevich

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, Russia

e-mail: tamaras@keldysh.ru

**MATHEMATICIAN-LEGEND M. V. KELDYSH – CHIEF THEORIST
OF COSMONAUTICS, IDEOLOGIST AND ORGANIZER
OF SPACE RESEARCH. TO THE 110TH ANNIVERSARY
OF THE BIRTH OF M. V. KELDYSH AND THE 60TH ANNIVERSARY
OF YURY GAGARIN'S SPACE FLIGHT IN THE YEAR OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY**

In the year of the 110th anniversary of the birth of Mstislav Vsevolodovich Keldysh (10.02.1911-24.06.1978) and the 60th anniversary of the first human flight into space on April 12, 1961 – it was a citizen of the USSR Yuri Alekseevich Gagarin (09.03.1964-27.03.1968), the first cosmonaut in the history of human civilization – it is necessary to pay tribute to the memory and celebrate the historical achievements in space conquest and space research in the "Keldysh Era". Since 1939, M. V. Keldysh was secreted and little was said about him: a talented young mathematician, Chief Theorist of Cosmonautics, President of the USSR Academy of Sciences, Three times Hero of Socialist Labor. Since 1946, M. V. Keldysh was responsible for mathematics, calculations, computers and laid the foundation for the modern information society and "digitalization".

Keywords: Keldysh, Gagarin, space research, world programs, Earth Future.

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 631.5:528.8

В. В. Вечерков, Я. А. Филина, Е. А. Дунаева
ФГБУН «НИИСХ Крыма», Симферополь, Республика Крым
e-mail: water_crimea@hotmail.com

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Представлены результаты оценки состояния посевов подсолнечника с ранее традиционной технологией возделывания и no-till на территории Кондратьевского сельского поселения Джанкойского района Республики Крым с использованием БВС и данных ДЗЗ. На основе анализа данных съемки БВС выделены участки посевов с ненарушенной и нарушенной растительностью, для которых с использованием снимков высокого разрешения Sentinel рассчитан нормализованный относительный индекс растительности (NDVI). Выявлена связь между рельефом местности и состоянием посевов.

Ключевые слова: традиционная технология, no-till, биопродуктивность, варьирование, ДЗЗ, NDVI.

Введение. Мониторинг сельхозугодий позволяет проводить инвентаризацию земель, выполнять оперативный контроль за состоянием посевов и получать информацию о плодородии почвы, выявлять процессы деградации земельных ресурсов и решать многие другие задачи агропромышленного комплекса. В настоящее время для оперативного получения информации о ситуации на полях всё чаще используют снимки, получаемые с космических или беспилотных летательных аппаратов.

Ранее проводились работы [1–3] по исследованию возможности использования БВС (беспилотного воздушного средства) для идентификации состояния посевов сельскохозяйственных культур, которые позволили определить перспективность данного направления.

Цель данного исследования – идентификация беспосевных пятен в посевах сельскохозяйственных культур с использованием БВС, определение их площади и причин возникновения.

Территория исследований – земли сельскохозяйственного назначения на территории Кондратьевского сельского поселения Джанкойского района Республики Крым.

Материалы и методы. Для проведения исследования взяты снимки поля, сделанные с помощью БВС DJI Phantom 4 Pro+ V2.0 (1 декада июля), и спутниковый сни-

мок Sentinel-2B (за 10 июля). Максимальная высота полёта моделей Phantom 500 м, однако в соответствии с законодательством РФ съёмка БВС разрешается на высотах до 150 м в пределах прямой видимости и в светлое время суток [4]. Съёмка поля производилась с высоты 120 м вдоль края поля с целью возможности привязки полученных снимков к границам данного поля. Площадь поля составляет более 128 га, на поле произрастает подсолнечник, возделываемый по 2-м технологиям: на площади 106 га – технология no-till (участок А), на площади 22 га (участок Б) – традиционная технология до 2020, в 2021 г. – сев выполнен сеялкой точного высева (рис. 1).

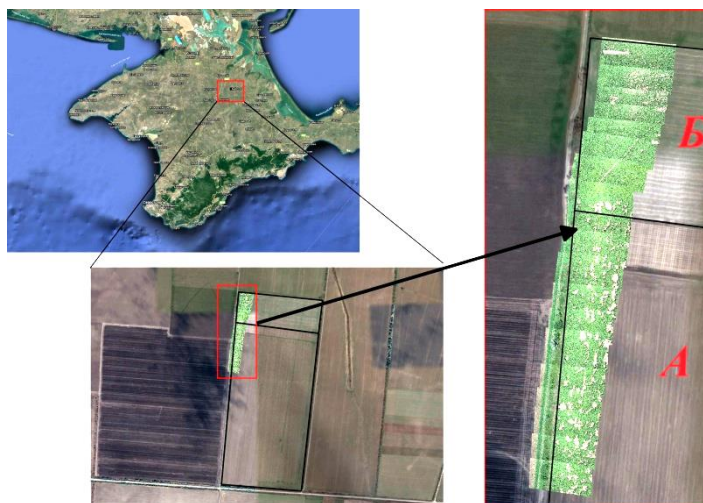


Рис. 1. Геореференцированные данные аэрофотосъемки с БВС

В связи с тем, что захватить поле единым изображением невозможно было получено 19 изображений, отображающих состояние растительности вдоль границы поля. Для обработки информации использовалось ПО QGIS версии 3.10.7. Привязка растров проведена с помощью модуля «Привязка растров», перекрытие снимков составило 20 %. По полученным изображениям был создан растровый композит для участка поля, площадь которого составила 6,59 га (или 1/20 от всей площади поля).

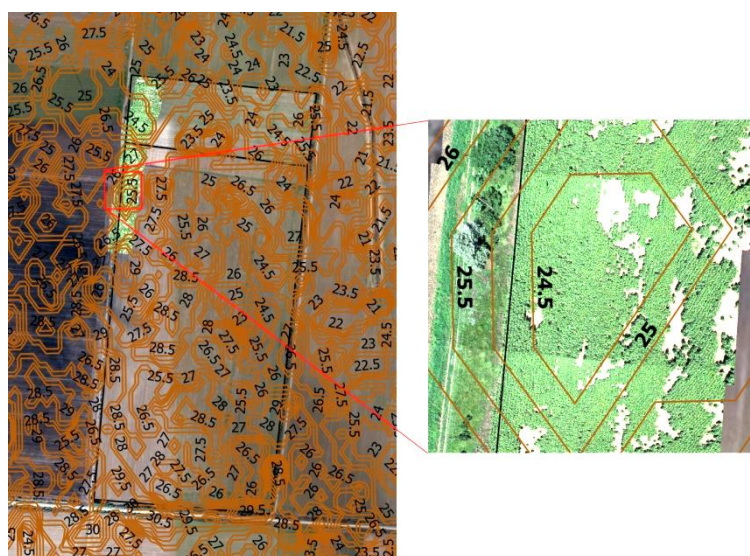


Рис. 2. Изолинии рельефа на исследуемом поле

Далее проведён подсчет площадей беспосевных пятен для определения состояния посева подсолнечника на поле и выполнен морфометрический анализ рельефа для выявления причин возникновения участков без культуры. Создание цифровой модели рельефа проводилось с использованием набора данных SRTM 1 Arc-Second Global от Геологической службы США [5]. 3D рельеф создан с помощью инструмента «Теневой рельеф», сечение рельефа для более точного анализа составило 0,5 м (рис. 2).

Результаты. С помощью инструмента «Зональная статистика» рассчитаны средние показатели индекса NDVI для поля в целом (участки *A* и *B*) и для 3 элементарных участков с плотной густотой посева (участки 1–3) и с разреженным посевом (участки 4–6) (рис. 3). Среднее значение индекса NDVI на участке *A* составило 0,52; среднее значение индекса на участке *B* – 0,62.

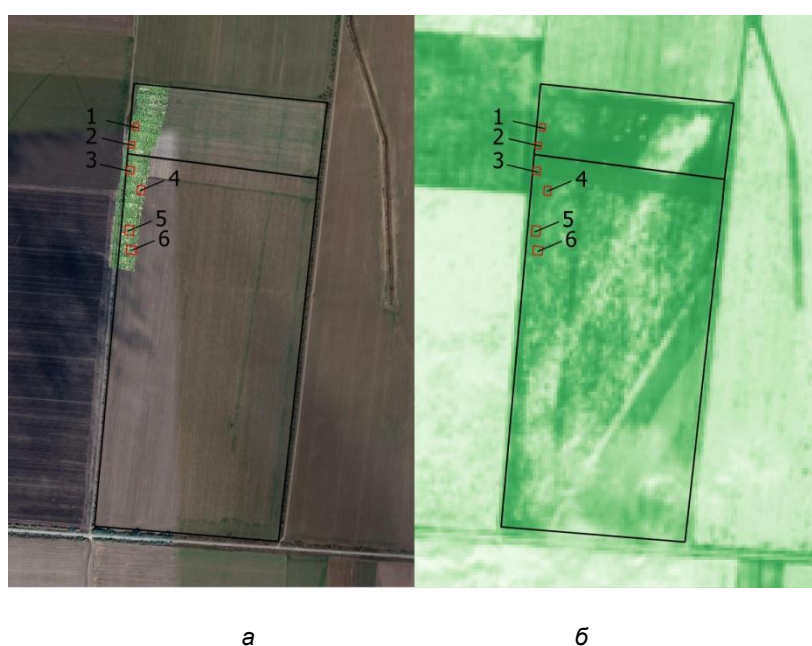


Рис. 3. Определение участков с ненарушенной (1–3) и нарушенной (4–6) растительностью: на снимке с БВС (а), NDVI по Sentinel-2В (б)

Средние значения индекса NDVI для каждого из трех участков с ненарушенной растительностью составили 0,69; 0,71; 0,70, для трех участков с нарушенной растительностью соответственно – 0,69; 0,65; 0,63. Значения индекса NDVI такие же или ниже, что объясняются пространственным разрешением снимка Sentinel-2В (размер пикселя 10x10 м) и худшим состоянием растительности на участке. Площадь беспосевных пятен на участке площадью 6,59 га составила 0,78 га (или 12 % от площади участка). Т.е., можно предположить, что приблизительно 12 % площади поля занимают участки разреженной растительности.

Морфометрический анализ рельефа показал, что на участке поля, отмеченным большим количеством беспосевных участков, наблюдается перепад местности с 26 метров на краю поля до 24,5 метров в направлении центра поля. Вероятно, всходы подсолнечника смыло вместе с верхним плодородным слоем во время выпадения сильных осадков, начавшихся в данном регионе во 2-й декаде июня.

Выводы. Результаты исследований позволили получить предварительные значения точности оценки неоднородности посевов сельскохозяйственных культур на полях посредством фотокамеры беспилотного воздушного судна. БВС позволяет проводить дистанционный мониторинг полей, в оперативном режиме получать данные по качественному изменению культурной растительности и позиционировать очаги неоднородности или уничтожения посевов различными факторами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-016-00148 А.

Список литературы

1. Совместное использование беспилотных летательных аппаратов и дистанционного зондирования Земли для оценки биопродуктивности посевов / Е. А. Дунаева [и др.] // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы V Международной научной конференции. Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. 2018. С. 302–306.
2. Дунаева Е. А., Головастова Е. С., Вечерков В. В. Мониторинг сельскохозяйственных земель с использованием аэрофотосъемки // Тенденции, направления и перспективы развития экономических отношений в современных условиях хозяйствования. Материалы III межрегиональной с международным участием научно-практической конференции. 2018. С. 305–308.
3. Вечерков В. В., Дунаева Е. А. Исследование возможности использования БПЛА для идентификации состояния посевов сельскохозяйственных культур // Агрохимическое обеспечение цифрового земледелия. Материалы Международной научной конференции. 2019. С. 16–21.
4. О внесении изменений в Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации. Постановление Правительства Российской Федерации от 3 февраля 2020 г. № 74.
5. U.S. Geological Survey. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 20.07.2021 г.).

V. V. Vecherkov, Ya. A. Filina, Ie. A. Dunaieva

Federal State Budget Scientific Institution «Research Institute of Agriculture of Crimea»,
Simferopol, Crimea
e-mail: water_crimea@hotmail.com

ASSESSMENT OF THE STATE OF CROPS USING UAV AND REMOTE SENSING DATA

The results of assessing the state of sunflower crops with a traditional cultivation system and no-till on the territory of the Kondratyevsky rural settlement of the Dzhankoy region of the Republic of Crimea using UAV and remote sensing data are presented. Based on the analysis of the UAV survey data, areas of crops with undisturbed and disturbed vegetation were identified, for which the normalized relative vegetation index (NDVI) was calculated using high-resolution Sentinel images. The relationship between the terrain and the state of crops was revealed.

Keywords: traditional technology, no-till, bioproductivity, variation, remote sensing, NDVI.

И. И. Зимин, М. В. Валов, В. А. Скутин

Акционерное общество «"Информационные спутниковые системы" имени академика
М. Ф. Решетнёва», Железногорск, Россия
e-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru, valov@iss-reshetnev.ru, skutinva@iss-reshetnev.ru

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ АО «ИСС»

В настоящей статье рассмотрена актуальность создания малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в АО «ИСС». Рассмотрен ряд перспективных проектов малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, проектирование которых ведется в АО «ИСС». Все рассмотренные малые космические аппараты построены на базе новых унифицированных космических платформ, имеющих высокие технические характеристики. В статье приведены основные технические характеристики малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: малый космический аппарат, дистанционное зондирование земли, платформа космического аппарата, оптико-электронная аппаратура, радиолокация.

Введение. Данные космических съемок стали доступны широкому кругу пользователей и активно применяются не только в научных, но и в производственных целях. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из основных источников актуальных и оперативных данных для геоинформационных систем. Научно-технические достижения в области создания и развития космических систем, технологий получения, обработки и интерпретации данных многократно расширили круг задач, решаемых с помощью ДЗЗ. Основываясь на данных, предоставленных компанией «Совзонд» [1] и группой компаний «Сканекс» [2] можно сделать вывод, что лидирующие позиции в ДЗЗ занимают такие отраслевые решения, как картография, кадастр, лесное хозяйство и нефтяные комплексы. В этих отраслевых решениях используются снимки высокого (от 2,5 до 1 м) и сверхвысокого (менее 1 м) разрешения, причем снимки сверхвысокого разрешения используются чаще.

В настоящее время наблюдается тенденция по развертыванию группировок малых космических аппаратов (МКА) ДЗЗ с режимами съемки, близкими к реальному времени. Такие группировки состоят из нескольких десятков МКА (10–20 шт. и более), что позволяет получать космические снимки с периодичностью 60–120 минут. Примерами таких группировок могут служить Vivid-i (Великобритания), Канопус-В (Россия), SkySat (США), Jilin (Китай), Cartosat (Индия), Iceye (Финляндия), Capella (США).

В настоящий момент в АО «ИСС» на различных стадиях разработки находится ряд перспективных проектов малых космических аппаратов ДЗЗ в интересах коммерческих заказчиков.

МКА «ИСС-55». МКА «ИСС-55» прорабатывался в рамках внутренней НИОКР. Основной полезной нагрузкой МКА ДЗЗ является оптико-электронная аппаратура (ОЭА)

высокого пространственного разрешения с разрешающей способностью менее одного метра. В дополнение к основной аппаратуре детального наблюдения устанавливается мультиспектральная съемочная система (МСС-М) среднего пространственного разрешения с разрешающей способностью тридцать метров, имеющей в своем составе Фурье-видео спектрометр (ФВС) и инфракрасную съемочную систему (ИКСС). Оба комплекта аппаратуры разрабатываются и изготавливаются ОАО «Пеленг», Республика Беларусь.

Основные тактико-технические характеристики МКА «ИСС-55» приведены в табл. 1, внешний вид показан на рис. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики МКА «ИСС-55»

Характеристика	Значение		
Универсальная космическая платформа	НТ-100		
Масса платформы (сухая), кг	100		
Масса, полезной нагрузки, кг	100		
Пиковая мощность, выделяемая для полезной нагрузки, Вт	120		
Точность ориентации, град	0,05		
Точность стабилизации, град/с	0,0004		
Скорость перенацеливания, град/с	1,5		
Система коррекции: Тип ДУ/рабочее тело/ масса топлива, кг	ТКД/гидразин/8		
Бортовая радиолиния: - командная, Кбит/с - целевая, Мбит/с	2,5 120		
Срок активного существования, лет	5		
Параметры полезной нагрузки (для высоты орбиты 450 км)			
Пространственное разрешение на местности, м/пиксел: - панхроматический канал: - мультиспектральный канал: - гиперспектральный канал: - инфракрасный канал:	ОЭА	МСС-М	
		ФВС	ИКСС
	0,9	15	–
	3,6	–	–
	–	30	–
	–	–	28
Полоса захвата, км	7,2	30	28
Полоса обзора, км	900	1000	1000

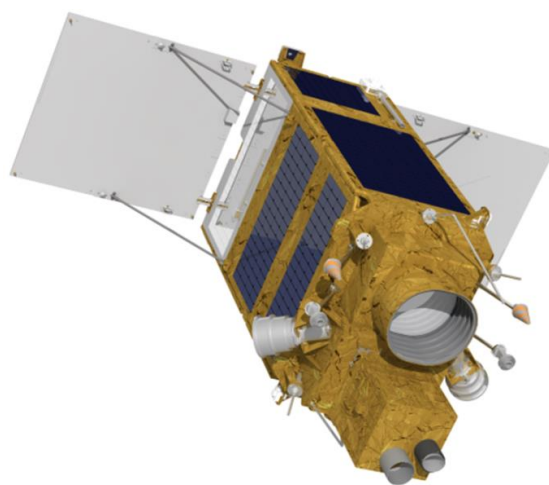


Рис 1. МКА «ИСС-55»

Перспективный оптико-электронный МКА. Оптико-электронный МКА прорабатывался в рамках подготовки технического предложения. МКА входит в состав космической системы ДЗЗ и должен обеспечивать панхроматическую и мультиспектральную съемку в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах заданных районов поверхности Земли, хранение полученной целевой информации (ЦИ) и передачу ее на земные станции приема ЦИ в зонах радиовидимости.

Основные тактико-технические характеристики оптико-электронного МКА приведены в табл. 2, внешний вид показан на рис. 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики оптико-электронного МКА

Характеристика	Значение
Универсальная космическая платформа	НТ-500
Масса платформы (сухая), кг	330
Масса, полезной нагрузки, кг	260
Пиковая мощность, выделяемая для полезной нагрузки, Вт	400
Точность ориентации, град	0,05
Точность стабилизации, град/с	0,001
Скорость перенацеливания, град/с	5,2
Система коррекции: Тип ДУ вариант 1/рабочее тело/ масса топлива, кг Тип ДУ вариант 2/рабочее тело/ масса топлива, кг	ЭРДУ/ксенон/11,3 ТКД/гидразин/60
Бортовая радиолиния: - командная, Кбит/с - целевая, Мбит/с	32 1000
Срок активного существования, лет	10
Параметры полезной нагрузки (для высоты орбиты 500 км)	
Пространственное разрешение на местности, м/пиксел	0,7
Полоса захвата, км	12

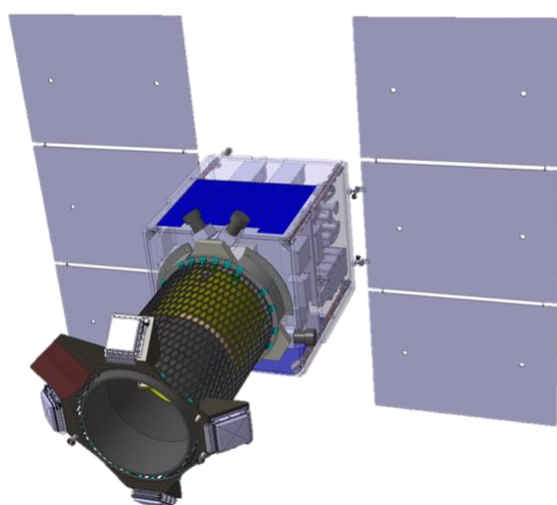


Рис 2. Оптико-электронный МКА

Перспективный радиолокационный МКА. Радиолокационный МКА прорабатывался в рамках подготовки технического предложения. МКА предназначен для всепогодной радиолокационной съемки заданных районов поверхности Земли в С-диапазоне частот, накопления полученной информации и передачи ее на пункты приема изображений, функционирования в составе космической системы ДЗЗ.

Основные тактико-технические характеристики радиолокационного МКА приведены в табл. 3, внешний вид показан на рис. 3.

Таблица 3

Основные технические характеристики радиолокационного МКА

Характеристика	Значение
Универсальная космическая платформа	НТ-500
Масса платформы (сухая), кг	380
Масса, полезной нагрузки, кг	252
Пиковая мощность, выделяемая для полезной нагрузки, Вт	3600
Точность ориентации, град	0,04
Точность стабилизации, град/с	0,001
Скорость перенацеливания, град/с	2
Система коррекции:	
Тип ДУ/рабочее тело/ масса топлива, кг	ЭРДУ/ксенон/18
Бортовая радиолиния:	
- командная, Кбит/с	32
- целевая, Мбит/с	192
Срок активного существования, лет	8–10
Параметры полезной нагрузки (для высоты орбиты 500 км)	
Пространственное разрешение на местности, м/пиксел:	
- в детальном режиме съемки	1–1,9
- в маршрутном режиме съемки	10
- в обзорном режиме съемки	40
Углы визирования (падения), град	
- маршрутный и обзорный режим	18–60
- детальный режим	20–55

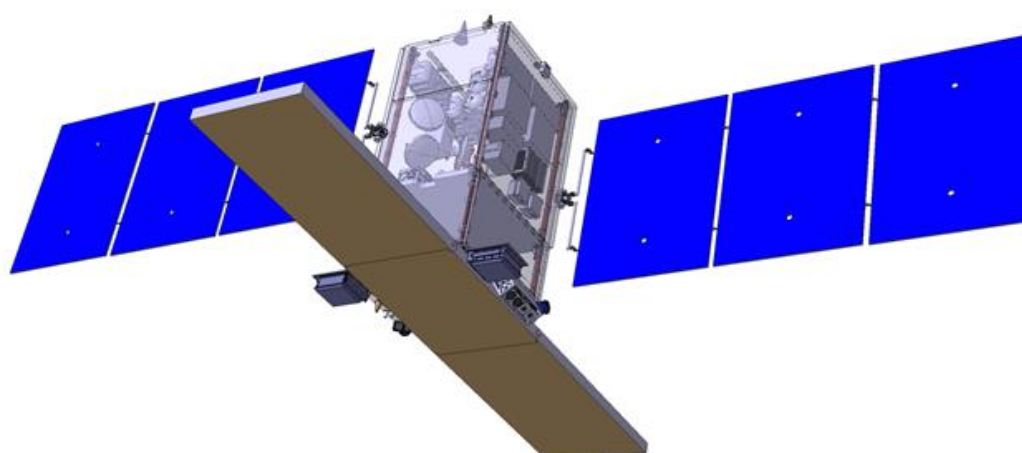


Рис 3. Радиолокационный МКА

Заключение. Разрабатываемые в АО «ИСС» перспективные МКА ДЗЗ могут быть востребованы в отраслевых решениях ДЗЗ, поскольку удовлетворяют основным техническим и эксплуатационным требованиям, предъявляемым к современным космическим аппаратам ДЗЗ.

Список литературы

1. Официальный сайт компании «Совзонд» [Электронный ресурс]. URL: <http://sovzond.ru> (дата обращения: 24.07.21).
2. Официальный сайт группы компаний компании «Сканэкс» [Электронный ресурс]. URL: <http://new.scanex.ru> (дата обращения: 24.07.21).
3. Зимин И. И., Валов М. В., Кириллов В. А. Перспективы развития малых космических аппаратов АО «ИСС» // Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19, № 120. С. 48–55.

I. I. Zimin, M. V. Valov, V. A. Skutin

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russia

e-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru, valov@iss-reshetnev.ru, skutinva@iss-reshetnev.ru

**PERSPECTIVE PROJECTS SMALL SPACECRAFTS FOR EARTH
REMOTE SENSING OF JSC "ISS – RESHETNEV COMPANY"**

This article discusses the relevance of the creation of small spacecraft for remote sensing of the Earth in JSC "ISS – Reshetnev Company". A number of promising projects of small spacecraft for remote sensing of the Earth, which are being designed at JSC "ISS – Reshetnev Company", have been considered. All considered small spacecraft are built on the basis of new unified space platforms with high technical characteristics. The article presents the main technical characteristics of small spacecraft for remote sensing of the Earth.

Keywords: small spacecraft, earth remote sensing, spacecraft platform, optoelectronic equipment, radiolocation.

С. С. Карпухин

Кандидат географических наук, АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия
e-mail: npk12@infogeo.info

СИСТЕМНЫЕ ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОГРАФИИ

Доклад посвящён раскрытию сущности и определению объекта, предмета, методологии космической географии и её роли в обеспечении устойчивого развития регионов страны.

Ключевые слова: данные ДЗЗ из космоса, космическая география, парадигма, геопро-странственная информация, природно-хозяйственная система.

Введение. Традиционно под географией подразумевалось «землеописание» (в переводе с греческого «гео» – земля, «графо» – писать, описывать) на базе имевшихся в распоряжении исследователей на конкретный момент времени наземных наблюдений и сведений. Сегодня же самая надёжная и совершенная география регионов Земли возможна лишь с использованием высокоточных мультиспектральных космических данных (при необходимости с привлечением данных, полученных воздушными средствами) с опорой на многоотраслевую информацию по ключевым тестовым участкам для обеспечения прироста достоверности и экстраполяции географических знаний о регионах и формирования геоинформационного пространства России [1].

Основные понятия и определения. В научной литературе по дистанционному зондированию Земли из космоса нередко встречаются такие близкие по звучанию к *космической географии* термины как «космическое землеведение» и «космическое природоведение». Рассмотрим их наиболее существенные отличительные особенности.

Содержание понятия *космическое землеведение* раскрыто в книге Б. В. Виноградова и К.Я. Кондратьева в 1971 г. [2] как изучение геологического строения и рельефа планеты, физики атмосферы, океана, вод суши, почвенного и растительного покрова на основе применения телевизионных изображений и оригинальных фотографий Земли, полученных с различных космических носителей. А. В. Сидоренко в 1980 г. [3] определил космическое землеведение как исследование земного и околоземного пространства космическими методами, которое осуществляется с помощью бортовой аппаратуры космических аппаратов и служит для изучения и освоения природных ресурсов и охраны окружающей среды.

В современной трактовке ряда исследователей (Садовничий В. А., Козодеров В. В. и др.) [4; 5] космическое землеведение рассматривается как теоретико-методологическая платформа (подсистема) «понимания (дешифрирования)» космических изображений Земли.

Космическое природоведение. Термин предложен Ю. П. Киенко в 1979 г. в работе «Основы космического природоведения». Книга выпущена в качестве пособия

по обработке космических фотоматериалов для специалистов топографо-геодезической службы [6]. Под космическим природоведением понимается широкое применение ДЗЗ из космоса в различных областях деятельности человека, в том числе, при изучении природных ресурсов и окружающей среды [7; 8].

Термин *космическая география* в отечественной научной литературе впервые употреблён в работе, вышедшей в 1988 г. под редакцией Ю. Г. Симонова «Космическая география. Полигонные исследования» [9]. Однако авторы монографии не дают конкретного определения термина. В свою очередь, космонавт В. В. Лебедев в 1998 г., опираясь на уже накопленный к тому моменту большой объем материалов космических съёмок и результаты собственных наблюдений Земли с борта орбитальных станций, высказал мнение о необходимости усовершенствования традиционного курса географии. «Мечтаю, когда в школах страны будет идти урок *космической географии...*» [10].

Итак, космическое землеведение и космическое природоведение нацелены на широкое применение космической техники при исследовании Земли (и других небесных тел) из космоса. А вот феномен *космической географии*, пока не определился со своими системными атрибутами: объектом, предметом, методологией, – и тезаурусом и в настоящее время находится в стадии формирования.

Материалы и методы исследования. К исследованию особенностей научного феномена космической географии правомерно применить наработанный в науковедении методический инструментарий, изложенный Т. Куном в монографии «Структура научных революций» [11].

Согласно современным представлениям наука – это социальный институт, в котором действуют социальные группы и организации, объединяющим началом которых является *парадигма*: единый стиль мышления, признание данным научным сообществом определенных фундаментальных теоретических построений и методов. Иными словами, *научная парадигма* (от греч. *παράδειγμα*, «пример, модель, образец») – это принятая модель рациональной научной деятельности, совокупность знаний, методов, образцов решения задач, ценностей, разделяемых научным сообществом. С позиций философии науки, парадигма включает в себя два начала: *онтологическое* (научную картину исследуемой реальности) и *методологическое* (идеалы и нормы научного исследования). Как следствие, парадигма выполняет две функции: познавательную и нормативную.

Согласно Т. Куну в развитии любого научного феномена, к каковым мы относим и космическую географию, можно выделить четыре этапа: допарадигмальный; формирования парадигмы; этап нормальной науки; экстраординарная наука. Этапы формирования космической географии в статье не рассматриваются.

Результаты исследований и их обсуждение. Введём определение космической географии, опираясь на нашу публикацию [12].

Космическая география – естественнонаучно-техническое направление, интегрированное в единую сложную систему путём сопряжения теоретических разработок, средств и методов естественных, математических, социально-экономических, информационных и технических наук для получения и обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса, создания *системной геопространственной*

информации о ПХС и формирования космо-географических баз знаний в интересах управления устойчивым развитием регионов.

Будучи ориентированной на создание постоянно актуализируемого инновационного цифрового описания регионов России (иначе – геоинформационного пространства), космическая география, опираясь на средства и данные ДЗЗ из космоса, теоретико-методологическую платформу космического землеведения и технологический базис географических информационных систем (ГИС) превращает традиционную «землеописательную» географию в созидательное естественнонаучно-техническое направление, обладающее в современном мире огромной производительной силой.

Объектом космической географии являются природно-хозяйственные системы – пространственные образования нового типа, которым свойственны признаки целостности и иерархичности строения.

Предметом космической географии служат региональные космогеографические базы знаний (РКГБЗ) [13; 14], сформированные на основе системной геопространственной информации о ПХС и функционирующие в виде мониторинговых атласных космогеографических информационных систем (МАКГИС) [15].

Системообразующим методом космической географии является комплексный системный космогеографический мониторинг (СКГМ) природно-хозяйственной среды для целей управления устойчивым развитием регионов.

Начала космической географии

Онтологическое начало выполняет познавательную функцию. Познавательная функция парадигмы космической географии заключается в создании новых космогеографических знаний об объекте исследования, в формировании такого «правильного (т. е. по правилам космической географии) географического описания» ПХС в цифровом формате, которое бы обеспечило адекватное, точное и достоверное знание об объектах и явлениях территории, их современном состоянии, процессах становления, закономерностях развития. Это позволило бы решать средствами МАКГИС весь необходимый набор задач, возникающих в процессе управления устойчивым (т. е. безопасным и сбалансированным) развитием региона.

Методологическое начало выполняет нормативную функцию парадигмы космической географии как сложной сопряжённой системы научных дисциплин. Реализация данной функции связана с созданием методологии СКГМ регионов земной поверхности путём формирования модели рациональной научной деятельности на основе совокупности знаний и методов решения задач. Структура парадигмы космической географии не рассматривается в данной статье из-за ограничений по объёму публикации.

В развитие представлений о космической геопространственной информации [16], в состав **системной геопространственной информации о ПХС**, формируемой в процессе СКГМ территории, включены:

– базовая высокоточная геопространственная продукция двойного назначения, создаваемая на основе данных ДЗЗ из космоса (ортофотопланы, БСПВР на территории субъектов и регионов страны);

– обновленные топографические карты и обновлённая Единая электронная картографическая основа;

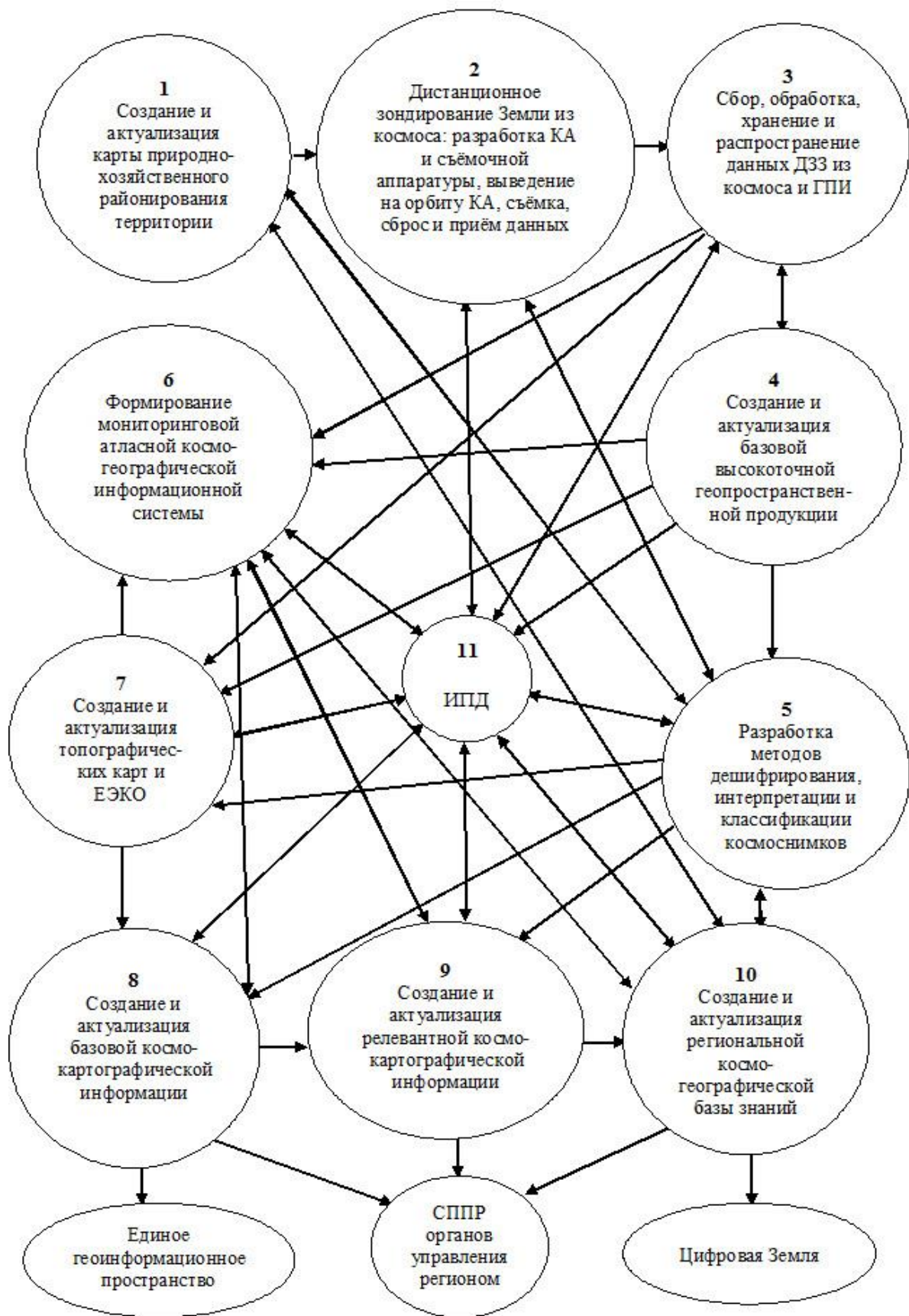


Рисунок. Подсистемы космической географии

– базовая космокартографическая информация (топографическая, использования земель, геологическая, растительности, гидрографическая, геоморфологическая, почвенная, ландшафтная, экологическая карты), создаваемая на основе базовой высокоточной геопространственной продукции, актуализированных топографических карт и ЕЭКО с привлечением данных географических и других научных дисциплин об объектах, событиях, явлениях и процессах земной поверхности;

– релевантная космокартографическая информация (карты физико-географической, природно-ресурсной, социально-экономической, экологической, специальной военной и др. тематики, – на территории субъектов и регионов страны), созданная на основе базовой высокоточной геопространственной продукции и базовой космокартографической информации с привлечением данных географических и других научных дисциплин об объектах, событиях, явлениях и процессах земной поверхности.

Базовой является геопространственная продукция и информация, которая используется в качестве основы при разработке производных карт (и информационно-картографических документов). Релевантная космокартографическая информация – соответствует целям и потребностям пользователя и формируется на основе базовых компонентов.

Концептуальная модель парадигмы космической географии. Концептуальная модель парадигмы космической географии – Подсистемы космической географии (рисунок) – отражает взаимодействие/сопряжение одиннадцати основных подсистем СКГМ. Детальное рассмотрение каждой из подсистем и особенностей их взаимодействие/сопряжения не включены в статью из-за ограничений по объёму публикации.

Выводы. Дистанционное зондирование Земли из космоса стало неотъемлемой частью методологии географических исследований регионов планеты. Выполненная работа позволяет по-новому взглянуть на теоретические основы ДЗЗ из космоса и современной географии. За последние десятилетия на основе активного развития ДЗЗ из космоса, как бы исподволь, незримо сформировалось новое инновационное научное направление – космическая география. Вектор дальнейшего развития геоинформационной поддержки управления территориями направлен на формирование региональных космогеографических баз знаний. Парадигма космической географии – естественнонаучно-технического направления, воплощается в жизнь на основе сопряжения теоретических разработок, средств, методов и подсистем системного космогеографического мониторинга природно-хозяйственной среды.

Список литературы

1. Карпухин С. С. Концепция геоинформационного пространства «Цифровая Россия» // Геодезия и картография. 2011. № 5. С. 33–39.
2. Виноградов Б. В., Кондратьев К. Я. Космические методы землеведения. Л.: Гидрометеоиздат. 1971. 188 с.
3. Сидоренко А. В. Задачи исследования природных ресурсов Земли космическими средствами // Исследование Земли из космоса. 1980. № 1. С. 5–8.
4. Садовничий В.А., Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Борзяк В.В. Инновационная технология обработки данных аэрокосмического мониторинга природно-техногенных объектов // Жизнь Земли. 2012. № 34. С. 127–142.
5. Садовничий В. А., Козодеров В. В. Современные методы космического землеведения // Жизнь Земли. 2014. Вып. 35/36. С. 5–18.
6. Основы космического природоведения / под ред. Ю. П. Киенко. М. ЦНИИГАиК. 1979. 259 с.

7. Киенко Ю. П. Введение в космическое природоведение и картографирование. М.: Картгеоцентр: Геодезиздат, 1994. 213 с.
8. Киенко Ю. П. Основы космического природоведения: учебник для вузов. М.: Картгеоцентр. Геодезиздат. 1999. 285 с.
9. Космическая география. Полигонные исследования / под ред. Ю. Г. Симонова. М.: Изд-во МГУ. 1988. 128 с.
10. Лебедев В. В. Космическая география // Наука и жизнь. 1988. № 8. С. 34–39.
11. Кун Т. Структура научных революций. М.: Прогресс. 1977. 554 с.
12. Карпухин С. С. Инструментарий космической географии в информационном обеспечении управления регионом // IX науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем», 2–3 сентября 2020 г. Казань. 2020. С. 110–115.
13. Мартыненко А. И. Создание и применение базы знаний о Земле // Системы и средства информатики: Спец. вып. Геоинформационные технологии. / под ред. И. А. Соколова. М.: ИПИ РАН, 2004. С. 17–38.
14. Карпухин С. С. Методологические аспекты комплексного геоинформационного картографирования природно-хозяйственных систем // Системы и средства информатики. Спец. вып. Геоинформационные технологии / отв. ред. И. А. Соколов. М.: ИПИ РАН. 2008. С. 224–249.
15. Черненко А. Н., Карпухин С. С. Алтынов А. Е., Белоусов С. К. Комплексная космическая мониторинговая атласная ГИС Арктического региона России // XIII науч.-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». СПб.: ГСП МЧС России, 2014. С. 244–249.
16. Заичко В. А., Кутумов А. А., Шведов Д. О. Данные ДЗЗ из космоса – элемент единого геоинформационного пространства Российской Федерации // Геопрофи. 2020 № 6. С. 4–11. URL: [http:// www.GEOPROFI.RU](http://www.GEOPROFI.RU).

S. S. Karpukhin

JSC "Research Institute of Precision Instruments", Moscow, Russia

PhD in Geography

e-mail: npk12@infogeo.info

SYSTEM FOUNDATIONS OF SPACE GEOGRAPHY

The report is devoted to the disclosure of the essence and definition of the object, subject, methodology of space geography and its role in ensuring sustainable development of the country's regions.

Keywords: remote sensing data from space, space geography, paradigm, geospatial information, natural and economic system.

А. С. Куклин, С. В. Иванов, Ю. В. Федоркова

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

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДАННЫМИ ДЗЗ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ В РЕЖИМЕ ЧС

Данная статья описывает систему оперативного обеспечения данными с российских спутников ДЗЗ типа «Ресурс-П» и «Канопус-В» региональных органов управления при их функционировании в режиме ЧС. В статье приводится описание порядка взаимодействия российского Оператора космических средств ДЗЗ (Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы») с МЧС России и Международной Хартией по космосу и крупным катастрофам, а также механизма оперативного обеспечения региональных органов управления данными ДЗЗ из космоса по районам чрезвычайных ситуаций. Также в статье приводится статистика по объёму предоставленных данных и выводы об итогах работы системы.

Ключевые слова: данные ДЗЗ, ЧС, РОИВ.

Введение. Крупномасштабные природные катастрофы наряду с массовой гибелью людей приводят к разрушению транспортной, социальной и телекоммуникационной инфраструктуры. Спутниковая съёмка обеспечивает получение оперативной информации о масштабах и последствиях ЧС, необходимой для оценки причинённого ущерба и планирования гуманитарных операций в пострадавших районах.

Данные ДЗЗ из космоса позволяют решать множество задач управления чрезвычайными ситуациями, связанных с уточнением пожароопасной и паводкоопасной обстановки, обнаружением активных очагов возгорания, оценкой масштабов опасных природных явлений, а также организацией эвакуации населения и проведения спасательно-восстановительных работ. Это особенно актуально для регионов Российской Федерации, ежегодно страдающих от паводков и лесных пожаров.

Российский оператор космических средств ДЗЗ. Оператором российских космических средств ДЗЗ является Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы», выполняющий полный технологический цикл работ по приёму, каталогизации, обработке и распространению данных ДЗЗ с российской орбитальной группировки в интересах российских и зарубежных Потребителей.

В 2013 г. на базе НЦ ОМЗ развернуто специальное подразделение – Центр Госкорпорации «Роскосмос» по взаимодействию с МЧС России и Международной Хартией по космосу и крупным катастрофам, в задачи которого вошли круглосуточный мониторинг природных и техногенных ЧС, организация космической съёмки и оперативное обеспечение МЧС России и региональных органов управления российскими данными ДЗЗ.

Российская система ДЗЗ. В настоящее время в целях оперативного мониторинга ЧС задействованы 8 КА ДЗЗ, осуществляющих космическую съёмку в оптическом диапазоне спектра: «Ресурс-П» №1, «Канопус-В» №3, «Канопус-В» №4, «Канопус-В» №5, «Канопус-В» №6, «Канопус-В-ИК», «Метеор-М» №2 и «Метеор-М» №2.2. Кроме того, потребителям доступна обширная база архивных данных с КА «Ресурс-ДК», «Ресурс-П» №2, «Ресурс-П» №3, «Канопус-В» №1 и «Метеор-М» №1.

В соответствии с Федеральной космической программой на 2016-2025 гг. планируется дальнейшее расширение российской орбитальной группировки и запуск новых спутников, в т.ч. «Кондор-ФКА» и «Обзор-Р» с радиолокационной аппаратурой, которая позволит осуществлять мониторинг ЧС вне зависимости от погодных условий и времени суток.

Наземная космическая инфраструктура ДЗЗ функционирует в составе Единой территориально-распределенной информационной системы ДЗЗ, представляющей собой сеть наземных центров приема и обработки информации, развёрнутых на территории страны, а также за её пределами (ст. «Прогресс» Антарктида, Республика Куба), и соединённых каналами связи. Данная система позволяет обеспечить оперативное получение и предоставление данных в интересах региональным потребителям на всей территории Российской Федерации.

Система космического мониторинга ЧС. В интересах обеспечения органов управления ЧС данными ДЗЗ Центр Госкорпорации «Роскосмос» (НЦ ОМЗ) поддерживает текущее взаимодействие с МЧС России (ГУ НЦУКС) и организует выполнение заявок МЧС на оперативную космическую съёмку заданных районов ЧС.

Получаемые в результате выполнения таких заявок российские данные ДЗЗ проходят стандартную обработку и централизованно выдаются НЦ ОМЗ в ГУ НЦУКС, которое затем установленным порядком доводит их до региональных органов МЧС России.

Кроме того, данные ДЗЗ по мониторингу ледовой, паводковой и пожароопасной обстановки дополнительно доводятся НЦ ОМЗ до органов управления в субъектах Российской Федерации через общедоступные каналы связи (FTP-сервер) с информированием ответственных представителей по электронной почте.

Одновременно, Центр Госкорпорации «Роскосмос» обеспечивает оперативное взаимодействие со службами Международной Хартии по космосу и крупным катастрофам – международной некоммерческой организации из представителей 17 космических агентств, образованной в целях коллективного обеспечения пострадавших от крупномасштабных катастроф данными ДЗЗ из космоса.

МЧС России является «правомочным пользователем» Хартии и запрашивает иностранные данные ДЗЗ с орбитальной группировки участников Хартии при возникновении крупномасштабных ЧС (как правило – наводнений и пожаров на территории Российской Федерации). В настоящее время орбитальная группировка Хартии включает в себя более 200 спутников с аппаратурой ДЗЗ различного пространственного разрешения, включая радиолокационные системы. Получение иностранных данных в интересах МЧС России обеспечивается НЦ ОМЗ.

Статистика обеспечения данными ДЗЗ региональных органов управления. За истекший период 2021 г. МЧС России предоставлены российские данные ДЗЗ об-

щим объемом около 25 млн. кв. км (более 3 000 съёмочных маршрутов), полученные Оператором КС ДЗЗ в результате мониторинга различных чрезвычайных ситуаций.

В тоже время, органам управления ЧС в субъектах Российской Федерации по результатам мониторинга ледовой, паводковой и пожароопасной обстановки выданы российские данные ДЗЗ общим объемом более 14 млн. кв. км (более 1 600 съёмочных маршрутов).

В текущем году уже было шесть обращений к Хартии с запросами на предоставление иностранных данных ДЗЗ по районам крупномасштабных наводнений на территории Амурской, Архангельской, Вологодской, Иркутской, Нижегородской и Ульяновской областей, а также Чувашской Республики и Республики Саха. Участниками Хартии в интересах МЧС России предоставлены данные ДЗЗ общим объемом около 35 млн. кв. км (более 1 300 маршрутов съёмки).

Заключение. Система обеспечения данными ДЗЗ региональных органов управления при их функционировании в режиме ЧС позволяет в сжатые сроки организовать космический мониторинг пострадавших районов в различных субъектах Российской Федерации с выдачей полученных данных ДЗЗ в МЧС России и региональные органы управления.

Комплексное использование материалов космической съёмки различного пространственного разрешения, оперативно получаемых как с отечественной, так и зарубежной спутниковых группировок, позволяет органам управления расширить круг задач, решаемых с использованием технологий ДЗЗ из космоса, обеспечить своевременное доведение данных ДЗЗ непосредственно до участников проводимых мероприятий на местах. Значительный объём используемой космической информации с различных типов регистрирующей аппаратуры в сочетании с материалами аэросъёмки и данными наземных наблюдений, используемых в регионах, даёт возможность органам управления получать точную картину развития ЧС, принимать адекватные и экономически эффективные решения для ликвидации их последствий.

A. S. Kuklin, S. V. Ivanov, Yu. V. Fedorkova

Research Center for Earth Operative Monitoring JSC «Russian Space Systems», Moscow
e-mail: contact@spacecorp.ru

EO DATA SYSTEM FOR REGIONAL GOVERNING BODIES IN EMERGENCY STATES

This article describes the system of operative data distribution from Russian EO satellites of Resurs-P and Kanopus-V types for regional governing bodies during their operation in emergency states. Article describes the interaction between the Russian EO satellites operator (Research Center for Earth Operative Monitoring) with EMERCOM of Russia and International Charter ‘Space and Major Disasters’ as well as mechanism of operative EO data provision over disaster areas for regional governing bodies. The article gives statistics on the provided data volume and conclusions on the system’s performance.

Keywords: EO data, emergency, regional governing bodies.

М. О. Кузнецов¹, Р. В. Брежнев²

¹ Магистрант. ² Кандидат технических наук

Институт космических и информационных технологий,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: m.kuznetsov@yandex.ru, brejnev.ruslan@gmail.com

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИНСТИТУТА КОСМИЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Работа посвящена созданию мобильного приложения для локализации геопространственных объектов в системе дистанционного мониторинга Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета (СДМ ИКИТ). Целью работы является автоматизация ввода координат пространственных объектов непосредственно конечными пользователями СДМ ИКИТ (на примере полигональных объектов) с использованием мобильных средств фиксирования местоположения. Предлагается мобильное приложение (МП), которое позволит в ручном или автоматическом режиме фиксировать координаты местоположения, формируя их контур пространственного объекта. Мобильное приложение разрабатывается с условием интеграции пространственных данных с СДМ ИКИТ. Рассматриваются способы интеграции в условия наличия и отсутствия Интернет-подключения. Приложение разрабатывается для целей агромониторинга и апробировано на локализации произвольных объектов.

Ключевые слова: мобильное приложение в агромониторинге, система дистанционного мониторинга, конечный пользователь, дистанционное зондирование Земли, построение полигона, пространственный объект.

Введение. В сфере агромониторинга пространственные объекты, под которыми в данной работе понимаются земли сельскохозяйственного назначения, характеризуются значительной динамичностью, которая с точки зрения систем дистанционного мониторинга проявляется в изменении контуров границ этих объектов. Физически изменение границ является следствием воздействия антропогенных факторов, в частности хозяйственной деятельности и естественных природных процессов.

В сезоны полевых работ для агропроизводителей актуальна задача перераспределения участков земли под посев различных культур, это приводит к тому, что границы полей могут изменяться из года в год – разбиваться на более мелкие участки или наоборот укрупняться. Этот процесс естественно отражается на учете полей в геоинформационных сервисах мониторинга, где каждое поле представлено цифровым геометрическим объектом [1].

Существуют разные способы внесения изменений границ объектов: автоматические и автоматизированные [2]. К автоматическим способам относятся алгоритмы сегментации, кластеризации и классификации аэрокосмических снимков. Однако точность определения координат контуров объектов, полученных в результате рабо-

ты перечисленных классов алгоритмов, очень сильно зависит от пространственного разрешения и на данных низкого и среднего разрешения точность варьируется от 30 до 70 %, что является недостаточным для ведения учета площадей посевов. В частности, поля сибирских регионов характеризуются мелкоконтурностью, изрезанностью линий границ, обилием колков, что весьма сложно детектируется на спутниковых снимках.

Автоматизированные способы связаны с визуальным дешифрированием снимков и ручной отрисовкой контуров с использованием специализированных программных сред, например, QuantumGIS, ArcGIS, MapInfo и др. Однако в условиях крупных аграрных хозяйств «ручное» внесение изменений в систему является неприемлемым решением, поскольку такие контуры могут исчисляться сотнями.

Одним из возможных решений в данной ситуации может быть применение мобильных устройств со встроенной возможностью геопозиционирования. Это позволяет в рабочем режиме, например, при проведении агротехнических работ сформировать контур обрабатываемого объекта или его участка. Такой способ применим и в рамках запланированных работ по оцифровке контуров полей, так и в условиях проведения агротехнических мероприятий, что требует наличия в кабине техники мобильного устройства с предлагаемым в данной работе МП.

Основные аспекты мобильного приложения. Оцифровка земель в полевых условиях – сложный процесс со своей спецификой. В частности, следует отметить неустойчивое или вовсе отсутствующее соединение с Сетью, что делает невозможным прямую интеграцию данных приложения и сервера БД СДМ ИКИТ. В этом случае актуализируется задача временного хранения пространственных объектов и данных о них и выбора подходящих форматов. Отсутствие стабильного подключения усложняет задачу идентификации самого пользователя, которая осуществляется через БД СДМ ИКИТ, а также установление взаимоотношений между пользователем и множеством локализованных им объектов. Таким образом, одной из основных решаемых в работе проблем является интеграция МП и рабочего кабинета конечного пользователя в сервисе агромониторинга СДМ ИКИТ [3].

Рассмотрим схему взаимодействия МП и СДМ ИКИТ, приведенную на рис. 1, а также рассмотрим два основных сценария взаимодействия конечного пользователя, МП и СДМ ИКИТ. Первый сценарий взаимодействия предполагает наличие стабильного Интернет-соединения и включает следующие шаги:

Шаг 1. Начало работы и создание объекта (метка 1). Для начала работы пользователь проходит аутентификацию (рис. 2, а) в МП через БД СДМ ИКИТ. Приложение позволяет создавать объекты в автоматическом режиме с помощью стандартной возможности записи координат с заданной частотой времени или расстоянием от точки до точки (пример, рис. 2, з). Также реализован ручной режим (выбор режима в меню, рис. 2, в), который предполагает задание множества точек на карте непосредственно пользователем.

Шаг 2. Хранение объекта (метка 3). МП сохраняет объект в БД Firebase, размещенную на облачных ресурсах.

Шаги 3. На сервере СДМ реализован программный модуль (Synchronizator), который с заданной частотой опрашивает облачное хранилище (метка б) и загружает

пространственные объекты (метка 7) из облачной БД в БД СДМ для отображения в рабочем кабинете пользователя.

Шаг 4. Визуализация объектов (метка 8, 9). Пользователь может отобразить созданные им объекты в своем рабочем кабинете и при необходимости отредактировать их границы или атрибутивные данные.

Кратко рассмотрим второй сценарий взаимодействия, который по существу повторяет действия первого сценария, но исключает Интернет-соединение. В этом случае выполняются следующие шаги:

Шаг 1. Начало работы и создание объекта (метка 1). Пользователь не проходит аутентификацию и переходит к созданию объектов в анонимном режиме (рис. 2, б).

Шаг 2. Временное сохранение объекта (метка 2). МП сохраняет объект в память устройства.

Шаг 3. Передача данных из памяти устройства в облачную БД (метка 4) осуществляется пользователем в любое время при появлении Интернет-соединения.

Шаг 4. Передача данных из облачной БД в БД СДМ (метка 6, 7).

Шаг 5. Визуализация объектов (метка 8, 9).

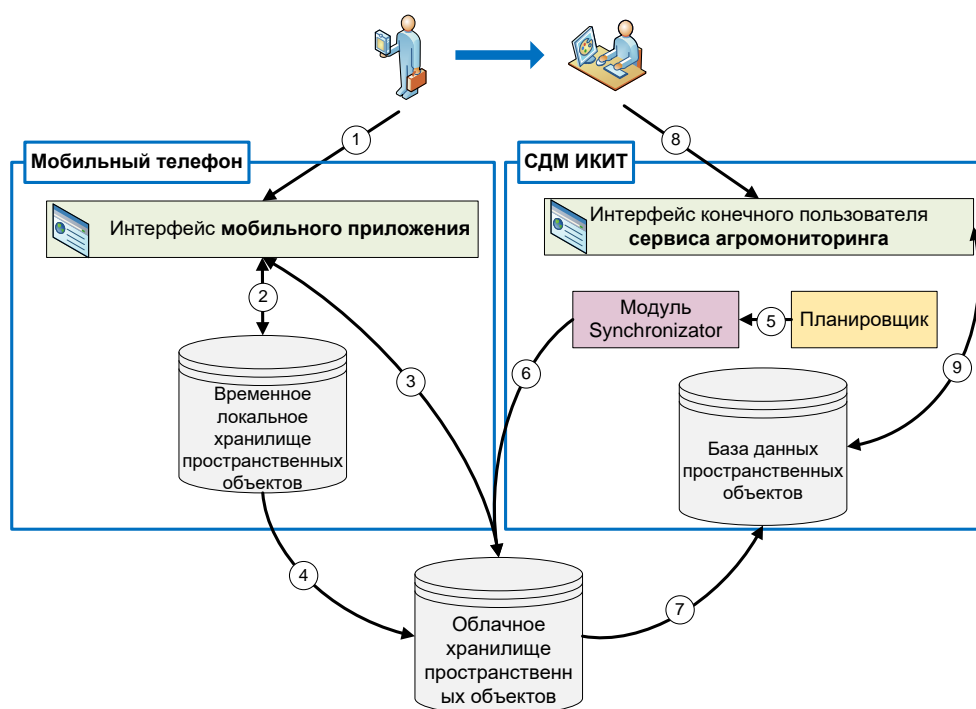


Рис. 1. Структура взаимодействия мобильного приложения и СДМ ИКИТ

Безусловно, рассматриваемое решение имеет свои ограничения, в частности, связанные с точностью геопозиционирования. Однако при известном значении смещения точки на местности целесообразно реализовать функционал, который позволит проводить автоматическую корректировку координат объектов.

Применение приложения позволит не только получать актуальные контуры земель, но и выделять неоднородные участки земель при их точечной обработке [4]. Кроме того, предлагаемое приложение позволяет проводить полевую верификацию результатов обработки аэрокосмических снимков автоматическими алгоритмами.

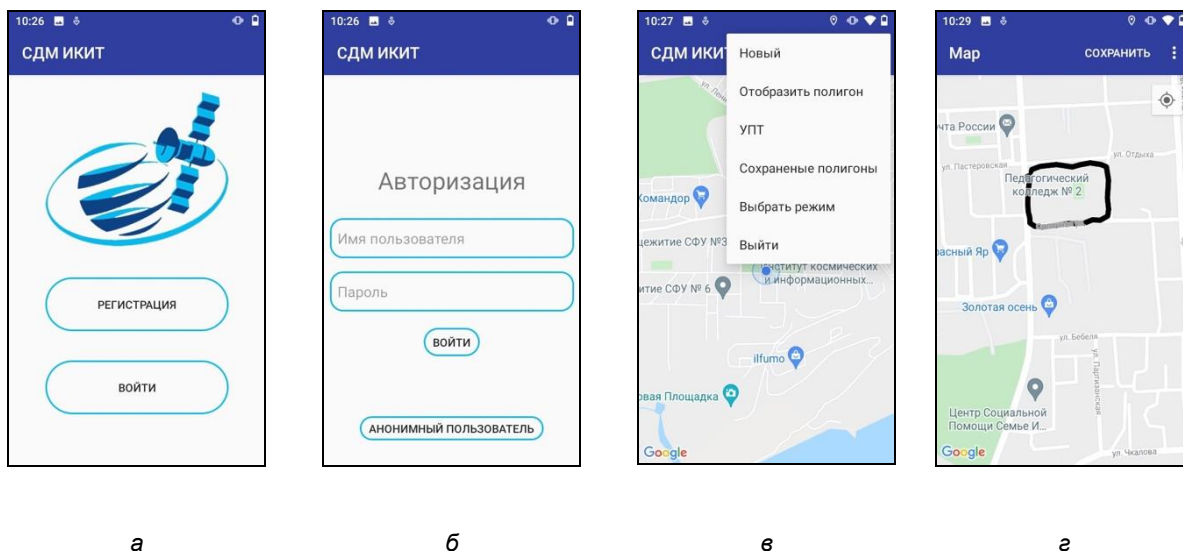


Рис. 2. Окна мобильного приложения: а – стартовое окно; б – окно входа; в – меню; г – полигон, построенный в автоматическом режиме

Список литературы

1. Maglinets Yu. A., Brezhnev R. V. Technology of establishment of terrestrial objects aerospace survey-based object-oriented monitoring systems // E3S Web of Conferences 223, 01002 (2020).
2. Журкин, И. Г. Геоинформационные системы. КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. 272 с.
3. Многоцелевая автоматизированная система космического агромониторинга ИКИТ СФУ – состояние и перспективы / R.V. Brezhnev, Yu. A. Maglinets, K.V. Raevich, G. M. Tsybulsky // Materials of the 15th All-Russian open conference "Modern problems of remote sensing of the Earth from Space" 2017.
4. Brezhnev R. V., Maglinets Yu. A. The dynamic model of agricultural land structure on the space images in the precision agriculture tasks // E3S Web of Conferences. 2019 Vol. 75. Article Number 01001, RPERs 2018.

M. O. Kuznetsov¹, R. V. Brezhnev²

¹ Undergraduate. ² Candidate of Technical Sciences

Institute of Space and Information Technology SFU, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: m.kuznetsov@yandex.ru, brejnev.ruslan@gmail.com

DEVELOPMENT OF A MOBILE APPLICATION FOR LOCALIZING GEOSPATIAL OBJECTS IN IKIT SDM

The work is devoted to the creation of a mobile application for the localization of geospatial objects in the remote monitoring system of the Institute of Space and Information Technologies of the Siberian Federal University (SDM IKIT). The aim of the work is to automate the input of coordinates of spatial objects directly by end users of the IKIT SDM (for example, polygonal objects) using mobile means of fixing the location. A mobile application (MP) is proposed, which will allow you to fix the coordinates of the location in manual or automatic mode, forming their contour of a spatial object. The mobile application is being developed with the condition of integrating spatial data with the IKIT SDM. Methods of integration into the conditions of the presence and absence of an Internet connection are considered. The application is developed for the purposes of agromonitoring and tested on the localization of arbitrary objects.

Keywords: mobile application in agromonitoring, remote monitoring system, end user, Earth remote sensing, polygon construction, spatial object.

П. А. Лошкарев, С. В. Пушкарский

Кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия
e-mail: pavel.loshkarev@niitp.ru, sergey.pushkarskiy@niitp.ru

**ТЕХНОЛОГИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ФОНДА ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
В ИНТЕРЕСАХ РЕШЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ**

Рассмотрены вопросы рационального обеспечения потребителей данными дистанционного зондирования Земли из космоса с использованием Федерального фонда данных ДЗЗ из космоса. Федеральный фонд данных дистанционного зондирования Земли из космоса представляет собой совокупность аппаратно-программных средств и технологий, из состава Единой территориально распределенной информационной системы ДЗЗ, предназначенных для сбора, хранения и выдачи потребителям данных ДЗЗ, полученных с государственных и негосударственных космических аппаратов ДЗЗ, являющихся государственным электронным информационным ресурсом Российской Федерации. Представлено описание соответствующих уровней обработки предоставляемых потребителям. Определен порядок работы с Федеральным фондом данных ДЗЗ с использованием личного кабинета на Геопортале Госкорпорации «Роскосмос».

Ключевые слова: федеральный фонд данных ДЗЗ, дистанционное зондирование земли, единая территориально-распределенная информационная система, стандартные продукты, геопортал, потребители, информационные продукты.

Федеральный фонд данных дистанционного зондирования Земли из космоса (ФФД ДЗЗ) представляет собой совокупность аппаратно- программных средств и технологий, из состава Единой территориально распределенной информационной системы (ЕТРИС ДЗЗ), предназначенных для сбора, хранения и выдачи потребителям данных ДЗЗ, полученных с государственных и негосударственных космических аппаратов ДЗЗ (КА ДЗЗ), являющихся государственным электронным информационным ресурсом Российской Федерации.

Потребитель, используя личный кабинет Геопортала Госкорпорации «Роскосмос», либо программный API, может проводить заказ стандартных продуктов ДЗЗ из ФФД ДЗЗ уровней обработки 1 или 2.

Уровень 1 (L1) – данные ДЗЗ из космоса, прошедшие геопривязку и радиометрическую коррекцию в системе координат съемочного устройства, в том числе сопровождаемые RPC-коэффициентами.

Уровень 2 (L2) – данные ДЗЗ из космоса, прошедшие геопривязку, радиометрическую обработку и геометрическое трансформирование (на плоскость) или ортотрансформирование (с учетом рельефа) в заданной картографической проекции и системе координат.

Основные особенности информационных продуктов:

– информационные продукты первичных и стандартных уровней обработки включают метаданные, соответствующие стандарту OGC, созданному международ-

ной некоммерческой организацией Open Geospatial Consortium (OGC), и сохраняются в файлы формата XML. Метаданные могут модифицироваться в зависимости от особенностей КА (стандарт позволяет учитывать особенности той или иной целевой аппаратуры и создавать расширения);

- изображения информационных продуктов уровней обработки L1 и L2 сохраняются в формате TIFF (COG);

- при создании информационных продуктов принято, что тип продукта PANSHARP (результат операции «паншарпенинг» – повышения пространственного разрешения мультиспектрального изображения с использованием панхроматического) и тип продукта BUNDLE (совокупность пространственно совмещённых комбинаций каналов PAN и MS) не являются продуктами отдельного уровня обработки, а относятся к одному из типов продуктов стандартных уровней обработки L1 и L2;

В общем виде для потребителя технология работы с ФФД ДЗЗ включает следующие этапы:

- выбор района интересов, маршрутов съёмки в личном кабинете Геопортала ГК «Роскосмос»;

- выбор продуктов ДЗЗ PAN, MS, BUNDLE, PANSHARP;

- оформление заявки, оплата заказанной продукции (при необходимости);

- получение продукции, в том числе метаданных.

Подробная инструкция потребителю для работы с ФФД ДЗЗ представлена на Геопортале ГК «Роскосмос».

P. A. Loshkarev, S. V. Pushkarskiy

Candidate of Engineering Sciences, Scientific Research Institute of Precision Instruments,
Moscow, Russia

e-mail: pavel.loshkarev@niitp.ru, sergey.pushkarskiy@niitp.ru

TECHNOLOGIES OF THE FEDERAL FOUNDATION OF ERS DATA FOR SOLVING REGIONAL PROBLEMS

The issues of providing consumers with Earth remote sensing data from space from the Federal Earth remote sensing data fund from space are considered. The Federal Fund for Earth Remote Sensing Data from Space is hardware and software tools and technologies for collecting, storing and issuing remote sensing data to consumers. A description of the data provided to consumers is presented. The procedure for working with the Federal Earth remote sensing data fund using a personal account on the Geoportal of the State Corporation "Roscosmos" is presented.

Keywords: federal fund of remote sensing data, remote sensing of the earth, unified geographically distributed information system, standard products, geoportal, consumers, information products.

П. А. Лошкарев¹, С. А. Черногузов², С. В. Пушкарский¹

¹ Кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия

² АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия
e-mail: pavel.loshkarev@niitp.ru, sergey.chernoguzov@niitp.ru, sergey.pushkarskiy@niitp.ru

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЕДИНОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрены вопросы развития Единой территориально распределенной информационной системы ДЗЗ, предусматривающей формирование как рационального состава и топологии наземных центров различных ведомств, так и оснащение их самыми современными техническими средствами и технологиями в интересах решения научных и прикладных задач широкого круга пользователей ведомственной принадлежности. Для эффективного использования результатов космической съемки и создаваемых на их основе региональных тематических решений реализуется взаимная увязка требований потребителей к характеристикам стандартных информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из космоса с возможностями космических систем ДЗЗ. Такая взаимная увязка решается, в том числе, путем создания в единой территориально-распределенной информационной системе дистанционного зондирования Земли соответствующих аппаратно-программных средств по соответствующим направлениям.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, единая территориально-распределенная информационная система, стандартные продукты, геопортал, потребители, унифицированная обработка.

Современные требования потребителей к данным дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) обуславливают развитие высокопроизводительной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли с космическими аппаратами (КА) ДЗЗ различного назначения.

Для обеспечения ее функционирования по целевому назначению реализуется модернизация Единой территориально-распределенной информационной системы ДЗЗ (ЕТРИС ДЗЗ), предусматривающей формирование как рационального состава и топологии наземных центров различных ведомств (в основном Роскосмоса и Росгидромета), так и оснащение их самыми современными техническими средствами и технологиями в интересах решения научных и прикладных задач широкого круга пользователей ведомственной принадлежности. Количество, расположение и функции центров обеспечивают максимальную производительность орбитальной группировки КА ДЗЗ с селективным доступом, функционирующих в условиях прямого сброса информации и через спутник-ретранслятор. Увеличение количественного состава орбитальной группировки, типажа космических аппаратов, рост объемов информации, освоение новых спектральных диапазонов, в условиях ограничений на ресурсные затраты, обеспечивается максимально возможной унификацией технических, программных средств и технологий в центрах единой наземной инфраструктуры.

Развитие технологий обработки целевой информации с КА ДЗЗ, для обеспечения потребностей потребителей в данных ДЗЗ и продуктов на их основе, реализуется по следующим направлениям:

– унифицированная обработка информации с различных КА ДЗЗ в рамках единого комплекса обработки нового поколения, базирующегося на современных подходах по распределенной обработке сверхбольших объемов данных, обладающего максимальной степенью автоматизации, позволяющего обрабатывать данные различных съемочных систем, реализующего все этапы потоковой обработки (первичная, стандартная, оценка качества, каталогизация, хранение, публикация);

– унификация процессов обработки, единое управление, единые интерфейсы, единые подходы по оценке качества, единые форматы метаданных;

– унификация технических средств обработки информации с использованием вычислительного кластера однотипных серверов, возможность установки комплекса обработки в распределенные центры обработки данных;

– унификация программных средств в части единых требования к специальному программному обеспечению (СПО) обработки: кроссплатформенность, динамические библиотеки, API, распараллеливание и распределение и другое;

– автоматизация всех технологических процессов при реализации сервисной модели функционирования ЕТРИС ДЗЗ во взаимодействии с потребителями;

– применение современных информационных технологий распределенных вычислений с генерацией продуктов основных уровней обработки практически из «нулевого» уровня;

– создание различных реализаций комплексов обработки на базе унифицированной платформы специального программного обеспечения.

Представленная совокупность технических решений и мероприятий позволяет, посредством Геопортала Госкорпорации «Роскосмос», являющегося основным геоинформационным сервисом ЕТРИС ДЗЗ, наиболее эффективно использовать данные ДЗЗ из космоса для решения задач различного назначения.

P. A. LOSHKAREV¹, S. A. CHERNOGUZOV², S. V. PUSHKARSKIY¹

¹ Candidate of Engineering Sciences, Scientific Research Institute of Precision Instruments, Moscow, Russia

² Scientific Research Institute of Precision Instruments, Moscow, Russia
e-mail: pavel.loshkarev@niitp.ru, sergey.chernoguzov@niitp.ru, sergey.pushkarskiy@niitp.ru

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF A UNIFIED TERRITORIALLY DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM FOR REMOTE EARTH SENSING

The issues of development of the Unified geographically distributed information system for remote sensing of the earth from space are considered. Ground centers of various firms are being created. The centers are equipped with modern technical means and technologies for solving scientific problems. Standard information products for Earth remote sensing from space are being developed.

Keywords: remote sensing of the earth, unified geographically distributed information system, standard products, geoportals, consumers, unified processing.

**П. А. Лошкарев¹, Д. И. Федоткин¹, А. Н. Белый²,
С. В. Пушкарский¹, Д. В. Сысенко¹**

¹ Кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия

² АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия
e-mail: pavel.loshkarev@niitp.ru, dmitry.fedotkin@niitp.ru, sergey.pushkarskiy@niitp.ru

**ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «ЦИФРОВАЯ ЗЕМЛЯ»
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСТОЯННО ОБНОВЛЯЕМОГО
ЕДИНОГО СПЛОШНОГО МНОГОСЛОЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО
ПОКРЫТИЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАННЫМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
РАЗЛИЧНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТУПА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ К ЕГО ДАННЫМ,
ПРОДУКТАМ И СЕРВИСАМ**

Рассмотрены вопросы построения Информационной системы «Цифровая Земля». Информационная система «Цифровая Земля» предназначена для обеспечения формирования постоянно обновляемого Единого сплошного многослойного динамического покрытия территории Российской Федерации данными ДЗЗ различного пространственного разрешения, и обеспечения доступа органов власти, бизнеса и граждан к данным, продуктам и сервисам ДЗЗ с использованием аппаратных и технических средств единой территориально-распределенной информационной системы ДЗЗ. Представлен состав основных операций Информационной системы «Цифровая Земля» при обеспечении выполнения заявок потребителей.

Ключевые слова: цифровая земля, единое сплошное многослойное динамическое покрытие, дистанционное зондирование земли, сервисы, стандартные продукты, геопортал, потребители, информационные продукты.

Информационная система «Цифровая Земля» предназначена для обеспечения формирования постоянно обновляемого Единого сплошного многослойного динамического покрытия (ЕСМДП) территории Российской Федерации данными ДЗЗ различного пространственного разрешения, и обеспечения доступа органов власти, бизнеса и граждан (далее – потребителей) к данным, продуктам и сервисам ДЗЗ с использованием аппаратных и технических средств единой территориально распределенной информационной системы ДЗЗ (ЕТРИС ДЗЗ).

Состав основных операций Информационной системы «Цифровая Земля»:

1. Формирование планово-высотной основы. Операция выполняется автоматически на основании данных из ЕТРИС ДЗЗ, открытых данных и коммерческих сплошных мозаичных покрытий, полученных по данным ДЗЗ с иностранных КА. К автоматизируемой деятельности при исполнении операции относятся действия операторов по обработке открытых данных и коммерческих сплошных мозаичных покрытий, полученных по данным ДЗЗ с иностранных КА. Операция обеспечивается функционированием Подсистемы обработки данных.

2. Формирование, автоматическое обновление и уточнение ЕСМДП на территорию Российской Федерации. Операция выполняется полностью автоматически на основании планово-высотной основы и данных, поступающих из ЕТРИС ДЗЗ. Операция обеспечивается функционированием Подсистемы обработки данных.

3. Хранение и учёт (в электронном каталоге) данных ЕСМДП и опорных данных. Операция выполняется автоматически после формирования и обновления ЕСМДП. Операция обеспечивается функционированием Подсистемы хранения данных.

4. Визуализация и предоставление потребителям ЕСМДП. Операция выполняется автоматически после формирования и обновления ЕСМДП. Операция обеспечивается функционированием Подсистемы предоставления данных.

5. Формирование продуктов ДЗЗ на основе ЕСМДП. Операция выполняется автоматически после получения задания от Подсистемы предоставления данных. Задания выдаются на основании заявок на формирование продуктов ДЗЗ и регламентов формирования продуктов ДЗЗ. Заявки и регламенты формируются в Подсистеме предоставления данных. К автоматизируемой деятельности при исполнении операции относятся действия операторов (пользователей) по обработке данных ДЗЗ для формирования продуктов ДЗЗ. Операция обеспечивается функционированием Подсистемы обработки данных.

«Перечень продуктов ДЗЗ» предоставляется в виде отдельного документа.

6. Предоставление потребителям продуктов ДЗЗ и облачных сервисов на основе ЕСМДП. Операция выполняется автоматически после формирования продуктов ДЗЗ на основе ЕСМДП. Операция обеспечивается функционированием Подсистемы предоставления данных.

7. Предоставление потребителям пользовательского программного комплекса обеспечения работы потребителей с продуктами ДЗЗ. Операция выполняется автоматически после выполнения потребителями ряда требований. Операция обеспечивается функционированием программного комплекса обеспечения работы потребителей с продуктами ДЗЗ.

Информационная Система «Цифровая Земля» обеспечит потребителям наиболее эффективное использование данных ДЗЗ и продуктов высокоуровневой обработки на их основе.

P. A. Loshkarev¹, D. I. Fedotkin¹, A. N. Belyy²,
S. V. Pushkarskiy¹, D. V. Sysenko¹

¹ Candidate of Engineering Sciences, Scientific Research Institute of Precision Instruments, Moscow, Russia

² Scientific Research Institute of Precision Instruments, Moscow, Russia
e-mail: pavel.loshkarev@niitp.ru, dmitry.fedotkin@niitp.ru, sergey.pushkarskiy@niitp.ru

DIGITAL EARTH INFORMATION SYSTEM TO PROVIDE CONSUMERS WITH DATA, PRODUCTS AND SERVICES FOR REMOTE EARTH SENSING FROM SPACE

The issues of building the Digital Earth Information System are considered. Information system "Digital Earth" is designed to provide consumers with data, products and services for remote sensing of the earth from space. The composition of the main operations of the Digital Earth Information System is presented to ensure the fulfillment of consumer orders.

Keywords: digital earth, single continuous multi-layer dynamic coverage, remote sensing of the earth, services, standard products, geoportal, consumers, information products.

**Я. М. Толкачев^{1,2}, М. А. Набиев^{1,3}, Н. К. Пожидаев^{1,2},
П. В. Баталов^{1,4}, Е. В. Константинов^{1,5}**

¹ Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

² Магистр, Южно-Российский государственный политехнический институт (НПИ)
им. М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

³ Магистр, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

⁴ Магистр, Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

⁵ Магистр, Национальный исследовательский университет «Московский
энергетический институт», Москва, Россия

e-mail: a-12-a-12@mail.ru; nik.pozh.2016@yandex.ru; nma2207@gmail.com

WEB-СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрена интеллектуальная система визуализации алгоритмов предупреждения чрезвычайных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Особенностью системы является наличие в ее составе интерактивной карты, которая при помощи модели машинного обучения позволяет проводить мониторинг и прогнозирование возможных нарушений в штатной работоспособности объектов ТЭК. Такая система получает данные по всем объектам в режиме реального времени и принимает персональное решение об инциденте. Применение системы для мониторинговых наблюдений позволяет минимизировать риски возникновения неблагоприятных явлений, а также в оперативном режиме организовать предупреждение и ликвидацию аварии.

Ключевые слова: система мониторинга чрезвычайных ситуаций, система помощи в принятии решения, машинное обучение, web, прогнозирование.

В настоящее время в России и за рубежом существует проблема мониторинга и выявления нарушений в штатной работоспособности объектов ТЭК, а также проблема своевременного предупреждения этих событий. Решение этих проблем особенно актуально для предприятий, имеющих отношение к электроснабжению. С каждым днем появляется всё больше возможностей для использования подобных систем с применением данных из открытых источников, что позволяет, систематизируя данные, получать качественную картину происходящих чрезвычайных ситуаций (ЧС) сейчас и на пару дней вперед.

Разработана система мониторинга и прогнозирования ЧС на объектах топливно-энергетического комплекса на основе модели машинного обучения, которая может использоваться как автономно, так и в составе ситуационно-аналитического центра Минэнерго.

Структура системы мониторинга. Система включает интеллектуальную подсистему прогнозирования, основанную на метеоусловиях, съемках в инфракрасном диапазоне (4 мкм) со спутника Terra/MODIS для вычисления показателя Fire Radiative Power (FRP) [1], интерактивную карту, которая позволяет оператору своевре-

менно получать визуальную информацию о событиях на подконтрольных объектах и при необходимости оформить вызов необходимых формирований (ОВБ, МЧС и др.). На основе неблагоприятного прогноза система поддержки принятия решения (СППР) выводит рекомендуемые действия оператора, которые зависят от особенностей объекта мониторинга и возможностей ликвидации ЧС с наименьшим ущербом (рис. 2).

Интеллектуальная подсистема прогнозирования. Подсистема использует модели машинного обучения. Для классификации неблагоприятных явлений используется метод временных рядов, реализованный при помощи деревьев решений на базе библиотеки `sktime` на языке Python.

Обучающая выборка содержит данные о 128 300 замерах и 7 680 авариях. На валидационной выборке точность модели составила 72 %. Дополнительной сложностью являлась несбалансированность данных. Основные требования к прогнозированию – актуальность данных [2; 3] высокая точность предсказания ЧС, минимизация ошибки первого рода. С учетом высоких требований со стороны подсистемы к вычислительному устройству предложена реализация кластерной системы с применением платформы OpenShift и системы хранения данных Hadoop [4].

Интеллектуальная подсистема визуализации алгоритмов прогнозирования. Ядром системы является программное обеспечение (ПО) свободно распространяемой SVG Maps для реализации интерактивной карты России и API метеосервисов (Яндекс.Погода, Gismeteo) для получения актуальных метеорологических данных. Это ПО позволяет операторам, работающим с системой, следить за обстановкой на объектах мониторинга (рис. 1) и оперативно принимать решения по ликвидации происшествий.

Выбор получаемых данных для системы устанавливается для каждого объекта персонально, в связи с тем, что есть необходимость устанавливать весовые коэффициенты и закономерности в зависимости от местоположения и прочих факторов.



Рис. 1. Интерактивная карта Российской Федерации

Операторы центра мониторинга должны для принятия окончательного решения о направлении формирования на объект ТЭК иметь возможность быстрой интерпретации полученных от системы данных [5]. Это означает, что система визуализации

алгоритмов предупреждения чрезвычайных ситуаций должна интегрироваться с имеющимися автоматическими информационными системами МЧС (АИУС РСЧС) и ситуационно-аналитическим центром (САЦ). При разработке ПО такой системы использовались принципы сервис-ориентированной архитектуры (англ. Service-Oriented Architecture – SOA) [6]. Учитывая это, была разработана структура ПО (рис. 3). Выделенные цветом компоненты принадлежат интеллектуальной системе. Базовой является подсистема прогнозирования, которая позволяет взаимодействовать системе со сторонними сервисами и базой данных. На рисунке 3 показаны компоненты системы.

Объект	Местоположение	Сведения	Значение
ЛЭП	44.968372, 39.831685	Вероятность пожара	30.11
ПС35кВ	44.920685, 38.812976	Вероятность гололеда	0.51
Белореченская ГЭС	44.897484, 39.648352	Вероятность сильного ветра	5.9
Армавирская ТЭЦ	45.017303, 41.078860	Скорость ветра	7
		Температура	30

Рекомендуемые действия оператора

1. Немедленно сообщить о пожаре начальнику смены энергообъекта или руководству энергообъекта и в пожарную охрану;
2. удаление из зоны пожара всех посторонних лиц;
3. установление места пожара и возможные пути его распространения;
4. тушение пожара персоналом и имеющимися средствами пожаротушения;

Формирования

Тип	Местоположение	Номер для связи
МЧС	44.980012, 38.973656	***
ОВБ	45.448308, 40.639493	***
Скорая помощь	46.499770, 39.585725	***

Рис. 2. Дашборд по региону

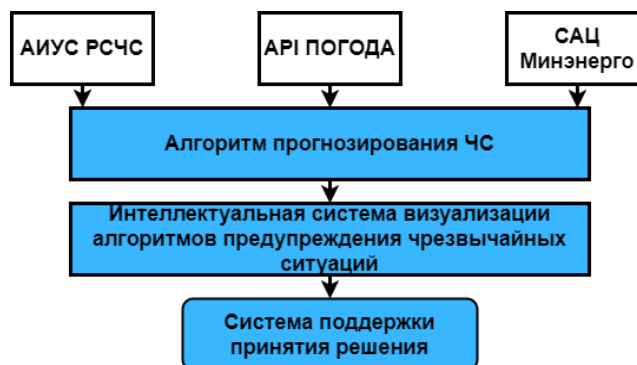


Рис. 3. Структура мониторинга

Заключение. Созданная система мониторинга ЧС на объектах ТЭК является победителем хакатона Цифровой прорыв «ENERGOMACH», кейс «Минэнерго России», прошла апробацию в лабораторных условиях. Результаты апробации указыва-

ют на работоспособность всех ее подсистем. В будущем планируется расширение функционала, а именно расширение базы объектов ТЭК, набора предсказываемых ЧС и увеличение точности модели машинного обучения.

Список литературы

1. Пономарев, Е. И. Классификация пожаров в Сибири по данным Terra/MODIS на основе показателя их радиационной мощности / Е. И. Пономарев // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 56. DOI: 10.7868/S0205961414020080.
2. Y. Wang, L. Chen, Y. Liu and S. Chen, "Research on the Trend Monitoring Model for Unconventional Emergencies based on NFA" // 2013 International Conference on Computational and Information Sciences. 2013. pp. 118-121. DOI: 10.1109/ICCIS.2013.39.
3. Пенкова, Т.Г., Коробко, А.В., Ничепорчук, В.В. «Мониторинг аварийных ситуаций с использованием технологии OLAP» // Материалы 35-й Международной конвенции МИПРО. 2012. С. 1595-1600.
4. J. Li, Y. Hou, X. Cheng, X. Yan and G. Chen, "The On-duty Response Management System for Power Emergency Events based on Big Data Technology" // 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS). 2020. pp. 647-650. DOI: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194886.
5. Y. Wang, Y. Gao and B. Yang, "E-patroller: A semantic technology-based public emergency monitoring system" // 2017 IEEE 2nd International Conference on Big Data Analysis (ICBDA). 2017. pp. 250-253. DOI: 10.1109/ICBDA.2017.8078818
6. W. Jin, J. Yang and Y. Fang, "Application Methodology of Big Data for Emergency Management" // 2020 IEEE 11th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). 2020. pp. 326-330. DOI: 10.1109/ICSESS49938.2020.9237653.

Y. M. Tolkachev^{1,2}, M. A. Nabiev^{1,3}, N. K. Pozhidaev^{1,2},
P. V. Batalov^{1,4}, E. V. Konstantinov^{1,5}

¹ ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russia

² Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

³ Kazan Federal University, Kazan, Russia

⁴ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

⁵ National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

e-mail: a-12-a-12@mail.ru; nik.pozh.2016@yandex.ru; nma2207@gmail.com

WEB-SYSTEM FOR MONITORING AND FORECASTING ADVERSE EVENTS AT FECS

An intelligent visualization system for emergency prevention algorithms at the objects of the fuel and energy complex (FEC) is considered. A feature of the system is the presence of an interactive map in its composition, which, using a machine learning model, allows monitoring and forecasting possible violations in the normal performance of fuel and energy facilities. Such a system receives data on all objects in real time and makes a personal decision about the incident. The use of the system for monitoring observations allows minimizing the risks of adverse events, as well as organizing the prevention and elimination of an accident in an on-line mode.

Keywords: Emergency monitoring system, Decision assistance system, Machine learning, Web, Forecasting.

А. Н. Находкин

ГБУ РС(Я) «Служба Спасения РС(Я)», Якутск, Россия

e-mail: cmp-sakha@yandex.ru, nasaknt@gmail.com

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ГК «РОСКОСМОС» НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Рассматривается практический опыт работы мобильного приемо-передающего комплекса (далее МППК) спутниковой информации. МППК установлен на территории Республики Саха (Якутия) в апреле 2020 года с целью обеспечения приема спутниковой информации с космического аппарата дистанционного зондирования Земли, с последующей передачей оперативных данных спутникового мониторинга через Управление мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций «ГБУ Республики Саха (Якутия) «Служба Спасения Республики Саха (Якутия)» (далее УМП ЧС). Полученные данные можно использовать в мониторинге и дальнейшем прогнозировании ЧС. Первый опыт работы МППК показал высокую информативность спутниковых снимков с запрошенных участков, в то же время необходимость повышения оперативности получения данных.

Ключевые слова: Дистанционное зондирование земли, получение данных, спутниковые снимки, ЧС.

В соответствии с Федеральной космической программой России в рамках закона Российской Федерации от 20.08.1993 № 5663-1 «О космической деятельности» МЧС России совместно с ГК «Роскосмос» в апреле 2020 года провел работу по дислокации в г. Якутск мобильного комплекса приема и передачи информации ГК «Роскосмос» (далее МППК) на площадке ГБУ Республики Саха (Якутия) «Служба спасения Республики Саха (Якутия)». Географическое расположение МППК в Якутске удобно для мониторинга огромной территории Северо-Востока России.

Функции доступа к сети интернет были возложены на Министерство инноваций, цифрового развития и инфокоммуникационных технологий Республики Саха (Якутия), функции подключения к сети энергоснабжения МППК и определение заявок по мониторингу определенных участков возложены на ГБУ Республики Саха (Якутия) «Служба спасения Республики Саха (Якутия)». Мобильный приемо-передающий комплекс (далее – МППК) состоит из двух 20-футовых контейнеров морского исполнения, это МОИ – модуль обработки информации и АК – антенный комплекс, также в состав входит комплект кабелей и боковые лепестки антенны. МППК предназначен для обеспечения приема информации с космического аппарата дистанционного зондирования Земли, с последующей передачей оперативных данных спутникового мониторинга через Управление мониторинга и прогнозирования ЧС «ГБУ Республики Саха (Якутия) «Служба спасения Республики Саха (Якутия)» (далее УМП ЧС).

Работа с МППК проводилась по следующему алгоритму:

1. УМП ЧС формирует заявку установленного образца на спутниковую съемку от Республики Саха (Якутия) до 10 час. утра, в заявке информация должно быть не более на 5 снимков.

2. УМП ЧС направляет заявку в ЦУКС ГУ МЧС России по РС (Я), на эл. почту.
3. ЦУКС ГУ МЧС России по РС (Я) направляет заявку в НЦУКС ГУ МЧС России.
4. НЦУКС ГУ МЧС России направляет заявку в ГК Роскосмос г. Москва.
5. На следующие сутки МППК принимает снимки от спутников по направленной заявке от ЦУКС ГУ МЧС России по Республике Саха (Якутия).
6. МППК обрабатывает и передаёт снимки на ресурсы ftp://91.201.237.98, отправляется ссылка для скачивания снимков ДЗЗ на электронную почту УМП ЧС до 16 часов. Первые тестовые снимки от МППК были получены 13.04.2020.

Первая заявка из УМП ЧС была направлена 13.04.2020 г. Всего с момента функционирования комплекса с ГБУ РС (Я) «Служба спасения РС (Я)» было направлено 94 заявки на 409 спутниковых снимков, из них по заявкам получено 192 снимка, что составило 47,0%.

Работа МППК показала низкую оперативность, необходимую для мониторинга ЧС, снимки в основном поступали с задержкой до 10-12 часов, а в отдельных случаях до 3-х суток. По информации ЦУКС ГУ МЧС России по Республике Саха (Якутия) причиной не обработки заявок является наличие облачности по месту наблюдения.

Основную долю спутниковых снимков во время прохождения весеннего половодья занимали снимки с НИЦ «Планета», а также с ресурса Multimaps и других источников. Было обработано более 200 космических снимков с отечественных и зарубежных спутников.

Во время прохождения пожароопасного периода спутниковые снимки поступали в основном из ресурсов Авиалесоохраны, а также НИЦ «Планета».

Предложение. В период возникновения ЧС повысить оперативность предоставления спутниковой информации, сократив время обработки до нескольких часов, и не более суток (с 10 утра до 10 утра следующих суток), расширить лимит (с 5 до 10) получения снимков большего количества участков рек и территорий Республики Саха (Якутия).

A. N. Nakhodkin

SBI of the Republic of Sakha (Yakutia) «Rescue Service of the Republic of Sakha (Yakutia)»,
Yakutsk, Russia

e-mail: cmp-sakha@yandex.ru, nasaknt@gmail.com

PRACTICAL EXPERIENCE OF APPLICATION MOBILE RECEIVING-TRANSMISSION COMPLEX SC «ROSCOSMOS» IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

Practical experience of working with a mobile receiving-transmitting complex (hereinafter MRTC) is considered. The MRTC was installed on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) on April 8, 2020 in order to ensure the reception of satellite information from the Earth remote sensing spacecraft, with the subsequent transmission of operational satellite monitoring data through the Department for Monitoring and Prediction of Emergencies "State Budgetary Institution of the Republic of Sakha (Yakutia)" Rescue Service of the Republic of Sakha (Yakutia) "(hereinafter DMPE). The data obtained can be used in monitoring and further forecasting emergency situations. The work of the MRTC showed low efficiency, but at the same time high information content of satellite images from the requested sites.

Keywords: Remote sensing of the earth, data acquisition, satellite images, emergency situations.

А. В. Сорокин¹, Е. Н. Васильев², Д. С. Макаров¹

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: sorav@iph.krasn.ru

ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В ЛЕДОВЫХ ПОКРОВАХ И ГНСС-РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ В МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ ЛЬДА

Представлена теплофизическая модель тепловых потоков в сезонном цикле льда от ледостава до таяния в пресноводных озерах Сибири. Используются температурные данные воздуха и теплофизические свойства воды и льда. Проведено вычислительное моделирование процессов нарастания льда на границах воздух-лед и лед-вода. Получены временные зависимости характеристик ледовых покровов. Выявлена возможность использования рассмотренной модели в разработке алгоритмов восстановления геометрических и прочностных характеристик льда по данным ГНСС-рефлектометрии

Ключевые слова: теплофизическая модель, озерный лед, ГНСС-рефлектометрия, LI-диапазон, мониторинг, состояние льда.

Ведение. Озера и водохранилища Сибири в естественных условиях, имеют ледовый покров, в зависимости от широты, более полугода. Процесс формирования льда от ледостава до таяния достаточно длительный и синхронизован с размерами водоемов, метеоусловиями и рельефом прилегающей местности. Кристаллическая структура льда, его толщина и прочностные характеристики изменяются от осеннего появления до весеннего таяния. Ледовые покровы в Сибири используются в разных сферах деятельности постоянно и достаточно широко. Разработка бесконтактного мониторинга состояния ледовых покровов является востребованной и актуальной. В настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) эффективно используются в мониторинге земных покровов [1]. В данной работе представлена теплофизическая модель тепловых потоков в сезонном цикле льда. Анализируется возможность использования метода ГНСС-рефлектометрии в мониторинге электрофизических характеристик льда [2].

Динамика тепловых потоков в ледовых покрывах. Интенсивность теплообмена поверхности водоема зависит от температуры окружающей среды, теплофизических свойств воды и льда, коэффициента теплообмена α , величина которого определяется, в основном, наличием снежного покрова, леса в прибрежной местности, скоростью ветра. Климатические условия при моделировании учитываются в виде среднесуточных значений температуры в течение года, которые доступны в банка данных, размещенного на сайте <https://ru.climate-data.org/>

По данным сайта <http://www.power.eltehno.ru/pages/2222.html> получен график мощности солнечного излучения, поступающей на единицу горизонтальной поверхности в холодное время года при коэффициенте поглощения льда солнечного излучения 0,7. (рис. 1).

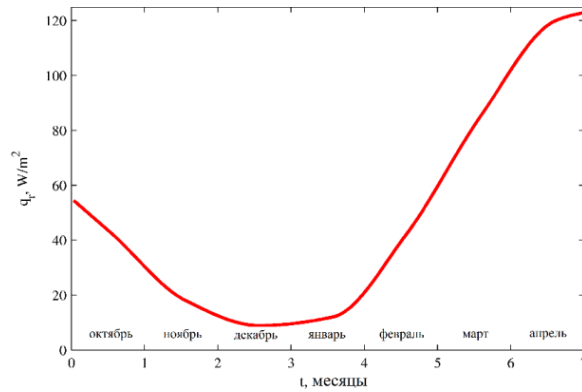


Рис. 1. Мощность солнечного излучения на горизонтальной поверхности льда в холодное время года с коэффициентом поглощения 0,7

Математическая модель, описывающая температурный режим водоема и динамику образования ледяного покрова, базируется на решении нестационарного одномерного уравнения теплопроводности с переменными коэффициентами без явного выделения фазовых границ [3]. Теплота фазового перехода учитывалась в виде эффективной добавочной теплоемкости, зависящей от теплофизических свойств воды и льда.

Временные зависимости среднесуточной температуры и толщины льда для климатических окрестностей Красноярска в течение холодного периода (октябрь-апрель) приведены на рис. 2.

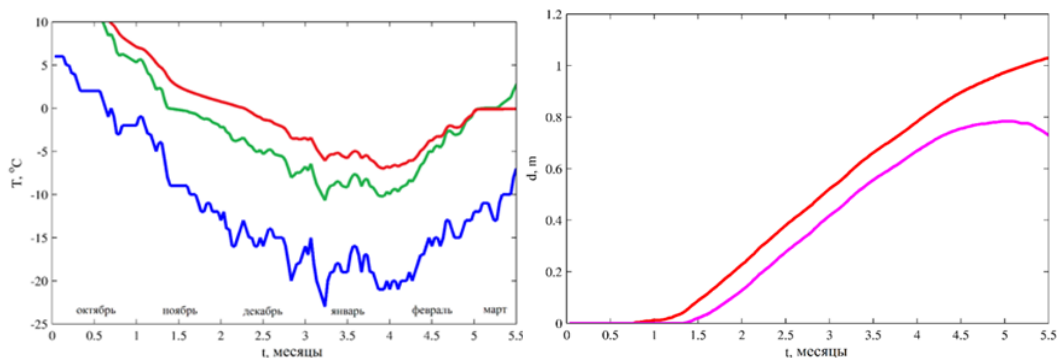


Рис. 2. Графики временных зависимостей температур воздуха (нижний), льда на глубине 20 см, (средний), с учетом нагрева поверхности льда солнечным излучением (верхний – (3а); нарастание толщины льда с учетом нагрева поверхности льда (нижняя), и без нагрева (верхняя) (3б)

С наступлением холодного периода температура верхних слоев водоема понижается ниже $+4^{\circ}\text{C}$. Плотность воды имеет максимальное значение на глубине водоема, при приближении к поверхности температура уменьшается до 0°C и начинается ледостав. При этом условия для возникновения конвекции отсутствуют. Единственным механизмом теплообмена между слоями воды является теплопроводность. Динамика замерзания льда зависит от следующих основных процессов: теплопередачи по слоям льда и воды, теплообмена поверхностей с окружающей средой, включая теплообмен, связанный с движением фазовой границы лед-вода.

Теплообмен воздуха с поверхностью льда преимущественно конвективный. В зимний период, как правило, температура воздуха ниже в ясную безветренную по-

году, по сравнению с ветреной и облачной, что изменяет стационарный конвективный процесс.

Представленные результаты расчетов предварительные, требуется уточнение климатических данных, включая учет скорость ветра, теплофизические и отражательные свойства поверхности льда. Годичный прогноз нарастания толщины льда может быть более вероятным при наличии предшествующих метеоданных климатических циклов в конкретном регионе.

Рефлектометрия состояний льда. Вариант использования ГНСС-рефлектометрии как инструмента непрерывного мониторинга состояния ледовых покровов эффективно применяется для определения толщины льда [2]. Детерминированные погодными условиями процессы ледостава определяют скорость нарастания толщины кристаллического льда. В весенний период прочностные качества льда наряду с толщиной определяются структурными изменениями, связанными с появлением в его объеме талой воды в результате таяния верхней и нижней границ льда. Это обусловлено существенными различиями действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей комплексной диэлектрических проницаемостей воды ($84 + i10$) и льда ($3,2 + i0,06$) вблизи 0°C для диапазона L1 сигналов навигационных спутников. Изменения рефракционных характеристик слоя льда приводят к заметным изменениям амплитудно-временных зависимостей (АВЗ) интерференционных рефлектограмм.

Итоговые результаты моделирования временной зависимости толщины представлены льда на рис. 2. Особенности этой зависимости заключаются в наличии линейного участка графика от середины октября до середины февраля. В это период происходит стабильное нарастание толщины льда без его объемного увлажнения.

В начальной стадии ледостава нелинейный участок связан с процессом охлаждения подледного слоя воды до температуры замерзания. В период прогрева поверхности льда до положительных температур происходит увлажнение поверхностного слоя льда и его теплопроводность уменьшается. Теплопроводности воды и льда при 0°C соответственно 0,569 и 2,22 (Вт/м·град). Замедление теплообмена в объеме влажного льда приводит к замедлению кристаллизации льда на нижней границе лед-вода и отклонению от линейной зависимости нарастания толщины льда. Временные затраты метода ГНСС-рефлектометрии с учетом лабораторной обработки экспериментальных данных позволяют за сутки получить данные о толщине и степени увлажнения льда.

Выводы. Рассмотрена теплофизическая модель тепловых потоков в сезонном цикле льда от ледостава до таяния в сочетании с экспериментальными данными ГНСС-рефлектометрии. Используются температурные данные воздуха и теплофизические свойства воды и льда. Проведено вычислительное моделирование процессов нарастания льда на границах воздух-лед и лед-вода. Получены теоретические временные зависимости толщины характеристик ледовых покровов. Выявлена необходимость учета в рассмотренной модели процессов объемного увлажнения льда в весенний период. ГНСС-рефлектометрия в сочетании с данными теплофизической модели имеют перспективу разработки метода и специализированной аппаратуры для диагностики состояния ледовых покровов.

Список литературы

1. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing. New York, London: Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. 286 p.
2. Михайлов М.И., Музалевский К.В., Миронов В.Л. Измерения толщины льда на пресноводном пруде и реке с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. Т 14, № 2, 167-174.
3. Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Макуха А.В. Динамика замораживания грунта с помощью тепловых труб. // Вестник Красноярского государственного университета. Физико-математические науки, 2005. № 4. С. 120-126

A. V. Sorokin, E. N. Vasil'ev, D. S. Makarov

Federal Research Center KSC SB RAS, Institute of computational modeling SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation
e-mail: sorav@iph.krasn.ru

HEAT FLOWS IN ICE SHEETS AND GNSS-REFLECTOMETRY IN MONITORING ICE CONDITIONS

A thermophysical model of heat fluxes in the seasonal ice cycle from freeze-up to melting in freshwater lakes of Siberia is presented. Temperature data of air and thermophysical properties of water and ice were used. Computational modeling of ice growth processes at the air-ice and ice-water boundaries has been carried out. The processes of volumetric ice moistening in spring are considered. The time dependences of the characteristics of the ice cover have been obtained. The possibility of using the considered model in the development of algorithms for reconstructing the geometric and strength characteristics of ice from reflectometry data using signals from navigation satellites in the L1 range has been revealed.

Keywords: thermophysical model, lake ice, GNSS reflectometry, L1-range, monitoring, ice condition.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 630.58.02+528.8

И. В. Данилова¹, В. А. Рыжкова²

¹ Кандидат технических наук. ² Кандидат биологических наук
Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение
ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: tiv80@mail.ru, vera@ksc.krasn.ru.

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ДАННЫХ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ РЕЛЬЕФА

В работе представлена методика картографирования растительного покрова горных территорий на основе разносезонных спутниковых данных Landsat-OLI 8 с использованием информации об условиях местопроизрастания растительности. В основу методики положено создание слоя относительно однородных по рельефу и климату участков, внутри которых формируются обучающие выборки для дешифрирования растительного покрова. Классификация снимков выполняется по методу максимального правдоподобия. Созданная на основе разработанной методики карта отражает пространственное распределение 9 классов лесной и 10 классов нелесной растительности (тундра, степи, луга и др.).

Ключевые слова: спутниковые данные Landsat 8, растительный покров, ЦМР, лесорастительные условия.

Введение. В течение последних трех десятилетий произошло существенное увеличение числа космических спутников, которые обеспечивают нас уникальной информацией о состоянии земного покрова. Изображения с системы спутников Landsat наиболее широко используются учеными, занимающимися картографированием и мониторингом растительного покрова.

Одним из основных источников ошибок при распознавании классов растительного покрова по спутниковым данным Landsat являются различия коэффициентов спектральной яркости одинаковых объектов в различных частях космического изображения [1], особенно если исследование проводится в горной местности. Данную проблему можно решить путем обработки изображения по частям при наличии наземных эталонных данных в различных частях снимка. Некоторые исследователи в процессе дешифрирования рассчитывают дополнительные признаки, такие как спектральные индексы (например, NDVI), различные показатели рельефа (высота, крутизна) и др. Мы предлагаем для распознавания одинаковых классов растительности обрабатывать сцену целиком, но с определением обучающих выборок в разных частях сцены с учетом информации об условиях местопроизрастания растительности. Такая информация может быть получена при анализе различных тематических карт (ландшафтная, геоботаническая), ЦМР, климатических данных.

Целью наших исследований является разработка методики автоматизированного картографирования растительного покрова с учётом сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик растительности и ее условий местопроизрастания.

Район исследований и используемые материалы. Объектом картографирования являлась растительность Саяно-Шушенского заповедника ($51^{\circ}46'–52^{\circ}37'$ с.ш., $91^{\circ}04'–92^{\circ}26'$ в.д.), расположенного в Алтае-Саянском экорегионе на юге Красноярского края на площади 390368 га. Заповедник включает частично Саянский, северные склоны Хемчикского и восточные отроги Кантегирского хребтов Западного Саяна. Максимальные точки поднятий находятся на Саянском хребте (более 2700 м над уровнем моря). Минимальные высоты находятся на берегах водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС (500 – 540 м над уровнем моря). Древесный ярус таежной зоны образуют кедр, сосна обыкновенная, лиственница сибирская, пихта сибирская, ель обыкновенная, береза, осина.

Для анализа и картографирования растительности заповедника были использованы следующие материалы: 1) снимки спутниковой системы Landsat-OLI 8, полученные в разные фенологические периоды (летние – июнь и раннеосенние – сентябрь) за 2015-2016 гг; 2) снимки сверхвысокого пространственного разрешения (Google Earth); 3) ЦМР SRTM; 3) картографические и таксационные данные лесоустройства за 2016 г; 4) литературные данные; 5) тематические карты (ландшафтная, геоботаническая); 6) бумажные топографические карты М 1: 50 000 – 1: 100 000.

Методика исследований. Методика картографирования растительного покрова включает следующие этапы:

1. Анализ условий местопроизрастания растительности.

Для изучения геоморфологического строения территории и приуроченности классов растительности к определенным элементам рельефа строятся топографические профили на основе ЦМР с использованием тематических карт, лесоустроительных и литературных данных.

2. Классификация признаков ЦМР и формирование растрового слоя условий местопроизрастания растительности.

Выполняется классификация признаков ЦМР с использованием комбинированного подхода: метода неуправляемой классификации ISODATA и метода сегментации (multi-resolution segmentation) с использованием объектно-ориентированного подхода (п/о eCognition). На основе анализа классов, полученных в результате классификации и сегментации ЦМР, формируются так называемые геоморфологические комплексы лесорастительных условий (ГМК ЛУ) – участки, относительно однородные по соотношению форм мезорельефа, интервалу абсолютных высот и степени расчлененности поверхности [2].

3. Классификация спутниковых изображений.

Обучающие выборки для классификации разносезонных спутниковых изображений формируются в каждом ГМК ЛУ по методике, разработанной М.А. Корец с соавторами [3] на основе лесоустроительных данных и снимков сверхвысокого разрешения. Для оценки разделимости классов выполняется анализ межклассовой трансформированной дивергенции. Спутниковые изображения классифицируются

с использованием метода максимального правдоподобия, генерализация полученных классов осуществляется методом Fuzzy Convolution (п/о ERDAS Imagine).

5. Создание карты растительности на тестовую территорию.

Окончательные классы растительности формируются с использованием всей доступной информации о растительности (лесоустроительная и литературная информация, геоботаническая карта), а также анализируется распределение древесной растительности в определенных лесорастительных условиях.

Результаты исследований. Анализ орографического строения территории выполнялся на основе ЦМР, были построены пересекающие территорию заповедника топографические профили. На основе профилей, ландшафтной и геоботанической карт, а также данных лесоустройства было проанализировано разнообразие растительности территории, а также перечень и количество (19) ГМК ЛУ.

Для определения границ ГМК ЛУ была выполнена классификация и сегментация признаков ЦМР. На основе неуправляемой классификации признаков ЦМР (абсолютная высота и уклон поверхности) методом ISODATA было выделено 19 классов расчленения земной поверхности по морфометрическим параметрам рельефа. Для генерализации полученных классов была выполнена сегментация ЦМР (абсолютная высота), в результате чего были выделены относительно однородные по высоте и текстуре (степени расчлененности) рельефа сегменты. Итоговые классы были интерпретированы как ГМК ЛУ, характеризующиеся определенными характеристиками рельефа и преобладающим типом растительности: тундры, подгольцовые и субальпийские редколесья и редкостойные леса, горные таежные леса, подтаежно-лесостепной комплекс.

Оценка разнообразия растительного покрова заповедника была выполнена с помощью классификации композита спутниковых изображений Landsat-OLI 8 (июнь, сентябрь) за 2016 гг. Композит состоял из 16 спектральных каналов (пространственное разрешение 30 м).

Анализ спектральных характеристик классов лесной растительности показал, что один и тот же класс имел разные спектральные характеристики в различных частях снимка. Это объясняется тем, что исследуемая территория очень разнообразна: перепад высот составляет от 500 до 2700 метров, имеются макро- и мезосклоны разных крутизны и экспозиций. Следовательно, при создании обучающих выборок для классификации снимков, необходимо учитывать приуроченность растительности к определенным элементам рельефа и условиям местопроизрастания.

На территорию исследований были созданы обучающие выборки для классов лесной растительности (кедр, кедр+лиственница, кедр+пихта т.д.) и нелесных земель (луга, тундры, каменистые россыпи, водные объекты и др.) внутри каждого ГМК ЛУ на основе лесоустроительных выделов и 16-канального композита. Дополнительно все обучающие выборки сверялись с актуальной информацией о растительности по снимкам сверхвысокого разрешения. В результате общее количество классов для классификации составило 328, из них 285 классов растительности, представленных в разных ГМК ЛУ, 43 класса – нелесные земли.

На основе созданных обучающих выборок была выполнена классификация и последующая генерализация снимка. Множество классов лесного покрова, полу-

ченных в разных условиях местопроизрастания, было объединено в 9 классов: 1. К (кедр без примеси других пород), 2. К+П(Е) (кедр с примесью пихты /ели), 3. К+Лц (кедр с примесью лиственницы), 4. Лц+К (лиственница с примесью кедра), 5. Лц+Е(П) (лиственница с примесью ели/пихты), 6. Лц (лиственница), 7. Лц+С (К, Е) (лиственница с примесью сосны/кедра/ели), 8. С+Лц (сосна с примесью лиственницы), 9. Е+П(Лц,К) (ель с примесью пихты/лиственницы/кедра). В результате на территорию исследования была получена карта растительного покрова.

Таким образом, комплексное использование спектральных характеристик растительности в сочетании с информацией об условиях местопроизрастания растительности, полученной при анализе рельефа местности, позволяет классифицировать растительный покров в условиях горной местности. Полученные результаты и разработанная методика могут быть полезны для картографирования труднодоступных горных лесных регионов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ «Исследование особенностей гидрологического цикла в речных бассейнах таежной зоны Средней Сибири при усилении антропогенного пресса на лесные экосистемы в условиях меняющегося климата» № 20-05-00095.

Список литературы

1. Нешатаев М.В., Нешатаев В.Ю. Картографирование растительности для кадастровой оценки земель особо охраняемых природных территорий (на примере Лапландского заповедника) // Известия Самарского научного центра РАН, 2012, том 14, №1, С. 1630–1633.
2. Ryzhkova V. A., Korets M. A., Danilova I. V.: GIS-based approach for development of the "natural basis" for thematic mapping // Proc. Int. Cartogr. Assoc. 2019. URL: <https://doi.org/10.5194/ica-proc-2-109-2019>.
3. Корец М.А, Данилова И.В., Черкашин В.П. Дистанционная индикация структуры лесных территорий // Региональные проблемы экосистемного лесоводства / Отв. ред. А.А. Онучин. Красноярск: Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, 2007. С. 52-68.

I. V. Danilova, V. A. Ryzhkova

PhD, V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Science,
Krasnoyarsk, Russia.

e-mail: tiv80@mail.ru, e-mail: vera@ksc.krasn.ru

VEGETATION MAPPING OF MOUNTAIN REGIONS BASED ON SATELLITE IMAGES AND RELIEF CHARACTERISTICS

The paper discusses a technique for mapping the vegetation cover of mountain areas based on the seasonal satellite data Landsat-OLI 8 using information on vegetation growth conditions. Training samples for the classification of images are formed within areas that are relatively homogeneous in relief and climate. Images are classified using the maximum likelihood method. The created map reflects the spatial distribution of 9 forest classes and 10 classes of non-forest vegetation (tundra, steppe, meadows, etc.).

Keywords: Landsat 8, vegetation cover, DEM, forest growth conditions.

А. В. Дзюба¹, А. В. Пятаева²

¹ Магистрант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Кандидат технических наук, Сибирский университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: anna4u@list.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ ПО ВИДЕОДАНЫМ

В работе представлено использование нейронных сетей для задачи автоматизированного чтения речи по артикуляции губ. Распознавание речи выполняется в два этапа. Сначала осуществляется поиск лица и выделение области губ в отдельном кадре видеопоследовательности с использованием признаков Хаара. Далее последовательность кадров поступает на вход сверточной и рекуррентной нейронных сетей глубокого обучения для распознавания виземы речи. Экспериментальные исследования проведены с использованием самостоятельно полученных видеороликов с русскоговорящими спикерами.

Ключевые слова: распознавание речи, чтение по губам, виземы, CNN, LSTM, русскоговорящий спикер.

Визуальное распознавание речи является важнейшей задачей при общении людей с нарушениями слуха. По данным Всемирной организации здравоохранения [1] по состоянию на 2020 год более 5% всех людей в мире (360 млн человек) страдают от серьёзных нарушений слуха. Слуховые аппараты не могут в полной мере решить проблему таких людей, так как потеря слуха может быть связана с нейропатологией. Существует ряд заболеваний, при которых люди теряют возможность извлекать звуки. В подобных ситуациях распознавание речи по артикуляции губ – единственный способ сохранить для таких людей возможность общения. Распознавание речи по артикуляции применяется также в областях, несвязанных с медициной, например, в правоохранительной деятельности.

Распознавание речи по артикуляции основано на обнаружении визем [2], мимических реализаций фонем (минимальных единиц звукового строя). Виземы и фонемы не имеют однозначного соответствия. В русском языке насчитывается 42 фонемы. Из них 6 гласных (а, и, о, у, ы, э) и 36 согласных (б, б', в, в', г, г', д, д', ж, з, з', э(й), к, к', л, л', м, м, н, н', п, п', р, р', с, с', т, т', ф, ф', х, х', ц, ч, ш, щ). Часто несколько фонем соответствуют одной виземе и выглядят одинаково на лице говорящего человека при их воспроизведении, так как многие фонемы воспроизводятся внутри полости рта или в горле.

Традиционно, системы автоматического чтения по губам (ALR) основывались на извлечении визуальных особенностей с использованием скрытых марковских моделей [4]. Применение нейронных сетей глубокого обучения для автоматизированного распознавания различных действий человека (в том числе чтение по губам) является распространённым подходом [3]. Системы распознавания речи по артикуляции используются для диктовки сообщений смартфонов [5], визуального распознавания бесшум-

ных паролей [6], расшифровки немых фильмов [7], синтеза голоса людей с нарушениями речи на основе движений их губ [8], разработки систем слежения за губами собеседника для людей с нарушениями слуха [9] и в других областях.

Алгоритм распознавания человеческой речи по артикуляции. Распознавание речи по губам состоит из двух этапов: обнаружение лиц с выделением области губ и распознавание визем.

Обнаружение лиц и выделение области губ. Для обнаружения лиц в работе использована библиотека компьютерного зрения OpenCV [10] и библиотека NumPy [11]. Алгоритм обнаружения лиц и выделения области губ состоит из следующей последовательности шагов.

Каждый кадр видеопоследовательности переводится в градации серого, так как цвет не играет существенной роли при обнаружении лица на сцене, а его наличие негативно влияет на скорость работы алгоритма.

Далее с использованием признаков Хаара [12] производится обнаружение лица на исследуемом кадре. В найденной области лица выполняется поиск губ.

Область с обнаруженными губами увеличивается на 15 пикселей с каждой стороны для того, чтобы губы не получились обрезанными.

Полученные области губ для каждой видеопоследовательности сохраняются в массив данных NumPy.

Полученная последовательность кадров с изображениями губ передается в сверточную нейронную сеть для дальнейшей обработки.

Распознавание фонем речи по артикуляции. Для распознавания фонем речи по артикуляции совместно используются две нейронных сети (рисунок): сверточная нейронная сеть (CNN) MobileNet [13] и рекуррентная нейронная сеть архитектуры LSTM [14]. Архитектура MobileNet выбрана в качестве модели трансферного обучения из-за её небольшого веса. Сверточная нейронная сеть MobileNet используется для нормализации изображений. В конце модели CNN находится полносвязный слой, выход которого используется в качестве входных данных для уровня LSTM, поэтому в качестве функции активации CNN выбрана функция ReLu. Полносвязный слой CNN, необходимый для приведения данных в необходимую размерность, имеет 1024, 128 нейронов. После преобразования видеороликов и использованием CNN видеоданные имеют вид (586, 20, 128, 128, 3), где 586 – это общее количество проговариваний для всех меток, 20 – количество кадров на проговаривание, 128 и 128 – ширина и высота изображения, 3 – количество цветовых каналов видеоизображения.

В LSTM – слое использована функция TimeDistribute, поддерживаемая Keras. Функция TimeDistribute принимает упорядоченные данные и кодирует их содержимое. В качестве объекта кодирования использована модель CNN. Объединение моделей CNN и LSTM выполняется с помощью функции Model. В качестве оптимизатора использован Adam, который имеет хорошую производительность. Поскольку модель будет выполнять задачу классификации в качестве функции потерь выбрана кросс-энтропия.

Программная реализация выполнена с использованием библиотеки глубокого обучения Keras [15], поддерживающей взаимодействие с пакетами Theano и Tensorflow. Функционал Keras очень широк и имеет удобный API, а низкая скорость

его работы компенсируется поддержкой CUDA. Keras использован для проектирования, развертывания и обучения нейронной сети, а также для распознавания визем речи по набору кадров артикуляции.

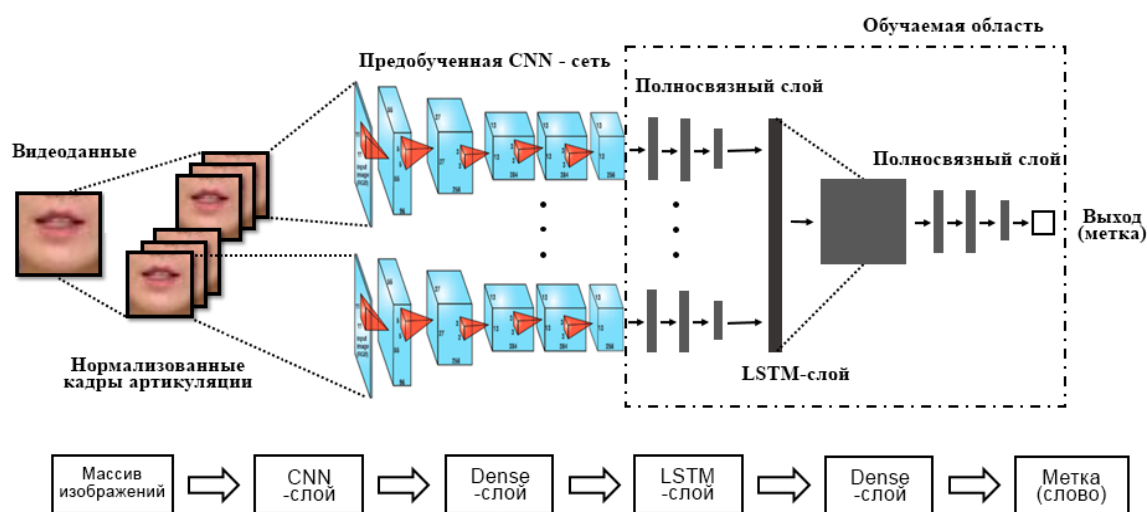


Рисунок. Архитектура нейронной сети для распознавания речи по артикуляции

Экспериментальные исследования. При проведении экспериментальных исследований использован набор данных, содержащий 768 различных высказываний, произнесенных различными спикерами. Видеоролики получены самостоятельно, так как требовался набор данных русскоязычных спикеров. Высказывания помечены теми же метками, что и набор данных для обучения. Обучающая выборка составила 80 %, тестовая выборка – 20 % от общей выборки. Качество работы алгоритма оценено с помощью показателя «точность распознавания». Тестовыми словами были: «бегу», «пила», «милый», «усы», «вулкан», «банан», «тонуть». Лучшая точность распознавания речи по артикуляции составила 93.7% для слова «банан», а средняя точность – 68%, что говорит о том, что алгоритму требуется дополнительная модификация.

Список литературы

1. World Health Organization [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/> (дата обращения 28.07.2021).
2. Speech Recognition: Watch what you say | Economist [Электронный ресурс]. URL: <https://www.economist.com/science-and-technology/2015/01/23/watch-what-you-say/> (дата обращения 28.07.2021).
3. McGurk H., MacDonald J. Hearing lips and seeing voices // Nature. 1976. № 264. С. 7-18.
4. Fink G. A. Markov Models for Pattern Recognition from Theory to Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2008.
5. Gabbay A., Ephrat T., Halperin S., Peleg S. Seeing through noise: Speaker separation and enhancement using visually-derived speech // International Workshop on Computer Vision for Audio-Visual Media. 2017. arXiv:1708.06767.
6. Lesani F. S., Ghazvini F. F., Dianat R. Mobile phone security using automatic lip reading // 2015 9th International Conference on e-Commerce in Developing Countries: With focus on e-Business (ECDC). 2015. P. 1-5.
7. Assael Y. M., Shillingford B., Whiteson S., De Freitas N. Lipnet: Sentence-level lipreading. 2016. arXiv:1611.01599.
8. Ephrat A., Halperin T., Peleg S. Improved speech reconstruction from silent video // International Workshop on Comp.Vision for Audio-Visual Media. 2017. P. 455-462.

9. Britto Mattos A., Mattos D. A. Multi-view mouth renderization for assisting lip-reading // International Conference on the Web for All. 2018. P. 38-45.
10. NumPy [Электронный ресурс. URL: <https://numpy.org/> (дата обращения 28.07.2021).
11. OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [Электронный ресурс]. URL: <https://opencv.org/> (дата обращения 28.07.2021).
12. Viola P., Jones M.J. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features // Proceedings IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2001. Vol. 1. P. 511-518.
13. Hasim S, Andrew W. Long Short-Term Memory Based Recurrent Neural Network Architectures for Large Vocabulary Speech Recognition // CoRR. 2014. arXiv:1402.1128.
14. Yamaguchi K., Sakamoto K., Akabane T., Fujimoto Y. A Neural Network for Speaker-Independent Isolated Word Recognition // First International Conference on Spoken Language Processing. 1990. P. 89-102.
15. Keras [Электронный ресурс]. URL: <https://keras.io> (дата обращения 28.07.2021).

A. V. Dzyuba¹, A. V. Pyataeva²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: anna4u@list.ru

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TECHNOLOGY FOR LIP READING

The paper presents the use of neural networks for the task of automated speech reading by lip articulation. Speech recognition is performed in two stages. At the stage of searching for lips on the face in the video frame, Haar primitives are used. Next, the sequence of frames is transmitted to the input of convolutional and recurrent neural networks for speech phoneme recognition. Experimental studies were conducted using videos with Russian-speaking persons.

Keywords: automatic lip reading, CNN, LSTM, Russian-speaking person.

**Е. В. Дмитриев^{1,2}, С. А. Зотов²,
С. А. Донской³, П. Г. Мельник⁴, А. А. Соколов⁵**

¹ Кандидат физико-математических наук,

Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный Московская область, Россия

³ Рослесинфорг, Институт лесоведения РАН, Москва, Россия

⁴ Кандидат сельскохозяйственных наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

(Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

5к.ф.-м.н., Лаборатория физики и химии атмосферы Университета Литтораль Опалового берега, Дюнкерк, Франция

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

melnik_petr@bk.ru, anton.sokolov@univ-littoral.fr

СПЕКТРАЛЬНО-ТЕКСТУРНАЯ ОБРАБОТКА РАЗНОМАСШТАБНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ПОРОДНОГО СОСТАВА ДРЕВОСТОЕВ

Предложен метод дистанционного определения структурных особенностей и породного состава лесных территорий на основе спектрально-текстурной обработки спутниковых изображений различного пространственного разрешения (WorldView-2, Ресурс-П и Sentinel-2). Для проведения тестовых расчетов рассматривалась территория Бронницкого лесничества (Московская обл.). Проведено сравнение эффективности различных матричных методов извлечения текстурных признаков для решения данной задачи. Наилучшие результаты показывают характеристики 2 порядка GLCM и CDTM, которые позволяют сегментировать рассматриваемые структурные характеристики с точностью менее 1%. На основе корреляционного анализа и метода регуляризованного последовательного отбора были выделены наиболее информативные текстурные признаки. Использование многовременных изображений позволяет значительно повысить точность классификации. Полная вероятность ошибки классификации породного состава составила величину порядка 10%. Полученные результаты тематической обработки хорошо согласуются с данными наземной лесотаксации.

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

Одним из основных источников информации используемой при осуществлении мониторинга изменений параметров лесных территорий являются результаты тематического дешифрирования многовременных мультиспектральных и панхроматических спутниковых изображений. В процессе решения региональных задач, связанных с дистанционным определением лесотаксационных параметров, структурных особенностей и биопродуктивности древостоев, используются мультиспектральные спутниковые изображения среднего (10-30 м) и высокого (1-4 м) пространственного разрешения. На основе изображений среднего разрешения реализуется возможность

регулярной актуализации информации о состоянии объектов интереса на выбранной территории. Спутниковые изображения высокого разрешения обеспечивают возможность более точной детализации обследуемых объектов, однако, при их практическом использовании возникают трудности, связанные с высокой коммерческой стоимостью этих данных.

В соответствии с публикациями последних лет, можно отметить, что одним из перспективных направлений развития методов тематической обработки аэрокосмических изображений лесных территорий является совместное использование спектральных и текстурных особенностей лесного полога. Так, в частности, результаты спектрально-текстурной обработки авиационных гиперспектральных изображений с пространственным разрешением ~ 1 м, представленные в работе [1], демонстрируют, что данный подход обеспечивает значимое (в ряде случаев более, чем на 10%) увеличение точности классификации породного состава и возрастных групп, по сравнению с усредненными спектральными характеристиками. В ряде работ других также отмечается повышение роли текстурного анализа при совместной спектрально-текстурной обработке аэрокосмических изображений. Показана эффективность использования дополнительной текстурной информации для повышения точности классификации различных характеристик лесной растительности в различных климатических условиях: влажные тропические леса [2]; смешанные леса центральных регионов России [3].

Основные проблемы, возникающие при совместной обработке изображений высокого пространственного и спектрального разрешения, как правило, связаны с избыточностью информации, получаемой в виде текстурных признаков и спектральных индексов. Возникает необходимость разработки специальных подходов, позволяющих анализировать большие объемы информации и получать дистанционные оценки характеристик обследуемых объектов с заданной точностью. Повышение эффективности тематической обработки аэрокосмических изображений высокого пространственного и спектрального разрешения имеет высокую востребованность в различных областях управления природными ресурсами, сельского и лесного хозяйства, мониторинга окружающей среды [4]. Несмотря на значительное число публикаций, указанная проблема все еще далека от решения, в особенности для прикладных задач, связанных с восстановлением свойств объектов сложной морфологической структуры.

В данной работе представлены результаты исследований, демонстрирующие новые возможности повышения точности тематической обработки мультиспектральных спутниковых изображений среднего и высокого пространственного разрешения совместно с высокодетальной текстурной информацией, получаемой современными оперативными спутниковыми системами в виде координатно-привязанных панхроматических изображений сверхвысокого пространственного разрешения (<1 м). В качестве спутниковой информации использовались панхроматические изображения WorldView-2 с пространственным разрешением 0.46 м, а также мультиспектральные изображения Sentinel 2 и Ресурс-П, соответственно среднего и высокого разрешения.

Тестовый участок расположен на территории Бронницкого лесничества в районе между селом Татаринцево и деревней Лубнинка. Особенностью древостоев дан-

ного лесничества является большое разнообразие породного состава и структур насаждений. Помимо естественных древостоев различной полноты, тестовый участок содержит культурные насаждения: постоянные лесосеменные участки 1952 г. и географические посадки лесничего П.И. Дементьева, которые представлены участками прямоугольной формы, содержащими древостои регулярной структуры. В частности, в данном районе испытываются различные виды и экотипы лиственницы, которые здесь выращивают за пределами естественного ареала произрастания [5].

В процессе тематической обработки текстурные параметры используются для классификации основных типов объектов, в частности для сегментации древостоев, и структурных особенностей лесного полога. Спектральные признаки использовались для классификации породного состава, с учетом результатов текстурной обработки. Для извлечения текстурных признаков использовался статистический подход. Рассмотрен ряд подходов, образующих класс так называемых матричных методов. Матричные методы предназначены для обработки изображений в градациях серого и предполагают, что яркости соответствующих пикселей образуют структурные элементы различной сложности, имеющих дискретное распределение. Изображение, для которого производится выделение текстуры, должно содержать достаточно большое количество структурных элементов, чтобы получить надежную оценку функции вероятности. Текстурные признаки, полученные на основе матричных методов, подразделяются на характеристики 1-го и 2-го порядков.

Мы провели сравнение эффективности 7 различных матричных методов извлечения текстурных признаков: GLM, GLDM, GLCM, GGCM, GLRLM, SRDM и CDTM, описание которых представлено в работе [6]. При построении текстурных характеристик первого порядка подразумевается, что структурными элементами являются отдельные пиксели исходного изображения. Метод GLM основан на построении матрицы уровней серого, которая представляет вектор частот появления уровней серого на обрабатываемом изображении. При реализации GLDM исходное изображение преобразуется в разностное изображение с заданным смещением по вертикали и горизонтали, которое в свою очередь используется для построения матрицы разницы уровней серого, которая по сути представляет собой вектор частот появления абсолютных значений различий уровней серого при заданном смещении.

Выделение текстурных характеристик второго порядка связано в первую очередь с построением двумерных распределений. Структурные элементы в этом случае состоят из двух пикселей или двух групп пикселей, для каждого из которых определяется соответствующая характеристика.

GLCM является одним из наиболее популярных статистических методов текстурного анализа. Элементы матрицы GLCM представляют собой частоты совместной встречаемости яркостей изображения по заданному направлению (направление смежности). На основе GLCM рассчитываются статистические моменты, известные как признаки Харалика. Аналогичным образом строится матрица GGCM, при этом исходное изображение преобразуется к изображению модуля градиента яркости, который в свою очередь оценивается с помощью оператора Собеля.

GLRLM представляет собой матрицу, которая содержит число линейных примитивов заданной длины с яркостью вдоль данного направления. Матрица SRDM

представляет собой двумерную гистограмму, показывающую количество пикселей исходного изображения, для которых во внутреннем и внешнем окружении яркость определенного количества пикселей строго меньше яркости центрального пикселя на заданную величину. При построении кресто-диагональной текстурной матрицы (CDTM) рассматриваются все возможные ячейки размером 3x3 на исходном изображении. В каждой ячейке выделяется центральный элемент и строится текстурный блок, который в свою очередь подразделяется на диагональный и крестовой текстурные блоки. Расчет элементов матрицы CDTM по сути представляет собой распределение сочетаний значений диагонального и крестового блоков.

Для сравнения эффективности указанных методов был рассмотрен тестовый участок, содержащий характерные типы растительного полога: хвойные древостой с плотным пологом, лиственный древостой с плотным пологом, разреженный смешанный древостой, смешанный древостой с выраженной кластерной структурой верхней границы полога, лесокультуры с регулярной структурой полога и луговая растительность. Результаты оценки полной вероятности ошибки текстурной классификации для различных методов извлечения текстурных признаков представлены в табл. 1. В качестве классификатора использовался ансамблевый алгоритм, известный как метод самокорректирующихся кодов. В качестве базового бинарного классификатора выбран метод опорных векторов с гауссовским ядром.

Таблица 1

Полная вероятность ошибок текстурной классификации структур растительного полога при извлечении признаков различными методами

Метод извлечения признаков	Без фильтрации		Фильтрация гаусса ($\sigma=10$)	
	Переклассификация	Независимая проверка	Переклассификация	Независимая проверка
GLM	0.22	0.247	0.142	0.151
GLDM	0.234	0.319	0.107	0.166
GLCM	0.015	0.033	0.002	0.004
GGCM	0.023	0.043	0.006	0.01
GLRLM	0.116	0.145	0.025	0.04
SRDM	0.529	0.553	0.147	0.172
CDTM	0.4	0.41	0.002	0.009

Можно видеть для всех методов характерно повышение точности при использовании фильтрации гаусса. Наилучшие результаты показывают характеристики 2 порядка GLCM и CDTM, которые позволяют сегментировать рассматриваемые структурные характеристики с точностью менее 1%. При этом следует отметить, что точность CDTM существенным образом зависит от параметра разброса гауссовского фильтра. Также данный метод демонстрирует большее различие между оценками ошибок, полученными методом переклассификации и на основе независимой валидации. На основе корреляционного анализа и регуляризованного последовательного отбора были выделены наиболее информативные текстурные признаки, вычисляемые по матрице GLCM: автокорреляция, контраст, асимметрия и корреляция.

Результаты классификации породного состава тестовой территории представлены на рис. 1. В качестве спутниковой информации использовались изображения высокого пространственного разрешения Ресурс-П (рис. 1-б) и многовременные изображения среднего разрешения Sentinel-2. При обработке изображений высокого разрешения учи-

ывался режим освещения крон. Полностью затененные участки крон и межкрупное пространство выделены черным цветом. Полученные результаты хорошо согласуются с данными наземной лесотаксации. Для оценки ошибки использовался метод кросс-валидации. Результаты расчета поклассовой вероятности ошибок пропуска цели (ОЕ) и ложной тревоги (СЕ) классификации представлены в табл. 2.

Мы можем видеть, что по обоим типам данных удается получить приемлемый результат. Данные Ресурс-П имеют лучшую пространственную детализацию. Данные Sentinel-2 в среднем имеют несколько более высокую общую точность за счет многовременной структуры. Наименьшие ошибки соответствуют хвойным породам (сосна и ель), которые классифицируются с ошибками не более 10%. Наибольшие ошибки возникают при классификации дубовых древостоев.

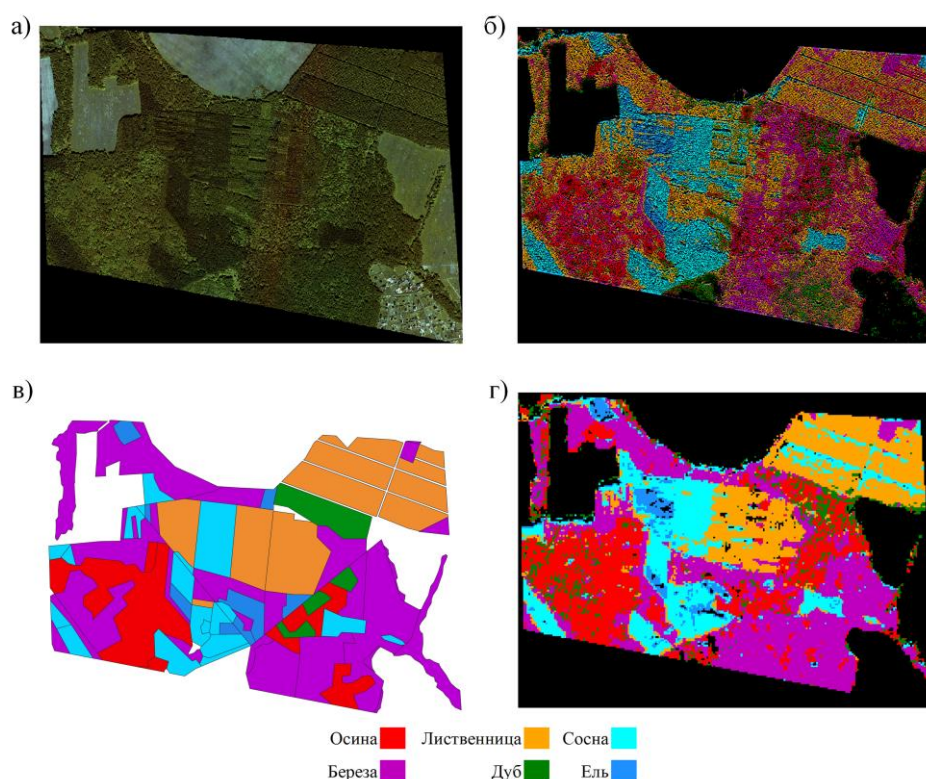


Рис. 1. Результаты классификации породного состава тестового участка на территории Бронницкого лесничества. а – RGB изображение; б – результат классификации изображения Ресурс-П; в – карта доминантных пород; г – результат классификации многовременных изображений Sentinel-2

Таблица 2

Оценки ошибок классификации породного состава по изображениям Sentinel-2 и Ресурс-П

Порода	Sentinel-2		Ресурс-П	
	ОЕ	СЕ	ОЕ	СЕ
Осина	0.077	0.125	0.085	0.170
Береза	0.011	0.053	0.091	0.132
Лиственница	0.045	0.000	0.136	0.104
Дуб	0.106	0.053	0.150	0.038
Сосна	0.004	0.015	0.072	0.051
Ель	0.016	0.004	0.048	0.070

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, , проекты № 19-01-00215 «Исследование оперативных возможностей гиперспектральных технологий ДЗЗ для решения региональных задач с использованием действующих и перспективных ГСК космического базирования» и 20-07-00370 «Фундаментальные проблемы повышения информативности обработки данных оптоэлектронных авиакосмических устройств высокого пространственного и спектрального разрешения».

Список литературы

1. Рылов С.А., Мельников П.В., Пестунов И.А. Спектрально-текстурная классификация гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 4, № 1. С. 78-84.
2. Ferreira M. P., Wagner F. H., Aragão L. E., Shimabukuro Y. E., & de Souza Filho C. R. Tree species classification in tropical forests using visible to shortwave infrared WorldView-3 images and texture analysis // ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2019, 149, 119-131.
3. Dmitriev, E. V., Sokolov, A. A., Kozoderov, V. V., Delbarre, H., Melnik, P. G., Donskoi, S. A. Spectral texture classification of high-resolution satellite images for the state forest inventory in Russia // Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI. International Society for Optics and Photonics. 2019. V. 11149. P. 111491J.
4. Shafri H.Z. Machine learning in hyperspectral and multispectral remote sensing data analysis // Artificial Intelligence Science and Technology: Proceedings of the 2016 International Conference (AIST2016). 2017. P. 3-9.
5. Тимофеев В.П. Основы лесовыращивания лиственницы // Опыт выращивания лесных культур лиственницы в РСФСР. М.: Лесн. пром-сть, 1976. С. 6-60.
6. Chaki J., Dey N. Texture feature extraction techniques for image recognition. Springer Singapore. 2020. 100 p.

**E. V. Dmitriev^{1,2}, S. A. Zotov², S. A. Donskoi³, P. G. Melnik⁴,
A. A. Sokolov⁵**

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

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow reg., Russia

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

⁴Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

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

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

SPECTRAL-TEXTURE PROCESSING OF VARIOUS SCALE SATELLITE IMAGES IN THE RETRIEVAL OF STRUCTURAL FEATURES AND SPECIES COMPOSITION OF FOREST STANDS

A method for remote sensing retrieval of the structural features and species composition of forest areas based on spectral-texture processing of satellite images of various spatial resolutions (WorldView-2, Resurs-P and Sentinel-2) is proposed. The territory of the Bronnitskoe forestry (Moscow region) was considered to carry out the numerical experiments. Comparison of the effectiveness of various matrix methods for extracting texture features for solving this problem is carried out. The best results are obtained with the 2nd order characteristics of the GLCM and CDTM, which allow segmenting the considered structural characteristics with an accuracy of less than 1%. Based on the correlation analysis and the method of regularized sequential selection, the most informative textur features were identified. The use of multi-temporal images can significantly improve the classification accuracy. The total probability of an error in the classification of the species composition was about 10%. The obtained results of thematic processing are in good agreement with the data of ground-based forest inventory.

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

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

Институт космических и информационных технологий,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: OlgaArc@yandex.ru

ВИЗУАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В статье рассматривается проблема представления многомерных данных на основе применения метода научной визуализации. Предлагается метод визуально-интерактивной анимации на основе динамического представления изображений в виде 2D моделей сечений. Эффект многомерности достигается за счет выбора 2D моделей, вариативности направлений динамических сечений и использование возможностей стереоскопического зрения.

Ключевые слова: научная визуализация, концепция визуального представления, методы визуализации, анимация.

Задача извлечения содержательной информации из многомерных данных, полученных при дистанционном зондировании земли (ДЗЗ), в общем случае весьма сложна. В настоящее время проводится большая работа по использованию данных ДЗЗ для решения многих задач народного хозяйства, где прежде всего важна аналитика пространственно временных изменений природных и техногенных процессов. Космический мониторинг позволяет получать однородную и сравнимую по качеству объективную информацию огромных объемов одновременно для обширных территорий, что недостижимо при любых наземных обследованиях. Важной особенностью поступающей информации является ее высокая размерность, что усложняет ее обработку и интерпретацию.

Следует отметить, что понимание высших измерений ограничено. Визуализация в основном представлена тремя измерениями, включая дополнительную анимацию. В последнее время активно применяются подходы для визуального представления многомерной информации с использованием проекций или абстракций: от уменьшения размерности до визуального кодирования и от количественного анализа до интерактивного моделирования.

Для визуального исследования многомерных данных в настоящее время применяются различные приемы. Среди них отметим использование перспективы, удаление скрытых линий и поверхностей, применение стереографических изображений для представления образа объекта, которое обманывает нашу зрительную систему в восприятии пространства, или объемное изображение, нарисованное на явно плоском экране компьютера. При анализе изображений в гарнитуре виртуальной реальности, применяется параллакс движения, который помогает воспринимать глубину, даже если дисплей перед нами на самом деле не более, чем массив цветных точек [1–4].

В настоящее время во многих исследованиях многомерных данных используется понятие научная визуализация. Научная визуализация основана на трех

этапах преобразования информации: преобразование данных, визуальное отображение, просмотр преобразованных данных. Преобразование данных соответствует аналитическим методам, таким как уменьшение размерности, регрессия, кластеризация, извлечение признаков, топологический анализ, выборка данных и абстракция. Визуальное отображение, как ключ к большинству задач визуального кодирования, фокусируется на организации информации со стадии преобразования данных для визуального представления. Просмотр преобразованных данных соответствует методам, ориентированным на пространство экрана и визуализацию, а также меры экранного пространства для уменьшения артефактов и выделения важных функций.

Данное исследование посвящено разработке техники визуально-интерактивной анимации для обработки, представления и анализа многомерных данных. Предлагается использовать метод визуально-интерактивного моделирования пространственных данных для получения максимально возможной информации об изучаемом объекте. Для этого используется подход, основанный на методах научной визуализации и визуальной аналитики. Он позволяет организовать человеко-машинный интерфейс, усиливающий аналитические способности человека с помощью таких методов, как расширение оперативной памяти человека за счет использования специальной визуализации на основе размещения информации в пространстве в соответствии с временными соотношениями и организация управляемой среды для работы пользователя в пространстве параметрических значений. Такая организация визуального представления и интерфейсов обеспечивает человеку возможность сразу видеть, исследовать и понимать огромные информационные объемы.

Рассмотрим основные методы научной визуализации. В первую очередь отметим методы уменьшения размерности пространственных признаков и характеристик, что является ключевым фактором для многих задач визуализации. Можно выделить основные из них. Так линейная проекция включает в себя многие классические методы, такие как анализ главных компонент (PCA), многомерное масштабирование (MDS), линейный дискриминантный анализ (LDA) и различные методы факторного анализа [5]. Кластеризация – один из наиболее широко используемых методов многомерного анализа данных. Регрессионный анализ многомерных данных – это самостоятельная обширная и активная область исследований. Исследователи также используют регрессию для обобщения данных. Подобные методы изображают структуры данных через каркасные представления и используют алгоритм кластеризации с последующим построением минимального дерева центроидов кластера для определения возможных тенденций в данных. Здесь регрессия используется как этап постобработки алгоритмов для представления итогов извлеченных подмножеств данных. Распространены также методы управления проектированием, в которых, помимо многомерного входного пространства, у пользователя есть одна или несколько выходных или ответных переменных, которые он хочет исследовать, при этом результатам требуются качественная экспертиза, или обоснования решений. Мы сосредоточимся на совместном применении метода визуализации и регрессионного анализа [5].

Отметим, что визуализация прежде всего направлена на повышение информативности человека, решающего проблему. Поэтому важно отметить, что для числа

измерений меньше трех реализация визуального анализа данных не представляет особой сложности, потому, что человек, обладает двумерным зрением и укладывающимися в его сознание геометрическими образами, и представлениями для пространств с числом измерений $n \leq 3$. Для многомерных объектов с большим числом измерений подобных геометрических образов у человека нет. Следовательно, необходимо осуществлять проецирование во вложенные пространства со стандартным числом измерений. Помимо трех пространственных измерений, единственное другое измерение, которое мы встречаем в реальном мире — время. При достижении определенной частоты синтеза кадров существует естественная тенденция связывать различные статические изображения вместе (бета-движение). Изображения, показанные быстрее, чем около 20 Гц, будут выглядеть непрерывно, без мерцания. Во время анимации обработка каждого кадра также должна включать восстановление визуализации для каждого нового временного шага или, возможно, считывания файла данных для получения нового временного шага. Одной из альтернатив анимации является «мозаика» дисплея с различными кадрами. Заметим, что, анимация, дает общее представление об объекте, в то время, как взгляд на кадры показывает мелкие детали, которые в противном случае могли быть пропущены. Поэтому в идеале мы стремимся обеспечить оба механизма для отображения многомерных наборов данных [6-8]. Основной особенностью рассматриваемого подхода визуально-интерактивного представления многомерных данных с числом измерений $n \geq 3$ является их динамическое представление в виде 2D моделей сечений. Эффект многомерности достигается за счет выбора 2D моделей, вариативности направлений динамических сечений и использование возможностей стереоскопического зрения. Остановимся подробнее на представлении объекта в виде динамических сечений. Целью данного подхода является представление движения сечений, как образ объекта. Для повышения качества восприятия необходимо уменьшить эффект от перекрытия сечений. Одним из таких способов является возможность показывать на сечениях не всю информацию, а только часть. Например, применять изолинии, используя цвет, показывая информацию только в узлах сетки. Параметрами метода визуально-интерактивной анимации является расстояние между плоскостями и скорость движения сечений [3].

Представленный подход в сочетании с применением методов численного моделирования позволяет исследовать данные ДЗЗ в задачах изучения рельефов местности, проведения гидрологических изысканий, исследования сельскохозяйственных угодий и так далее, существенно повышая интерпретируемость и информативность результатов исследований для различных типов специалистов.

Список литературы

1. Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Четкин В.М. Анализ развития концепций и методов визуального представления данных в задачах вычислительной физики // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2011, Т. 51, 4, С. 669–683.
2. Масленников О.П., Мильман И.Е., Сафиуллин А.Э., Бондарев А.Е., Низаметдинов Ш.У., Пилюгин В.В. Разработка системы интерактивного визуального анализа многомерных данных // Научная визуализация Т. 6, 4, 2014 С. 30–49
3. Попова О.А. Визуально-интерактивная анимация в задачах анализа данных // Информатизация и связь. 2019. № 5. С. 93-96.
4. Wright H. Introduction to Scientific Visualization. London: Springer-Verlag. 2007

5. Liu S., Maljovec D., Wang B., Bremer P.-T. Pascucci V. Visualizing High-Dimensional Data: Advances in the Past Decade // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. Vol. 23(3), 2017, pp. 1249-1268
6. Steele J. (Eds.) Beautiful Visualization. O'Reilly Media, Inc., 2010
7. Zhang Q., Segall R., Cao M. Visual Analytics and Interactive Technologies: Data, Text and Web Mining Applications. Hershey, New York: Information Science reference. 2011
8. Dill J. Expanding the Frontiers of Visual Analytics and Visualization. London: Springer-Verlag. 2012

B. S. Dobronets, O. A. Popova, A. M. Merko

Institute of Space and Information Technology, Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia
e-mail: OlgaArc@yandex.ru

VISUAL STUDY OF MULTIDIMENSIONAL DATA IN PROBLEMS OF EARTH REMOTE SENSING

The article considers the problem of representing multidimensional data based on the application of the method of scientific visualization. A method of visual – interactive animation based on the dynamic representation of images in the form of 2D section models is proposed. The multidimensional effect is achieved through the choice of 2D models, the variability of the directions of dynamic sections and the use of the possibilities of stereoscopic vision.

Keywords: scientific visualization, concept of visual presentation, visualization methods, animation.

Б. С. Добронез, О. А. Попова, К. В. Вюст

Институт космических и информационных технологий,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: kirillwuest@gmail.com

ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ БОЛЬШИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Рассматривается задача обработки больших пространственно-временных рядов спутниковых данных. Предлагается процесс обработки данных представить, как последовательность вычислительных процедур для построения моделей временных рядов распределений. Для этих целей предлагается использовать процедуры агрегирования и вычислительный вероятностный анализ, основу которого составляют вероятностные арифметики над функциями плотности вероятности. Показывается, что применение разработанных процедур снижает уровень неопределенности в данных, увеличивает их информационную составляющую, повышает вычислительную надежность численных расчетов.

Ключевые слова: временные ряды распределений, вычислительный вероятностный анализ, оценка рисков.

В последние десятилетия актуализировалась проблема обработки и анализа больших пространственно-временных рядов данных с целью получения необходимой надежной информации для решения широкого круга практических задач. Такими данными являются, например, данные спутниковых наблюдений, которые в настоящее время служат основным источником информации для регионального и глобального мониторинга состояния земной поверхности.

Например, современные спутниковые системы, осуществляющие глобальное наблюдение Земли с высоким временным разрешением, позволяют получать пространственные данные регулярных измерений спектрально-отражательных свойств земной поверхности для оценки фенологических характеристик сезонной динамики растительного покрова.

Исходные спутниковые данные, как правило, проходят предварительную обработку, направленную на устранение шумов, обусловленных несовершенством регистрирующей аппаратуры, влиянием атмосферы, геометрическими искажениями и т.д. Поэтому для анализа сезонной динамики временного ряда состояния часто требуется дополнительная обработка данных, включающая в себя фильтрацию выбросных значений, заполнение пропусков и сглаживание. Данная проблема существенно усложняется, если необходимо исследовать большие пространственно-временные ряды. Для таких данных в силу их большого объема достаточно сложно выявить существующие в них закономерности, оценить изменчивость и построить адекватную модель для решения задачи прогнозирования.

Временные ряды распределений состоят из случайной выборки функций плотности вероятности $f_i(x)$, на компактном интервале D вещественной прямой R . Эти функции можно рассматривать как реализации некоторого стохастического процесса, который

часто предполагается в гильбертовом пространстве, например в пространстве L_2 . С появлением больших наборов данных (Big Data) существует острая необходимость в разработке новых статистических подходов. Символьный анализ данных, проведенный L. Billard и E. Diday [3], дает новые методики исследования в этом направлении.

Предлагаемый нами подход основан на технологиях Big Data, включая процедуры агрегации данных для входных параметров, и использовании вычислительного вероятностного анализа (ВВА) [1,5]. Переход к более обобщенному представлению с помощью агрегирования необходим по нескольким причинам. Во-первых, агрегация существенным образом может снизить объем данных. Во-вторых, детализированные данные часто оказываются очень изменчивыми из-за воздействия различных случайных факторов, разброса значений и, поэтому слабо отражают общие тенденции и свойства исследуемого множества. Агрегация в этом случае позволяет увидеть имеющиеся тенденции и закономерности.

С точки зрения временного ряда распределений можно выделить гистограммы временные ряды (Histogram-Valued Time Series) как совокупность гистограмм, упорядоченных по времени [3,5]. Развивая этот подход, можно говорить о временных рядах распределений [1,4–6]. В работе для построения прогноза временных рядов распределений предложены новые численные операции над кусочно-полиномиальными функциями распределений. Рассмотрено применение экстраполяции Ричардсона для повышения точности построения кусочно-полиномиальных функций распределений [8].

В качестве численных примеров рассмотрены временные ряды функций плотности вероятности распределений температуры. Использовались данные температуры в г. Красноярске за последние сто лет. Данные агрегировались как по годам, так и по дням. Например, строились функции плотности вероятности данных температуры за некоторый год или данные температуры в некоторый день за последние сто лет. Для аппроксимаций функций плотности вероятности использовались эрмитовы сплайны пятой степени. Численное моделирование функциональных временных рядов показало хорошую сходимость предложенного подхода. Использование вычислительного вероятностного анализа с использованием кусочно-полиномиальных моделей открывает новые возможности в прогнозировании состояний сложных систем, дистанционного зондирования Земли, оценок надежности ответственного оборудования, оценки гидрологических, инвестиционных рисков [6–8]

Работа с большими наборами пространственных данных требует разработки и реализации новых статистических инструментов. Например, L. Billard и E. Diday в своей работе [3] проводят исследование новых методик символьного анализа данных.

На рисунке представлен временной ряд распределений температуры по годам в городе Красноярске с 1960 по 2020 годы.

В работах [1; 4; 6; 7] предлагают использовать подход, реализуемый посредством вычислительного вероятностного анализа (ВВА) и агрегации данных входных параметров.

Актуальность использования данных методов заключается в более информативном представлении и анализе изменчивости данных, чем у других форм агрегирования. Кусочно-полиномиальные функции позволяют достаточно точно представлять произвольные распределения случайных величин. Это позволяет уменьшить объем вычисле-

ний, повышать точность и извлекать больше знаний из больших наборов данных. Методы агрегации позволяют выявлять шаблоны движения для различных объектов, производя группировку похожих траекторий в кластеры по их свойствам.

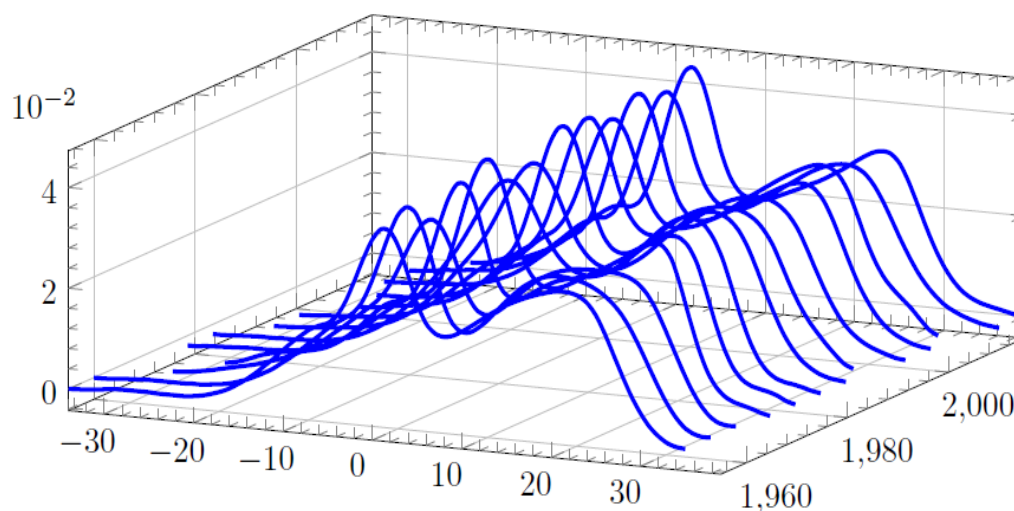


Рисунок Временной ряд распределений температуры по годам

Для повышения качества и точности прогнозирования предлагается агрегировать пространственно-временные данные, получаемые с различных устройств и представлять их в виде временных рядов распределений. Временные ряды распределений необходимо рассматривать как функции плотностей вероятности с использованием кусочно-полиномиальных функций [1; 4].

Список литературы

1. Добронев Б.С., Попова О.А. Вычислительный вероятностный анализ: модели и методы. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020.
2. Ramsay J.O. Silverman B.W. Functional Data Analysis. Springer 2nd ed., New York, 2005.
3. Billard L., Diday E. Symbolic Data Analysis: Conceptual Statistics and Data Mining. West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons, 2006.
4. Добронев Б.С., Попова О.А. Вычислительные аспекты цифровой экономики // Управление большими системами: сборник трудов. 2020. № 84. С. 114-129.
5. Добронев Б.С., Попова О.А. Численный вероятностный анализ неопределённых данных. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2014. – 168 с.
6. Попова О.А. Функциональный анализ данных для изучения данных дистанционного зондирования земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли материалы VI Международной научной конференции. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2019. С. 137-140.
7. Popova O.A., Dobronets B.S., Merko A.M. Distributional time series for forecasting and risk assessment // Modeling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems. Сборник статей Международной научной конференции. Под редакцией Е.Д. Соложенцева, В.В. Карасев. 2020. С. 122-128.
8. Popova O.A. Using Richardson Extrapolation to Improve the Accuracy of Processing and Analyzing Empirical Data // Measurement Techniques, Vol. 62, No. 2, May, 2019 DOI 10.1007/s11018-019-01594-1

B. S. Dobronets, O. A. Popova, K. V. Vyust

Institute of Space and Information Technology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

e-mail: kirillwuest@gmail.com

APPROACHES TO STUDYING LARGE TIME SERIES OF SATELLITE DATA

The problem of processing large space-time series of satellite data is considered. It is proposed to represent the data processing process as a sequence of computational procedures for constructing models of time series of distributions. For these purposes, it is proposed to use aggregation procedures and computational probabilistic analysis, which are based on probabilistic arithmetic over probability density functions. It is shown that the application of the developed procedures reduces the level of uncertainty in the data, increases their information component, and increases the computational reliability of numerical calculations.

Keywords: time series of distributions, computational probabilistic analysis, risk assessment.

Л. Г. Евстратова, А. А. Антошкин

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

e-mail: lge_21@mail.ru, santex132@gmail.com

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАРАСТАНИЯ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ

Рассмотрена методика выявления зарастания древесно-кустарниковой растительностью пахотных земель по разновременным космическим многоспектральным снимкам высокого пространственного разрешения при мониторинге использования сельскохозяйственных земель. Метод основан на использовании вейвлет-анализа при обработке разновременных космических снимков для быстрого выявления пахотных земель подверженных зарастанию древесно-кустарниковой растительностью. Исследования выполнялись по космическим снимкам, полученным со спутников QuikBird, GeoEye и WorldView. Показана эффективность применения структурных признаков изображений объектов при автоматизированном дешифрировании пахотных земель. В результате экспериментальных работ было установлено, что вейвлет-анализ позволяет быстро выявлять земельные участки, заросшие древесно-кустарниковой растительностью различной площади.

Ключевые слова: мониторинг зарастания пахотных земель, структурные признаки, вейвлет-анализ, космические снимки.

При решении задачи по эффективному вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения возникает вопрос об определении местоположения и площади неиспользуемых земельных участков, подверженных зарастанию древесно-кустарниковой растительностью. Наиболее оперативными и достоверными данными для решения данной задачи являются многоспектральные снимки, получаемые космическими съёмочными системами. Заметим, мониторинг зарастания древесно-кустарниковой растительностью сельскохозяйственных угодий востребован, например, для соблюдения положений постановления правительства РФ от 21 сентября 2020 г. № 1509 [1]. В связи с этим актуальным является задача разработки методов автоматизированного определения сельскохозяйственных земель подверженных зарастанию по многоспектральным космическим снимкам.

Современные автоматизированные методы дешифрирования позволяют с достаточной достоверностью распознавать различные объекты. Однако, при анализе разновременных многоспектральных изображении спектральные характеристики участков могут изменяться, так как существенно зависят от условий съёмки и состояния объекта. Поэтому алгоритмы, в которых основным дешифровочным признаком является спектральная яркость объекта, зафиксированная в виде значений яркости элементов цифрового изображения, не может служить достаточным дешифровочным признаком.

Одним из вариантов решения проблемы является использование структурных признаков многоспектральных изображений эталонных участков на космических

снимках. Известно, что структурные признаки являются более устойчивыми, характеризуют внутренние свойства изображений объектов, непосредственно связанных с его структурой и практически не изменяется во времени [3; 4; 5], а значит, алгоритмы, основанные на этих свойствах – эффективнее, чем с использованием спектральных свойств изображений. Такие признаки получают путем Фурье преобразования, вейвлет преобразования, путем преобразования с использованием специально заданных базисных функций различного вида (например, сферических функций).

В докладе приводятся результаты исследований предложенной методики оперативного обнаружения зарастания древесно-кустарниковой растительностью пахотных земель по многоспектральным космическим снимкам, основанной на вейвлет преобразовании.

Цель данной работы – оценка возможности использования вейвлет-анализа при обработке разновременных снимков для локализации зарастания древесно-кустарниковой растительностью земельных участков сельскохозяйственного назначения.

Исследования велись по космическим снимкам высокого пространственного разрешения QuikBird, GeoEye и WorldView. Для вейвлет преобразования (в дискретном случае) численными характеристиками структурных признаков объектов на изображении являются матрицы коэффициентов при базисных функциях для каждого масштабного уровня преобразования. Вейвлет преобразования выполнялись с помощью биортогонального вейвлета. Для программной реализации и применения вейвлет преобразования для обработки многоспектральных снимков был использован язык Python 3.8.

Изображения древесно-кустарниковой растительности отличаются от окружающей их растительности на пашни по яркости, тону, структуре. Значения коэффициентов вейвлет-разложения зависят от значений флуктуации сигнала, то есть в местах изображений, где есть резкие перепады значений яркости (граница какого-либо объекта), будут получены большие значения коэффициентов вейвлет-разложения, чем на однородных участках. Используя это свойство, можно локализовать участки снимка, на которых изображены земельные участки подверженные зарастанию древесно-кустарниковой растительностью.

На первом этапе исследования определялась возможность нахождения аномалий (зарастания древесно-кустарниковой растительностью) на пахотных землях по космическим многоспектральным снимкам на основе полученных вейвлет-коэффициентов. Выполненные исследования показали, что биортогональный вейвлет может использоваться как индикатор наличия изменений на разновременных снимках одного и того же участка местности и использоваться как дешифровочный признак участка изображения.

В настоящее время не решена проблема в математической формализации структурных признаков [2; 3]. В работах [4; 5] предложено в качестве численного критерия локализации вырубок в сплошных лесных массивах на основе вейвлет-анализа по разновременным космическим снимкам коэффициент корреляции между уровнями вейвлет-разложения K_{ij} , вычисляемый по формуле

$$k_{ij} = \frac{\sum_{x=i}^N \sum_{y=j}^N (P_i(x, y) - P_{cpi}) (P_j(x, y) - P_{cpj})}{[\sum_{x=i}^N \sum_{y=j}^N (P_i(x, y) - P_{cpi})^2]^{1/2} [\sum_{x=i}^N \sum_{y=j}^N (P_j(x, y) - P_{cpj})^2]^{1/2}}$$

где k_{ij} – коэффициент корреляции, вычисляемый между уровнями i и j вейвлет-разложения изображения P .

Чтобы выявить зарастания древесно-кустарниковой растительностью пахотных земель, необходимо вычислить коэффициент корреляции между соответствующими уровнями вейвлет-разложения разновременных снимков. Значение коэффициента корреляции укажет на участки, где произошли изменения [4].

На втором этапе выполнялись исследования ряда изображений по выявлению изменений на разновременных снимках. Для этого вычислялся коэффициент корреляции между соответствующими уровнями вейвлет-разложения снимков, полученных на разные даты.

Завершающий этап методики оперативного обнаружения неиспользуемых земельных участков (пашни) подверженных зарастанию древесно-кустарниковой растительностью по космическим снимкам, основанной на вейвлет преобразовании является автоматическая векторизация изменений на снимках. Далее обнаруженные изменения совмещаются с картографическим материалом на раннюю дату, чтобы обновить устаревшие данные.

В результате выполненных исследований показано, что вейвлет-анализ может быть использован на этапе предварительной обработки космических многоспектральных изображений с целью локализации участков с зарастанием древесно-кустарниковой растительностью сельскохозяйственных угодий.

По снимкам высокого пространственного разрешения, полученным со спутников QuikBird, GeoEye и WorldView, выполнено крупномасштабное картографирование зарастаний земельных участков древесно-кустарниковой растительностью пашни, которое имеет большое практическое значение для рационального использования земель сельскохозяйственного назначения.

Исследования с использованием структурных признаков изображений, как устойчивых дешифровочных признаков объектов на различных изображениях высокого пространственного разрешения, разработка методов их формализации и применения является актуальной задачей.

Список литературы

1. Постановление правительства РФ «Об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения» [Электронный ресурс]: постановление: [утверждено 21 сентября 2020 г., № 1509] // Официальный интернет-портал правовой информации URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202009230018>.
2. Блаттер К. Вейвлет-анализ: Основы теории. – М.: Изд-во Техносфера, 2004. 280 с.
3. Прэйт У. Цифровая обработка изображений. В 2 кн. – М.: Изд-во Мир, 1982. 670 с.
4. Гук А.П., Евстратова Л.Г., Гордиенко А.С., Алтынцев М.А. Локализация изменений природно-территориальных комплексов по разновременным космическим снимкам // Геодезия и картография. 2010. № 2. С. 19–25.
5. Гордиенко А.С. Использование вейвлет-анализа при обработке аэрокосмических снимков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 2. С. 68-71.

L. G. Evstratova, A. A. Antoshkin

State University of Land Use Planning elarusian State University, Moscow, Russia
e-mail: lge_21@mail.ru, santex132@gmail.com

IDENTIFICATION OF OVERGROWTH OF ARABLE LAND FROM SATELLITE IMAGES BASED ON STRUCTURAL FEATURES

The detecting overgrowth method of arable lands with tree and shrub vegetation from high spatial resolution different times multispectral satellite images when monitoring the agricultural land using is considered. The method is based on the use of wavelet analysis in the processing of different time space images for the rapid identification of arable land subject to overgrowth of tree and shrub vegetation. The research was carried out using space images obtained from the Quickbird, GeoEye and WorldView satellites. The effectiveness of the use of structural features of object images in the automated decoding of arable land is shown. As a result of experimental work, it was found that the wavelet analysis allows you to quickly detect overgrowth land plots with tree and shrub vegetation of various areas.

Keywords: monitoring of arable land overgrowth, structural features, wavelet analysis, space images.

С. Т. Им^{1,2,3}, И. А. Петров¹, В. И. Харук^{1,2}

¹ Институт леса (ФИЦ КНЦ СО РАН), Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий

имени М. Ф. Решетнова, Красноярск, Россия

e-mail: stim@ksc.krasn.ru

СЪЕМКА CORONA В АНАЛИЗЕ ДИНАМИКИ ЭКОТОНА ЛЕСОТУНДРЫ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ (ГОРА ОРЛИГТАСХЫЛ)

Проведен анализ изменений в экотоне лесотундры горы Орлигтасхыл на основе анализа доступной съемки из космоса CORONA (1971 г.) и Worldview (2013 г.). На снимке WorldView древостои выделены с помощью метода классификации Iso cluster. Дифференциация древостоев от фоновых территорий на снимке CORONA производилась на основе статистического анализа гистограмм яркостных характеристик выделяемых классов и согласовывалась с классификацией снимка WorldView. Каппа-статистика показала хорошую точность ($\kappa = 0.93$) классификации снимка Worldview и удовлетворительную для CORONA ($\kappa = 0.67$). За период наблюдений произошел рост площади деревьев на ~38%. Наибольший прирост площади наблюдался на юго-восточных прогреваемых склонах. Значимые изменения отмечаются на верхней границе экотона лесотундры, где верхняя граница деревьев сместилась вверх на ~9 м (0.2 м в год). ГИС-анализ показал, что деревья формируют протяженные однонаправленные кластеры, преимущественно направленные вдоль ветров и расположенные поперек склона. Отмеченные изменения происходили на фоне роста летних температур, которая в 1971–2013 гг. возрастала на 0.3°C каждые 10 лет ($r^2 = 0.32$, $p < 0.01$).

Ключевые слова: Кузнецкий Алатау, CORONA, Wordview, экотон лесотундры.

С конца 20 века в экотонах горной лесотундры в разных частях мира отмечается ускорение роста древесной растительности и ее продвижение по градиенту высоты [1]. Данные дистанционного зондирования Земли среднего разрешения в совокупности с ГИС-технологиями позволяют количественно оценить динамику таких изменений. Снимки сверхвысокого разрешения позволяют повысить точность оценки динамики растительного покрова экотона лесотундры, с помощью которых возможен учет отдельных деревьев [2]. В данной работе исследована динамика древесной растительности экотона горной лесотундры Кузнецкого Алатау с использованием съемок сверхвысокого разрешения CORONA и Worldview.

Объект исследования. Анализировался экотон горной лесотундры Кузнецкого Алатау (гора Орлигтасхыл; 54°06'23" с.ш.; 89°04'08" в.д.). Высота горы 1454 м. По горе проходит граница Хакасии и Кемеровской области. Площадь анализируемой территории 451 га. В экотоне из древесных пород преобладает кедр (*Pinus Sibirica*). В год выпадает 560±61 мм осадков, зимой – 68±17 мм, летом – 235±40 мм. Средняя годовая температура -3.0±1.0°C, зимняя – -21.0±2.6°C, летняя – 13.7±0.8°C.

Материалы. Пространственно-временные изменения в экотоне лесотундры оценивались на основе снимков спутника Corona J-3 (спутник КН-4В программы разведки CORONA (США); дата съемки 16.09.1971 г.; номинальное разрешение 1,8

м) [3] и спутника Worldview-2 (14.07.2013 г.; пространственное разрешение 0,5 м). Снимок Corona приобретен с помощью геопортала геологической службы США Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Снимок Worldview-2 получен с онлайн сервиса Bing Maps с помощью программы SASPlanet (<http://www.sasgis.org/sasplaneta>). Для анализа связей с топографией местности использовалась цифровая модель рельефа SRTM GL1 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003>; пространственное разрешение 30 м). Полевые материалы собраны в 2016 г. (12 пробных площадок) и включали в себя данные о геоприязке, лесотаксационное описание, информацию о ландшафте и почве. В исследовании использовались климатические данные CRU TS 4.05 за 1971–2013 гг. (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.05).

Методика. Дешифрирование снимка 2013 г. производилось методом неконтролируемой классификации Iso cluster [4]. На основе полевых данных и экспертно-визуального анализа выделенные 50 классов объединены в два основных класса: (1) темнохвойные деревья (высота > 3 м, сомкнутость > 0.2); (2) фоновые территории (рис. 1). Для оценки точности классификации методом каппа-статистики использовано 458 пространственно-равномерно распределенных тестовых точек, определенных экспертно-визуально и по данным полевых исследований. Общая точность классификации составила 95% (каппа 0.93).

Пространственная привязка снимка 1971 г. к снимку 2013 г. осуществлена методом сплайнов на основе 1107 опорных точек. Метод сплайнов использовался из-за значительных нелинейных геометрических искажений, связанных с рельефом горной местности. Для дешифрирования черно-белого снимка 1971 г. выделялись типичные участки темнохвойных деревьев (выше 3 м). На их основе статистически рассчитывался диапазон значений пикселей для идентификации классов. Темнохвойным деревьям соответствовали значения яркости 8–72. Далее, классификация уточнялась путем согласования с классификацией 2013 г. Общая точность составила 87% (каппа 0.67) (рисунок).

Геообработка производилась средствами программного пакета ESRI ArcGIS Desktop.

Результаты и обсуждение. За период наблюдения (1971–2013 гг., 42 года) площадь темнохвойных древостоев возросла на 38% (0.9% в год). Возрастание площади деревьев происходило неравномерно относительно топографии местности. Наибольшие изменения произошли в верхней части гор (на высотах 1300–1400 м над у.м.) в экотоне лес-тундра, где площадь обнаруженных деревьев возросла на ~150%. Высотная граница деревьев (100 пикселей) сместилась вверх на ~9 м (0.2 м/год). Это почти совпадает с наземной оценкой (0.2–0.3 м/год) [5]. Такая оценка немного ниже, чем медианная для северного полушария (0.35 м/год) [1]. Максимум возрастания площади деревьев соответствует южным и юго-западным склонам. На северо-восточном склоне анализируемой территории деревья произрастают на ~100 м ниже, чем на юго-западном. Наблюдаемые изменения произошли на фоне возрастающего тренда летних ($t_{л}$) и годовых температур ($t_{г}$). В 1971–2013 гг. $t_{л}$ возрастала на 0.3°C каждые 10 лет ($r^2 = 0.32$, $p < 0.01$). Температура $t_{л}$ (2000–2013 гг.) выше на 1.0°C (U -тест, $p < 0.02$) таковой за 1971–1990 гг. С 1935 по 2013 гг. $t_{г}$ повышалась на 0.3°C каждые 10 лет ($r^2 = 0.38$, $p < 0.01$). Значимых трендов осадков не обнаружено.

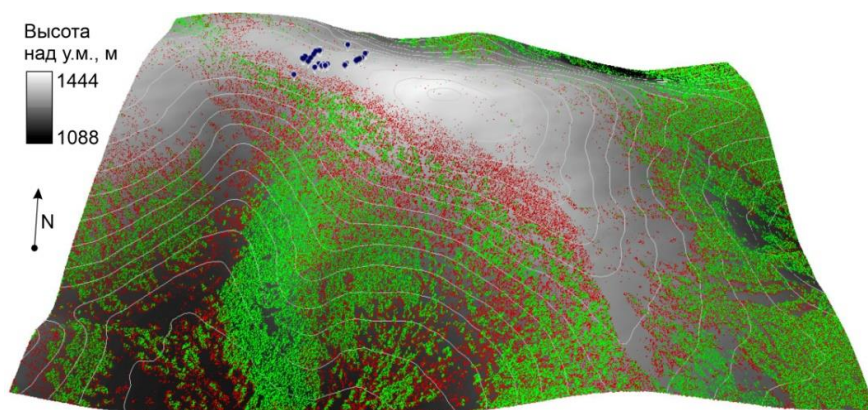


Рисунок. Схема расположения темнохвойных древостоев, выделенных по снимкам 1971 г. (Согона, зеленый) и 2013 г. (WorldView-2, красный). Синими кружками показаны наземные пробные площадки. Подложка – цифровая модель рельефа SRTM GL1

Пространственный статистический анализ среднего ближайшего соседства кластеров и многовариантного пространственного кластерного анализа (Ripley's K) [6] показали, что выделенные кластеры деревьев (центроиды которых расположены на расстоянии менее 190 м), формируют группы – полосы деревьев. За 1971–2013 гг. количество кластеров увеличилось на ~56% (1.3%/год). Кластеры формируют полосы деревьев, вытянутые в северо-восточном направлении (~36°), что соответствует направлению ветров. Особенно это заметно высотной границе экотона лесотундры и подтверждается наземными материалами. Такие группы деревьев формируются в результате комплексного воздействия ветров, снега и образования водотоков [1].

Заключение. Съемка CORONA в совокупности с другими материалам позволяют анализировать динамику древесной растительности в экотоне горной лесотундры с достаточной точностью. В 1971–2013 гг. площадь деревьев на ключевом участке возрасла на 0.9% в год, и их высотная граница смещалась вверх на 0.2 м в год. В анализируемом экотоне деревья формируют кластеры, обусловленные воздействием ветров и снега. Произшедшие изменения сопровождалось ростом летних температур на 0.03°C ежегодно в 1971–2013 гг.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научных проектов № 20-44-240007 и № 20-41-240001.

Список литературы

1. Lu X., Liang E., Wang Y., Babst F., Camarero J.J. Mountain treelines climb slowly despite rapid climate warming // *Global Ecology and Biogeography*. 2021. [V. 30, Issue 1]. P. 305–315. URL: <https://doi.org/10.1111/geb.13214> (дата обращения: 27.04.2021)
2. Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L., Ranson K.J., Petrov I.A. Tree wave migration across an elevation gradient in the Altai Mountains, Siberia // *Journal of Mountain Science*. 2017. [V. 14, No. 3]. P. 442–452. URL: <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4286-7> (дата обращения: 27.04.2021)
3. Declassified intelligence satellite photographs. Fact sheet 090-96 // United States Geological Survey. 1998. URL: <https://web.archive.org/web/20070705233001/http://erg.usgs.gov/isb/pubs/factsheets/fs09096.html> (дата обращения: 27.04.2021)
4. Richards J.A. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1986. 281 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02462-1> (дата обращения: 27.04.2021)

5. Petrov I. A., Shushpanov A. S., Golyukov A. S., Kharuk V. I. *Pinus sibirica* Du Tour response to climate change in the forests of the Kuznetsk Alatau Mountains // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Siberian Journal of Forest Science). 2019. No. 5. P. 43–53.

6. Dixon P.M. Ripley's K Function // In Wiley StatsRef: Statistics Reference Online (eds N. Balakrishnan, T. Colton, B. Everitt, W. Piegorisch, F. Ruggeri and J.L. Teugels). 2014. 9 p. URL: <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07751> (дата обращения: 27.04.2021)

S. T. Im^{1,2,3}, I. A. Petrov¹, V. I. Kharuk^{1,2}

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS), Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ M. F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

CORONA IMAGERY IN THE ANALYSIS OF FOREST-TUNDRA ECOTONE IN KUZNETS ALATAU (ORLIGTASHYL MOUNTAIN)

Changes in the forest-tundra ecotone of Orlygtashyl mountain were analyzed based on the available satellite CORONA (1971) and Worldview (2013) imagery. Forest stands were identified on the Worldview scene using Iso cluster classification. Stands were differentiated from the background area using statistical analysis of histogram of the identified classes' brightness values and were agreed with the classification of the Worldview imagery. Kappa-statistics shown good accuracy ($\kappa = 0.93$) of the Worldview imagery classification and average for CORONA ($\kappa = 0.67$). Area of stand increased by ~38% during the analyzed period. Maximal area increase was observed on the south-eastern warm slopes. Significant changes were determined on the elevational boundary of the ecotone where the stands' upper boundary shifted up by elevation on ~9 m (0.2 m/yr.). GIS analysis revealed that trees form elongated clusters mainly directed across the slope. Observed changes occurred along with summer temperature increase during 1971–2013 by 0.3°C/decade ($r^2 = 0.32$, $p < 0.01$).

Keywords: Kuznets Alatau, CORONA, Worldview, forest-tundra ecotone.

**П. А. Колбудаев¹, Д. Е. Плотников², Е. А. Лупян³,
А. А. Прошин⁴, А. М. Матвеев¹**

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² Кандидат физико-математических наук, Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия

³ Доктор технических наук, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁴ Кандидат технических наук, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
e-mail: kolbudaev@d902.iki.rssi.ru

МЕТОДЫ И АВТОМАТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ, МАСКИРОВАНИЯ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ И АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ РАЗНОЗОНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ КМСС-М НА БОЛЬШИХ ТЕРРИТОРИЯХ

Разработаны методы и автоматическая технология потоковой обработки снимков МСУ-100М (КМСС-М) находящегося на борту спутника Метеор-М № 2. Созданные методы позволяют устранить локальные искажения географической привязки изображений, детектировать облачность и тени от них, а также выполнить атмосферную коррекцию данных. Также была создана технология автоматизированной обработки данных и обработаны изображения КМСС-М на Европейскую часть России и сопредельные страны за 2020 год. Географическая допривязка основана на поиске локальных смещений малых фрагментов изображения, при которых достигается максимальное значение корреляции Пирсона при сравнении с географически привязанным, безоблачным и актуализированным эталоном низкого пространственного разрешения, основанном на полученном по данным MOD09 продукте ИКИ РАН. Детектирование облачности и теней базируется на использовании вычисленных на этапе допривязки значений корреляции и построении опорного изображения, характеризующего разницу с эталонным изображением. Этап компенсации влияния атмосферы основан на идее гистограммного совмещения данных КМСС-М и актуализированного эталона для соответствующих малых фрагментов безоблачных участков изображений и также выполняет радиометрическую коррекцию данных и устраняет эффекты, связанные с различиями геометрии наблюдения и освещения наблюдаемой поверхности. Разработанные методы характеризуются высокой степенью гибкости и универсальности и могут быть использованы для автоматической обработки данных других, в том числе, отечественных, спутниковых систем. Созданная технология позволяет обрабатывать большие объемы изображений КМСС-М для территории России и ряда сопредельных стран.

Ключевые слова: Метеор-М № 2, КМСС-М, МСУ-100М, географическая допривязка, маскирование облачности и теней, атмосферная коррекция

Метеорологический спутник Метеор-М № 2, на котором находится комплекс многозональной спутниковой съемки КМСС-М, был запущен 8 июля 2014 года и движется вокруг Земли по солнечно-синхронной орбите на высоте около 825 км [1]. В состав КМСС-М входят две камеры МСУ-100М и одна камера МСУ-50М. В работе использовались данные с двух многозональных съемочных устройств МСУ-100М. Камеры оптимизированы для исследования суши и снимают в трёх спектральных каналах – зеленом (0,535-0,575 мкм), красном (0,630-0,680 мкм) и БИК (0,760-0,900 мкм) с пространственным разрешением около 60 метров [1]. Формируемая полоса обзора с двух камер составляет около 960 км, при этом существует межканальный

параллакс, связанный с тем, что приемные элементы соответствующих спектральных каналов разведены в фокальной плоскости движения спутника [1], что приводит к параллаксу на таких объектах как облачность, вершины гор и временному лагу между данными разных спектральных каналов. Получаемые изображения с камер МСУ-100М представляют большой интерес ввиду того, что помимо относительно высокого пространственного разрешения обладают высокой частотой повторяемости наблюдений, при которой вся территория России полностью покрывается снимками за 2-3 дня.

Разработанные методы географической допривязки, маскирования облачности и теней, атмосферной коррекции основаны на пространственном анализе и сравнении с эталоном, в котором отсутствуют искажения, связанные с привязкой и который свободен от влияния мешающих факторов, таких как облака и тени от них, а также атмосферно скорректирован. В качестве такого эталона выступает восстановленное изображение MODIS, полученное из продукта MOD09 на произвольную дату. Временной ряд эталонных атмосферно скорректированных сцен MODIS был обработан с использованием метода интерполяции на основе LOESS с весами, где в качестве веса использовались изображения максимума корреляции [2]. В результате получены временные серии безоблачных разнотональных изображений на некоторые гранулы Европейской территории. Полученный эталон в значительной мере свободен от влияния разного рода мешающих факторов, таких как остаточная облачность, стыки между гранулами и характеризуется улучшенной географической привязкой по сравнению с исходным продуктом MOD09.

Метод допривязки реализуется на небольших локальных областях исходного изображения и основан на оптимизированном переборе возможных положений изображения МСУ-100М относительно эталона и подсчете значений корреляции и нахождении максимального значения корреляции Пирсона [3]. Подсчет корреляции осуществляется путем последовательного закругления блоков размером 4 на 4 пикселя КМСС-М и сравнения с соответствующим пикселем эталона и поиске оптимального смещения. Нахождение оптимального смещения делается с шагом в один пиксель данных КМСС-М, что позволяет осуществить допривязку изображений МСУ-100М с точностью в среднем не хуже 30 метров. Помимо этого, с целью оптимизации и увеличения скорости обработки первоначально устраняется систематическое смещение путем нахождения смещения всего изображения МСУ-100М, при котором достигается наибольшее значение корреляции Пирсона подсчитанном по всему снимку при сравнении с опорными данными. Уникальной особенностью метода является возможность при использовании данных более низкого пространственного разрешения в качестве эталона допривязать данные более высокого разрешения, используя изображения только одного соответствующего спектрального канала. Географическая допривязка делается поканально.

Детектирование облачности основано на использовании полученного на этапе допривязки вспомогательного изображения максимальных корреляций в локальных областях которое характеризует наличие мешающих факторов [4]. Путем пространственного анализа корреляций происходит разделение изображения на преимущественно чистую и преимущественно зашумленную части изображения. В результате

сравнения с эталоном считается метрика, характеризующая разницу между данными и находится адаптивный локальный порог на детектирование облачности. Маскирование теней основана на подсчете углов Солнца на основе известных географических координат и времени съемки, в результате чего определяется область потенциально-го нахождения теней от облачности и использовании вспомогательного изображения разницы между данными МСУ-100М и эталонного изображения. На рис. 1. показан пример выделения облачности и теней на части изображения КМСС\МСУ-100М за 15 мая 2020 года. Преимуществом описанного метода является то, что детектирование облачности и теней становится возможным осуществлять при использовании даже некалиброванных данных и только в одном спектральном канале, что делает его применимым с изображениями любого уровня обработки, в том числе, некалиброванными.

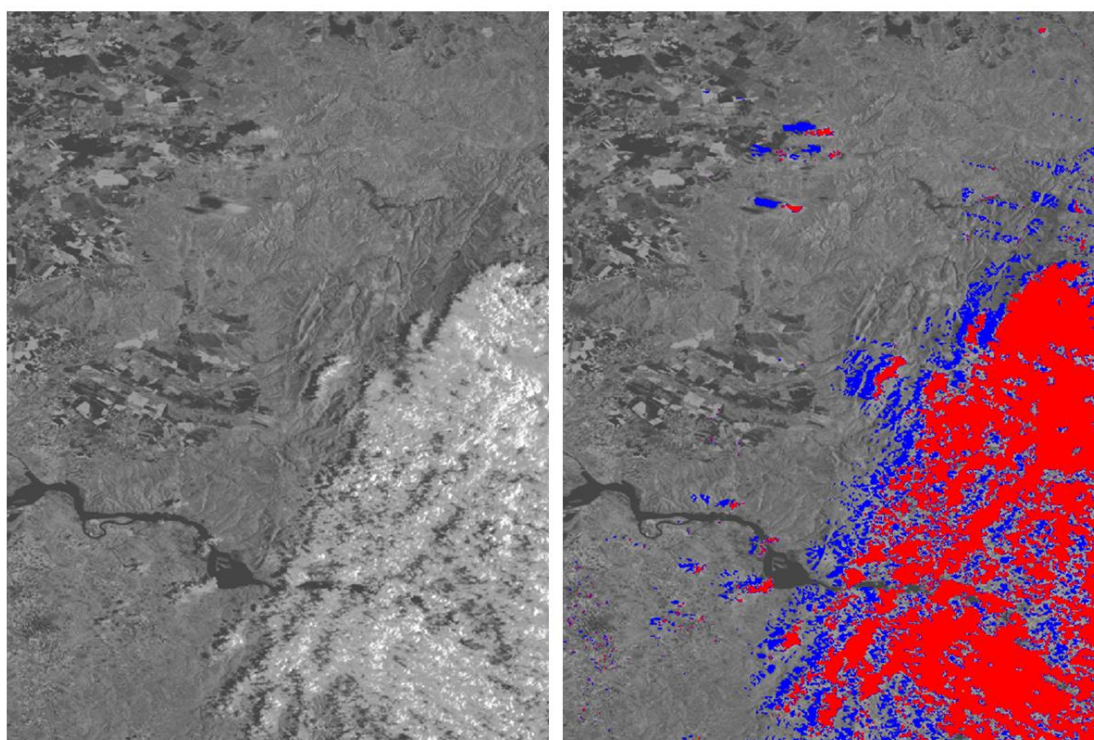


Рис. 1. Часть сцены МСУ-100М в БИК канале за 15 мая 2020 года.
Красным цветом отмечена детектированная облачность, синим – тени от облаков

Метод атмосферной коррекции основан на локализованном пространственном анализе с эталоном [5]. В процессе пространственного анализа собирается статистика, то есть считается распределение количества пикселей от значений яркости. Предполагается, что, так как территории и дата съемки одинаковы то и собранная статистика и гистограммы одинаково распределены и возможно их совместить так называемым методом *histogram matching* [6]. Для этого используются посчитанные на предыдущем этапе маски облаков и теней для исключения мешающих факторов. С целью получения достаточного количества статистики, локальные окна, по которым собираются статистика и гистограммы увеличиваются. Таким образом, формируются локальные гистограммы чистой поверхности по изображениям МСУ-100М и

актуализированного эталона. В дальнейшем подбираются коэффициенты линейного сжатия/растяжения и сдвига гистограммы МСУ-100М для наилучшего совпадения с гистограммой эталона. Найденные коэффициенты и являются необходимыми для пересчета значений КМСС-М. Описанный подход выполняется локально методом скользящих окон, в каждом из которых находятся коэффициенты пересчета и применяются только для той части изображения, в котором находится окно. В итоге каждый пиксель корректируемого изображения получает множество оценок с сопровождающими их оценками качества (на основе метрики характеризующей совпадение гистограмм после их совмещения), на основе которых осуществляется коррекция данных.

Таким образом, в результате описанного метода происходит фактически радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция изображений МСУ-100М. Помимо этого метод фактически устраняет эффект анизотропии, который возникает на изображениях МСУ-100М ввиду большого угла обзора камер. Преимуществом созданного метода докалибровки, многофакторной компенсации влияния атмосферы, а также неодинаковой, ввиду большого охвата сцены, геометрии наблюдения и освещения, является достаточность использования данных только одного соответствующего спектрального канала.

Разработанные методы географической допривязки, маскирования облачности и теней, атмосферной коррекции были положены в основу разработанной автоматической технологии потоковой обработки данных МСУ-100М [7]. Для удобства был осуществлен переход на гранульный формат данных и новую номенклатуру имен продуктов, которые удобны для пространственно-временного анализа, каталогизации временных серий и распространения полученных продуктов.

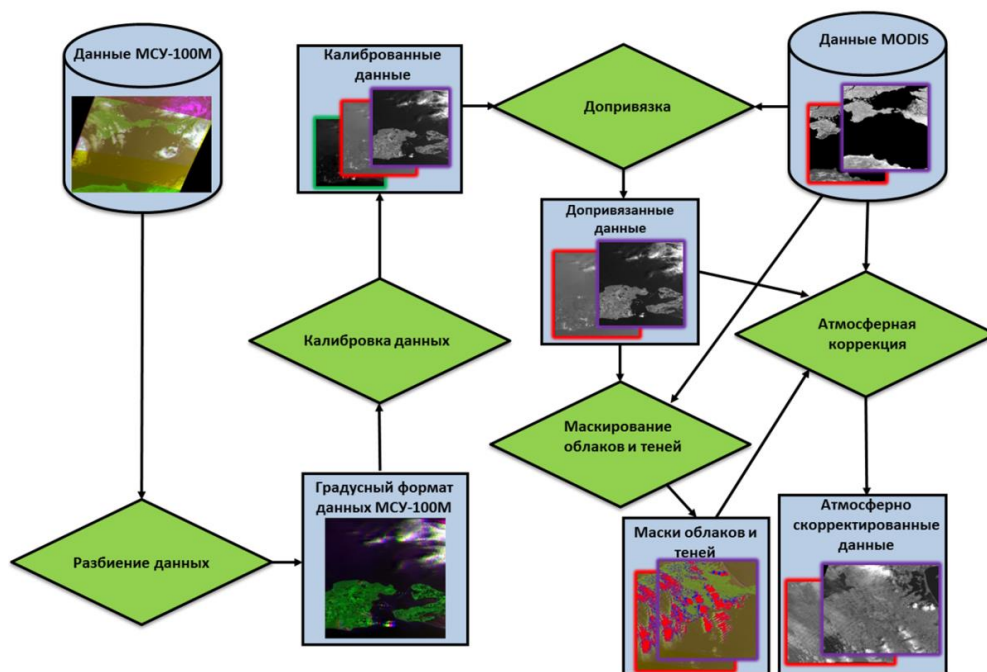


Рис. 2. Блок-схема технологии обработки данных КМСС-ММСУ-100М

В принятом стандарте имен продуктов включена вся необходимая информация, такая как название продукта, номер года, дня и времени съемки, номер камеры и координаты верхнего левого угла гранулы. Блок-схема разработанной технологии показана на рис.2. Результаты обработки доступны в интерфейсе систем семейства «Созвездие-Вега» (sozvezdie-vega.ru) и включают в себя помимо атмосферно скорректированных и допривязанных изображений МСУ-100М также маски облачности и теней для каждого спектрального канала отдельно и индекс NDVI.

На рис. 3 показана территория потоковой обработки изображений МСУ-100М за 2020 год, которая покрывает часть Европейской территории России, а также некоторые сопредельные государства.

Обработка спутниковых данных велась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [8]. Работы выполнены в рамках темы «Мониторинг» (государственная регистрация № 01.20.0.2.00164)

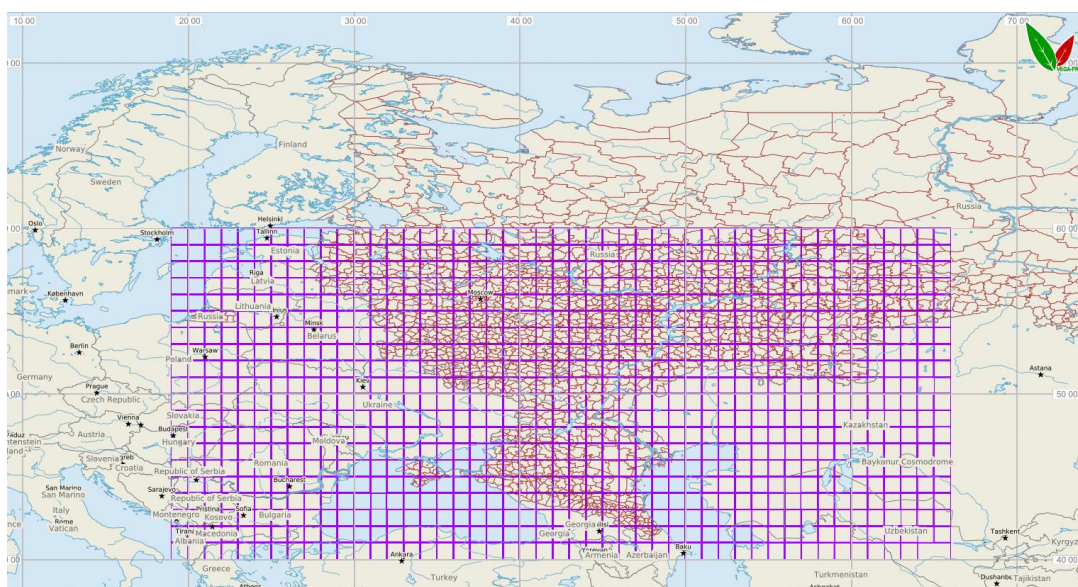


Рис. 3. Область обработки изображений КМСС-ММСУ-100М за 2020 год.

Список литературы

1. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В., Межгодовой тренд чувствительности камер комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 по результатам полётной калибровки в 2015–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. №1. С. 53–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-53-60
2. Cleveland W. S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots // J. American Statistical Association. 1979. V. 74(368). P. 829–836. DOI: 10.2307/2286407.
3. Колбудаев П. А., Плотников Д. Е., Матвеев А. М., Барталев С. А. Развитие методов географической допривязки и выявления облачности на монохроматических изображениях КМСС на основе использования безоблачного эталона и анализа границ объектов земной поверхности // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 ноября. 2019, Москва, ИКИ РАН. С.37. DOI:10.21046/17DZZconf-2019a.
4. Колбудаев П. А., Плотников Д. Е., Барталев С. А. Метод выявления облачности на монохроматических изображениях МСУ-100М («Метеор-М» № 2) на основе пространственного анализа и границ объектов земной поверхности // 16-я Всероссийская открытая конференция

«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. 12–16 ноября 2018, Москва. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 41. DOI: 10.21046/2070-16DZZconf-2018a.

5. Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Барталев С.А. Метод предобработки и атмосферной коррекции MSU-100M (Метеор-М № 2) для применения в задачах количественной оценки характеристик земной поверхности // Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 13-17 ноября 2017. ИКИ РАН. Москва. Тезисы докладов, 2017. С. 38.

6. Hadjimitsis D. G., Papadavid G., Agapiou A., Themistocleous K., Hadjimitsis M. G., Retalis A., Michaelides S., Chrysoulakis N., Toullos L., Clayton C. R.I. Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010. V. 10. P. 89–95.

7. Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М., Барталев С.А., Прошин А.А., Кашницкий А.В. Технология, результаты массовой обработки и характеристики полученных наборов спутниковых данных КМСС (MSU-100M) для количественной оценки земной поверхности // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН. С. 26. DOI:10.21046/18DZZconf-2020a.

8. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашницкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т.16. №С.151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

P. A. Kolbudaev¹, D. E. Plotnikov², E. A. Loupian³,
A. A. Proshin², A. M. Matveev¹

¹ Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

² PhD, Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

³ Doctor of Science, Space Research Institute RAS, Moscow, Russia.

e-mail: kolbudaev@d902.iki.rssi.ru

METHODS AND TECHNOLOGY OF AUTOMATIC GEOGRAPHIC REFERENCING, MASKING OF OBSTRUCTIVE FACTORS AND ATMOSPHERIC CORRECTION OF KMSS-M IMAGES

Methods and technology for processing images of MSU-100M (KMSS-M) onboard the satellite Meteor-M № 2 have been developed. The developed methods make it possible to eliminate nonlinear distortions of the geographic referencing of images, detect clouds and shadows from them and make atmospheric data correction. Based on the developed methods, technology for automated data processing was created and images of KMSS-M for the European part of Russia and neighboring countries for 2020 year were processed. Georeferencing is based on the search for local offsets at which the maximum value of Pearson's correlation is achieved when compared with MODIS data. The detection of clouds and shadows is based on the use of the calculated correlation values at the stage of geographic correction and the construction of a reference image characterizing the difference with the MODIS data. The atmospheric correction stage is based on the idea of a histogram matching of MSU-100M and MODIS data at the local level and actually replaces the radiometric correction of the data and eliminates the effects associated with large observation angles of the underlying surface. The developed methods are unique in their kind, images are processed independently per band and only images of one spectral band are required for processing and are flexible, which allows them to be applied to various data. The created technology is characterized by efficiency due to the high processing speed.

Keywords: Meteor-M № 2, KMSS-M, MSU-100M, geographic referencing, masking of clouds and shadows, atmospheric correction.

А. С. Кузнецова, М. Г. Ерунова, О. Э. Якубайлик

ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: anna.simakina.97@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ

Применение данных дистанционного зондирования для мониторинга сельскохозяйственных угодий. Осуществление мониторинга и вычисления вегетационного индекса NDVI, путем дешифрирования спутниковых данных высокого пространственного разрешения (3-5 м) PlanetScope. Это позволяет одновременно с изучением динамики распределения индекса NDVI выращиваемых культур проводить мониторинг соответствующих сельскохозяйственных угодий за вегетационный период. Полученные значения индекса NDVI, приведенные в виде графика наглядно демонстрируют фенологические фазы развития сельскохозяйственных культур. Результаты проведенной работы, можно использовать для выявления неоднородностей распределения культур на сельскохозяйственных угодьях.

Ключевые слова: мониторинг, спутниковые данные PlanetScope, сельскохозяйственные угодья, вегетационный индекс NDVI.

Введение. В процессе осуществления сельскохозяйственной деятельности большое внимание должно уделяться контролю сельскохозяйственных угодий, имеющих приоритет в использовании и подлежащих особой охране [1].

Применение данных дистанционного зондирования позволяет осуществлять мониторинг больших территорий, тем самым снижая затраты на проведение обследований сельскохозяйственных угодий полевыми методами.

Благодаря современным достижениям, возможно получение спутниковых данных более высокого пространственного разрешения, подходящих как для мониторинга сельскохозяйственных угодий, так и для более детального изучения таких территорий. К таким спутниковым данным относятся снимки PlanetScope, с пространственным разрешением 3–5 м.

Одним из возможных направлений является исследование динамики спектральных свойств сельскохозяйственных угодий, путем вычисления значений нормализованного дифференцированного вегетационного индекса — NDVI.

Материалы и методы. Территория исследования расположена в юго-западной части Курагинского района Красноярского края. Опытное-производственное хозяйство (ОПХ) «Курагинское» является филиалом ФГБУ ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН». Общая площадь хозяйства составляет чуть больше 14 тысяч гектаров.

Для проведения данной работы, была изучена информация о сельскохозяйственных угодьях ОПХ «Курагинское» общей площадью 6022.84 га, за 2019-2020 года. На 84 полях было выращено 17 видов сельскохозяйственных культур, одни из преобладающих культур приведены в таблице.

Сведения о преобладающих культурах на территории ОПХ «Курагинское»

№	Культура	Данные за 2019 год		Данные за 2020 год	
		Число полей	Площадь, га	Число полей	Площадь, га
1	Овес	10	1114.44	10	1168.85
2	Люцерна	5	536.36	7	535.48
3	Многолетние травы на сенокос	10	231,18	8	145,26

В данной работе использовались спутниковые данные высокого пространственного разрешения PlanetScore [2]. Для дешифрирования были подобраны безоблачные снимки с апреля по сентябрь 2019-2020 годов.

Вычисление значений индекса NDVI [3] для конкретных полей опытно-производственного хозяйства требовало создания цифровой карты полей [4], с векторным отображением границ полей и сопутствующей информации о полях. С этой целью по высококачественному космическому снимку была проведена оцифровка границ полей ОПХ «Курагинское». К векторным границам добавлены атрибутивные данные, в виде номера поля и его площади (га).

Значения индекса NDVI за вегетационные сезоны 2019-2020 годов, соответствующие конкретным полям, были рассчитаны методом зональной статистики в программе QGIS. В процессе расчета значения индекса усреднялись в границах полей. Таким образом, по каждому из проанализированных полей был получен набор значений индекса NDVI за вегетационные сезоны двух лет. Результаты сохранены в электронной таблице MS Office Open XML.

Результаты. Исследования по применению спутниковых данных высокого пространственного разрешения для мониторинга сельскохозяйственных угодий ОПХ «Курагинское» приведены, на примере значений вегетационного индекса NDVI преобладающих культур. Полученные данные позволяют изучить изменение значений индекса NDVI сельскохозяйственных культур за вегетационные сезоны 2019-2020 годов.

В течение вегетационного периода рассматриваемые культуры проходят определенные фенологические фазы развития. Происходящие при этом изменения отображаются на динамике вегетационного индекса NDVI. Наглядное представление динамики вегетационного индекса можно получить, построив по вычисленным значениям NDVI графики для всех выращиваемых культур за 2019-2020 года на территории хозяйства.

На рисунке представлены графики средних значений индекса NDVI, построенные для культур (овес, люцерна и многолетние травы) на территории ОПХ «Курагинское».

Анализ построенных графиков значений индекса NDVI позволил получить наглядное представление об особенностях развития каждой культуры, так как вегетационный индекс NDVI коррелирует с зеленой фитомассой и продуктивностью [5].

Полученные данные позволяют не только просматривать динамику вегетационного индекса NDVI культур, но осуществлять мониторинг сельскохозяйственных угодий, путем наблюдения за ними в течение вегетационных периодов.

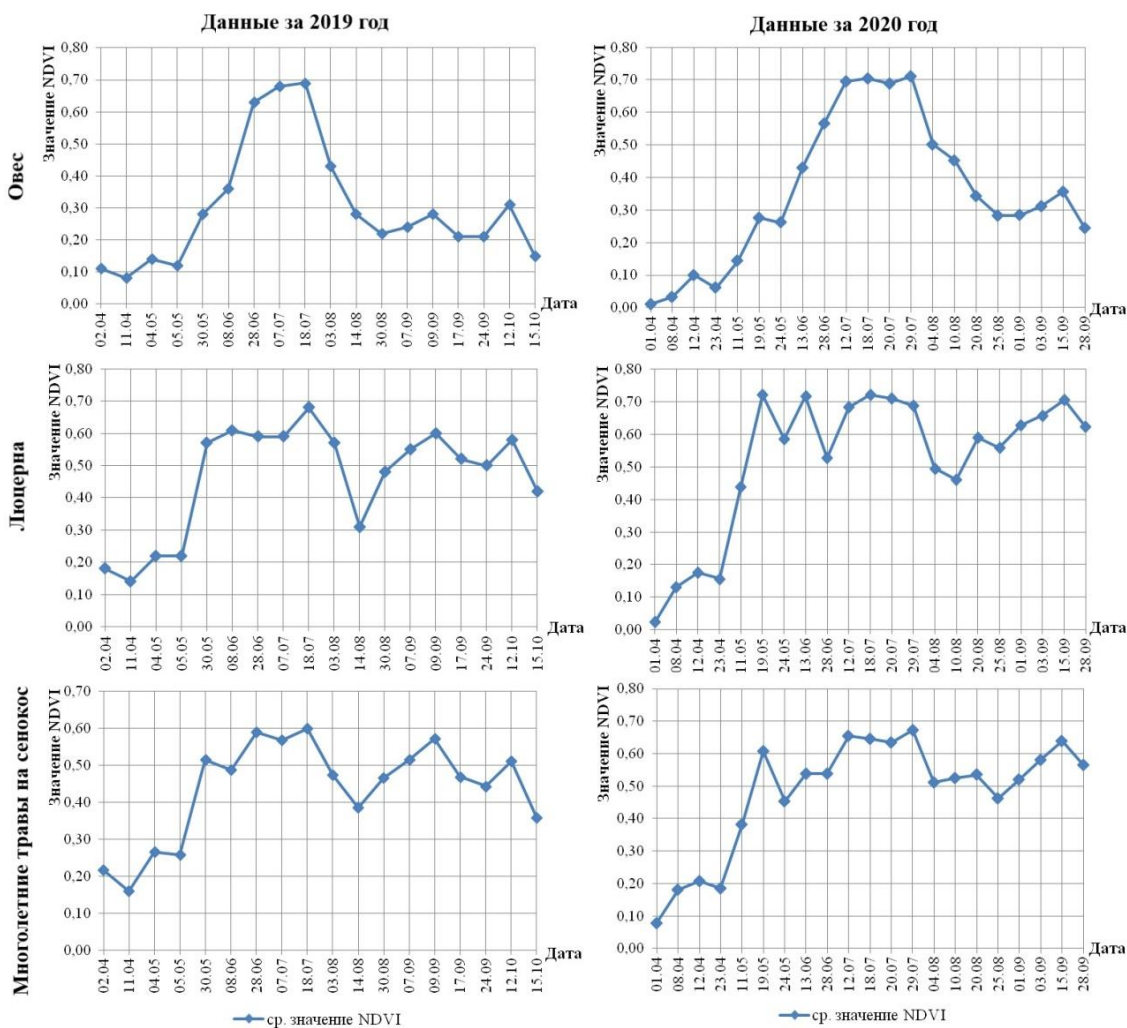


Рисунок. Сезонное изменение средних значений индекса NDVI сельскохозяйственных культур ОПХ «Курагинское»

Выводы. Результаты проведения мониторинга земель, можно использовать для выявления неоднородностей распределения культур, произрастающих на сельскохозяйственных угодьях. Это возможно, благодаря полученным по спутниковым снимкам PlanetScore высокого пространственного разрешения, значениям вегетационного индекса NDVI. Сильное отклонение от среднего значения индекса NDVI, может являться результатом неравномерного распределения культуры в границах угодья и являться основой для дальнейшего изучения конкретного угодья.

Дополнительно планируется провести анализ динамики спектральных индексов VARI и SIGreen по спутниковым данным PlanetScore на территорию ОПХ «Курагинское» за 2019-2020 года. Для наиболее точного и всестороннего исследования сельскохозяйственных угодий на территории хозяйства.

Список литературы

1. Земельный кодекс Российской Федерации: федер. закон от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 02.07.2021). URL: <https://docs.cntd.ru/document/744100004> (дата обращения: 14.07.2021).
2. Krapez, J.C., Oliosio, A., Coudert, B., 2009. Comparison of three methods based on the temperature-NDVI diagram for soil moisture characterization, in: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI, International Society for Optics and Photonics. 745 p. 74720Y.

3. Planet Team Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. Available online: <https://api.planet.com/> (accessed on 20.07.2021).

4. Терехин, Э. А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур / Э. А. Терехин // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 1. – С. 23. – DOI 10.7868/S0205961415010108.

5. Erunova, M. G. Smart analysis of agricultural land use with NDVI at Kuraginskoye agricultural experimental production facility / M. G. Erunova, A. S. Simakina, O. E. Yakubailik // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 32105. – DOI 10.1088/1755-1315/677/3/032105.

A. S. Kuznetsova, M. G. Erunova, O. E. Yakubailik

Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: anna.simakina.97@mail.ru

APPLICATION OF SATELLITE DATA OF HIGH SPATIAL RESOLUTION FOR MONITORING OF AGRICULTURAL AREAS

Application of remote sensing data for monitoring agricultural land. Monitoring in the process of decoding satellite data of high spatial resolution (3-5 m) PlanetScope, by calculating the vegetation index NDVI. This allows, simultaneously with studying the dynamics of the distribution of the NDVI index of cultivated crops, to monitor the corresponding agricultural land for the growing season. The obtained values of the NDVI index, given in the form of a graph, clearly demonstrate the phenological phases of the development of agricultural crops. The results of this work can be used to identify the heterogeneity of the distribution of crops on agricultural land.

Keywords: monitoring, satellite data PlanetScope, agricultural grounds, vegetation index NDVI.

**Е. В. Кузьмин¹, А. В. Сорокин²,
М. Ю. Реушев², В. Г. Подопригора^{1,3}**

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л. В. Киренского, Красноярск, Россия

e-mail: ekuzmin@sfu-kras.ru

ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ЛЕСНЫХ ПОКРОВОВ СИГНАЛАМИ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ L1-ДИАПАЗОНА

Проведена серия регистраций амплитудно-временных зависимостей интерференционного поля, порождаемого сигналами навигационных спутников над участком лесного массива. Использована антенна с правой круговой поляризацией и горизонтально ориентированной осью диаграммы направленности. Рассмотрен вариант формирования структуры амплитудно-временных зависимостей в результате поверхностного и объемного рассеяния от границ раздела лесного полога и подстилающей поверхности. Представлены экспериментальные данные и результаты их цифровой фильтрации.

Ключевые слова: ГНСС-рефлектометрия, цифровая фильтрация, рассеяние, амплитудно-временные зависимости, лесной полог, многослойная структура.

Введение. Направление использования сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) L1-диапазона для мониторинга различных земных покровов давно освоено, в настоящее время весьма перспективно и продолжает развиваться [1]. Данные системы обеспечивают «покрытие» поверхности практически всей Земли сигналами навигационных спутников (НС). Взаимодействие сигналов НС с земными покровами приводит к изменению их параметров. Это дает возможность восстанавливать электрофизические характеристики земных покровов. В данной работе рассматривается регистрация амплитудно-временных зависимостей (АВЗ), сформированных при суперпозиции прямых и рассеянно-отраженных лесным пологом сигналов ГЛОНАСС и GPS. Демонстрируются Фурье-спектры АВЗ. Проводится цифровая фильтрация АВЗ, обеспечивающая существенное ослабление шумовой компоненты. Обсуждаются особенности интерференционного поля сигналов НС над лесом.

Формирование интерференционного поля и регистрация АВЗ над лесом. Серия измерений АВЗ сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS в L1-диапазоне (1,5–1,6 ГГц) проведена над лесопосадками сосны возраста порядка 72 лет, расположенными вблизи здания ФИЦ КНЦ СО РАН (Здание). Измерения осуществлялись по традиционной схеме [1]. Штатная антенна с правой круговой поляризацией размещалась внутри Здания. Высота её поднятия над поверхностью почвы составляла 37 метров. Ось диаграммы направленности ориентировалась горизонтально в сторону протяженного массива леса высотой 25 метров.

В точке расположения антенны формируется интерференционное поле в результате сложения прямой и многих отраженных и рассеянных волн границами раздела слоев крон и стволов лесного полога, включая подстилающую поверхность почвы. Верхняя граница древостоя «воздух– слой крон» и граница между слоями крон и стволов имеют некоторую протяженность по вертикали и являются шероховатыми. Мощности многократно переизлученных сигналов НС (многолучёвость) внутри лесного полога существенно уменьшаются, появляются фазовые сдвиги [2]. Угловые координаты НС и расположение антенны позволяют однозначно определять координаты «сканирующего объема» в лесном массиве. Регистрация АВЗ (в отн. ед.) интерференционного поля позволяет получать данные для восстановления электрофизических характеристиках древостоя и рельефа почвы в окрестности расположения антенны [1].

Ослабление сигналов НС в слоистой структуре древостоя определяется коэффициентами отражения от границ раздела слоев крон и стволов, поверхности почвы. Коэффициенты Френеля [3] границ слоёв зависят от эффективной диэлектрической проницаемости слоёв, среднеквадратических отклонений поверхностных неровностей границ, длины волны, углов падения, а также вертикальной протяженности слоев. Диэлектрические проницаемости в L-диапазоне равны: $\epsilon_1 = 1$ (для воздуха), $\epsilon_2 = 1.002 - i 0.0002$ (для леса), $\epsilon_3 = 2.79 - i 0.16$ (для почвы с лесным опадом).

В случае наклонного зондирования наблюдаемая на входе приёмника аддитивная смесь образуется хаотически рассеянными отдельными сигналами с разными фазами и амплитудами. Амплитуды отраженных и рассеянных сигналов претерпевают квазипериодические изменения, связанные с интерференцией в слоистой лесной структуре.

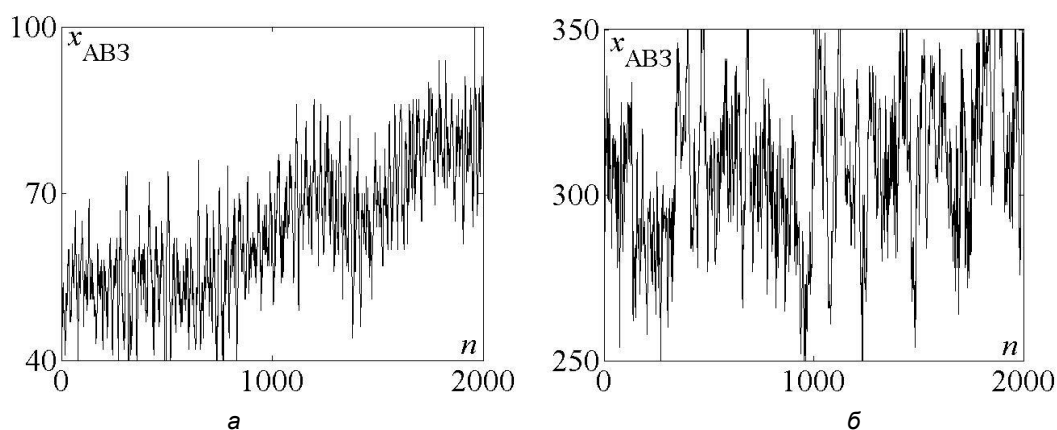


Рис. 1. Экспериментальные АВЗ: а) ГЛОНАСС; б) GPS.
По осям ординат – отн. ед., по осям абсцисс – номера временных отсчётов

Результаты и обсуждение. На рис. 1, а и 1, б представлены экспериментальные АВЗ, полученные с шагом 1 с (частота дискретизации 1 Гц). Результаты цифровой фильтрации АВЗ, проведённой аналогично [4], представлены на рис. 2, а и 2, б. Для выявления дополнительных особенностей АВЗ проведён их спектральный анализ (аналогично работе [5]). На рис. 3, а и 3, б представлены нормированные к своим максимальным значениям амплитудные Фурье-спектры $X_{\text{норм}}$ экспериментальных

АВЗ, показанных на рис. 1. Представленные рисунки демонстрируют особенности Фурье-спектров АВЗ зарегистрированных над лесом. Особенности связаны с положением «сканирующего объема» в лесном массиве, локальными структурами древостоя и рельефом почвы.

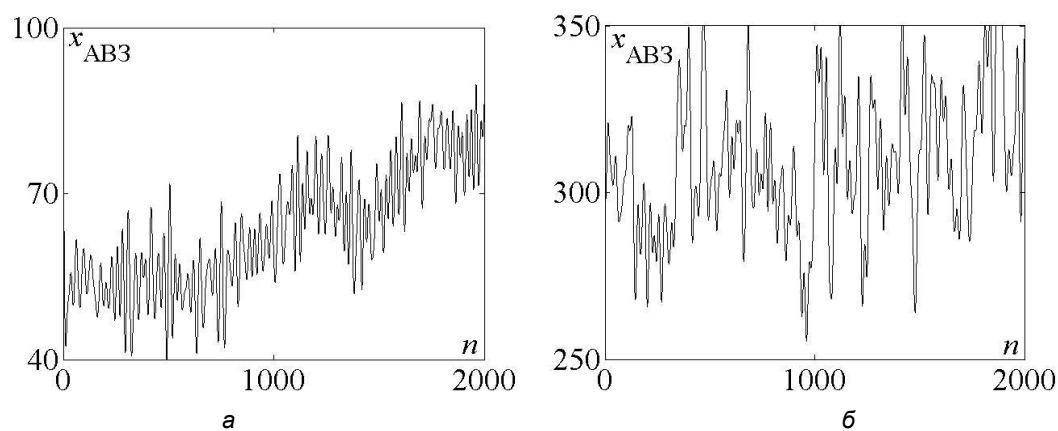


Рис. 2. Отфильтрованные АВЗ: а) ГЛОНАСС; б) GPS.
По осям ординат – отн. ед., по осям абсцисс – номера временных отсчетов

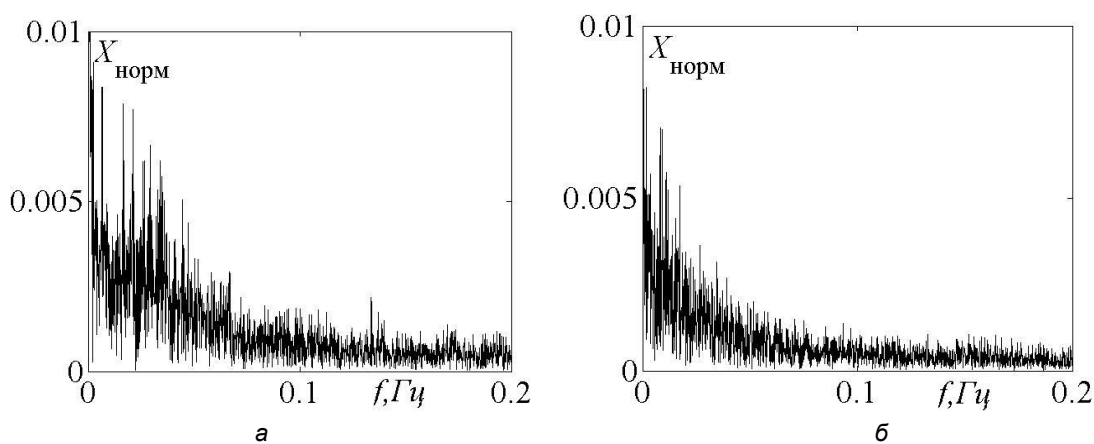


Рис. 3. Нормированные амплитудные Фурье-спектры экспериментальных АВЗ: а) ГЛОНАСС; б) GPS

Выводы. Принципиальная возможность метода рефлектометрии в мониторинге интегрального состояния лесных покровов обусловлена структурой древостоя, его таксационными характеристиками и рельефом почвы. Использование цифровой фильтрации АВЗ позволяет существенно ослабить шумовую составляющую АВЗ, что является полезным для обработки экспериментальных данных в мониторинге состояния леса и других поверхностей.

Список литературы

1. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing. Dordrecht, Heidelberg, New York, London. Springer. 2014. 286 p.
2. Кашкин В.Б., Кокорин В.И., Миронов В.Л., Сизасов С.В. Экспериментальное определение электрофизических параметров лесного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 7. С. 825–830.
3. Lerondel G., Romestain R. Applied Phys. Letters. V.74. №19. 1999. p. 2740–2742.
4. Кузьмин Е.В., Сорокин А.В. Цифровая фильтрация результатов ГНСС-рефлектометрии // Цифровая обработка сигналов. 2021. №1. С. 51–54.

5. Кузьмин Е.В., Сорокин А.В. Фурье-спектры амплитудных вариаций суперпозиции сигналов навигационных спутников вблизи поверхностей с различными свойствами // Письма в журнал технической физики. 2021. Т. 47. №18. С. 26–28. DOI: 10.21883/PJTF.2021.18.51468.18818

E. V. Kuzmin¹, A. V. Sorokin², M. Y. Reushev², V. G. Podoprigora^{1,2}

¹ Siberian Federal University,

² Federal Research Center KSC SB RAS, Kirensky Institute of Physics
Krasnoyarsk, Russian Federation

e-mail: ekuzmin@sfu-kras.ru

DIGITAL FILTERING OF REFLECTOMETRY FOREST COVER DATA BY SIGNALS OF L1-RANGE NAVIGATION SATELLITES

A series of registrations of the amplitude-time dependences of the interference field generated by the signals of navigation satellites over a forest area was carried out. An antenna with right-hand circular polarization and a horizontally oriented directional pattern axis was used. A variant of the formation of the structure of amplitude-time dependences as a result of surface and volume scattering from the boundaries of the forest canopy and the underlying surface is considered. Experimental data and the results of their digital filtering are presented.

Keywords: GNSS reflectometry, digital filtering, scattering, amplitude-time dependences, forest canopy, multilayer structure.

Ю. А. Лескова¹, К. В. Музалевский², З. Ружичка²¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение

ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru, leskovajulia.jl@gmail.com

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ЛЕНЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СПУТНИКА SENTINEL-1

В данной работе исследуются возможности дистанционного зондирования толщины льда пресноводных озёр на основе данных спутника Sentinel-1. В качестве тестового участка выбран о. Курунгнах, расположенный в дельте реки Лена, на котором было отобрано 10 озёр, промерзающих и не промерзающих до дна. По данным тестовым озёрам проанализированы временные ряды коэффициента обратного радарного рассеяния (КОР), измеренного Sentinel-1 на горизонтально-горизонтальной поляризации при угле 18-20° с сентября 2015 по июнь 2017 гг. в сверхширокозахватном режиме съемки (EW). Толщина льда озёр оценивалась на основе модели Лебедева и температуры воздуха по данным Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF ERA5). Показано, что со среднеквадратическим отклонением 13,5-25,3 см и коэффициентом детерминации 0,70-0,79 зависимость КОР от толщин льда (120-140 см) описывается линейной зависимостью. Проведенные исследования показывают перспективность применения радарных данных Sentinel-1 для дистанционного зондирования толщины льда пресноводных арктических озёр.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиолокация, Sentinel-1, арктические озёра, коэффициент обратного рассеяния, толщина льда.

Введение. В настоящее время радарные данные спутника Sentinel-1 не используются для дистанционного зондирования толщины льда пресноводных озёр. Вместе с тем, толщина ледового озёрного покрова является чувствительным индикатором, отражающим состояние климатической системы, и основной климатической переменной, рекомендованной Всемирной метеорологической организацией для глобального наблюдения за климатом [1]. В данной работе исследуются возможности дистанционного зондирования толщины льда группы пресноводных озёр, расположенных на о. Курунгнах (дельта р. Лена) на основе радарных данных спутника Sentinel-1 (частота 5,4 ГГц и длина волны 5,6 см). Коэффициент обратного радарного рассеяния (КОР) для тестовых озёр был измерен спутником Sentinel-1 на НН-поляризации (горизонтально-горизонтальная) под углом 18-20° с сентября 2015 по июнь 2017 гг. в сверхширокозахватном режиме съемки (EW).

Модель роста толщины льда. В связи с тем, что толщина льда h во время радарной съемки не измерялась, для её оценки была использована эмпирическая модель Лебедева [2], по которой $h=1,33(\sum T_a)^{0,58}$ [см], где $\sum |T_a|$ сумма модулей среднесуточных отрицательных температур воздуха (в градусах Цельсия). Для расчета T_a использовалась температура воздуха (высота 2 м) на основе данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF ERA5, пространственное разрешение 0,25°) [3]. В качестве примера, на рис. 1 приведены расчеты толщины озёрного льда

в районе южной части о. Курунгнах (72,2987 С.Ш., 126,1785 В.Д) на основе модели Лебедева по данным ECMWF для сезона 2016-2017 гг. Отметим при этом, что сильная корреляция (коэффициент детерминации $R^2=0,979$) и малая погрешность (среднеквадратическое отклонение $RMSE=2,15^\circ\text{C}$) между температурой воздуха, рассчитанной на основе данных ECMWF и измеренной метеостанцией о. Столб [4], расположенной в нескольких километрах восточнее о. Курунгнах (см. рис. 2), позволяет использовать данные ECMWF для оценки температуры воздуха арктических районов, где данные метеостанций не доступны.

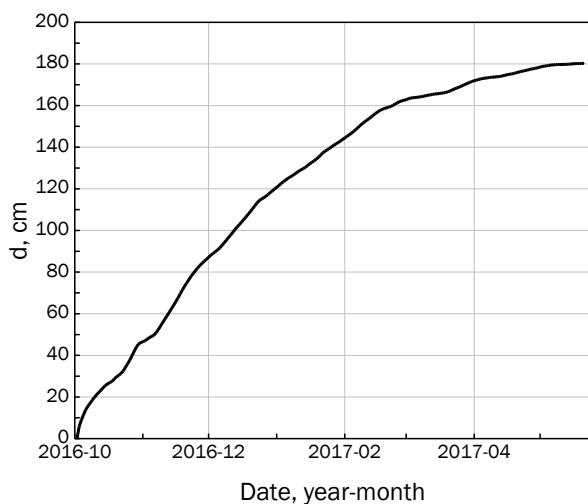


Рис. 1. Толщина льда, рассчитанная по модели Лебедева, в районе южной части о. Курунгнах (2016–2017 гг.)

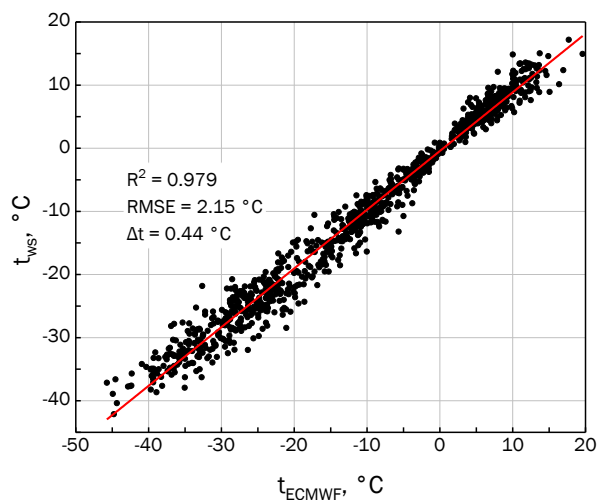


Рис. 2. Зависимость усредненных за сутки температур воздуха по данным метеостанции о. Столб (T_{ws}) и ECMWF ERA5 (T_{ECMWF})

Методика оценки толщины льда. Зависимость КОР, измеренного Sentinel-1 для группы мелких озёр (глубиной 1,05-1,8 м [5, см. табл. 2]), от толщины льда, рассчитанной на основе модели Лебедева (см. рис. 1) представлена на рис. 3. Из рис. 3 видно, что уменьшение значений КОР (происходящее вследствие касания льда дна озёр) хорошо согласуется с глубиной озёр d_i , промерзающих до дна, по данным работы [5, см. табл. 2]. Из данных, приведённых на рис. 4, следует, что толщина льда промерзающих до дна озёр, определённая на основе данных Sentinel-1 и модели Лебедева (в момент касания льда дна озёр) с $RMSE=7,4$ см и $R^2=0,934$ согласуется с данными наземных измерений о глубине озёр по данным работы [5, см. табл. 2]. В результате показано, что модель Лебедева может быть использована для прогноза толщины озёрного льда с погрешностью не лучше, чем 7,4 см.

В случае озёр, не промерзающих до дна, наблюдается линейная зависимость между толщиной льда (оценённой на основе модели Лебедева) и КОР, измеренного Sentinel-1 на НН-поляризации (см. рис. 5). Для двух сезонов 2015-2016 гг. и 2016-2017 гг. $RMSE$ в прогнозировании толщины льда на пресноводных озёрах (см. работу [5, табл. 2]) на основе КОР, измеренного Sentinel-1, варьировалась от 13,5 до 25,3 см. При этом R^2 варьировался от 0,700 до 0,785.

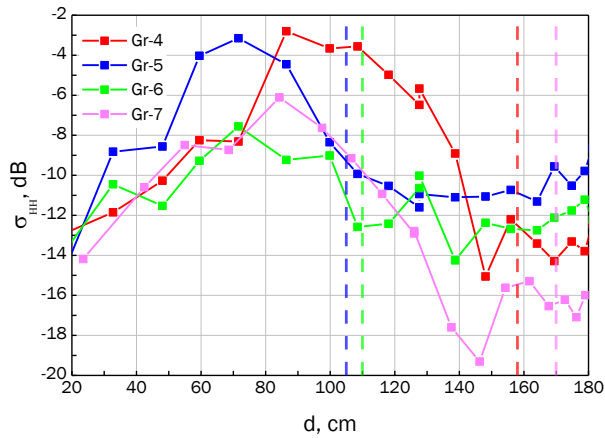


Рис. 3. Зависимость КОР от толщины льда (см. рис. 1). Вертикальными пунктирными линиями отмечены глубины соответствующих озёр (выделены цветом) по данным работы [5, см. табл. 2]. Обозначения озёр соответствуют работе [5, см. табл. 2]

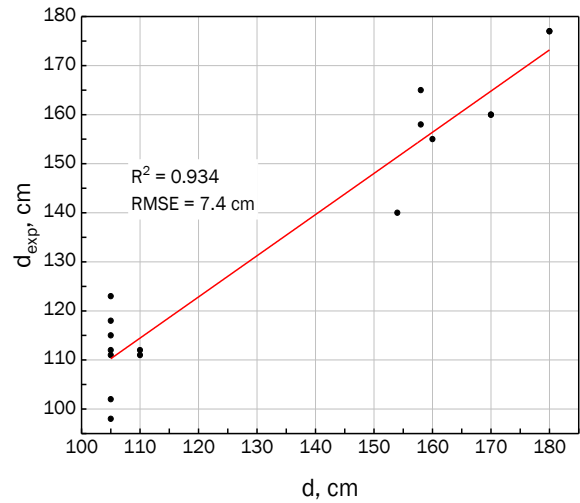


Рис. 4. Зависимость толщины льда d_{exp} озёр, промерзающих до дна, оценённых по данным Sentinel-1 и модели Лебедева от глубины озёр по данным работы [5, см. табл. 2]

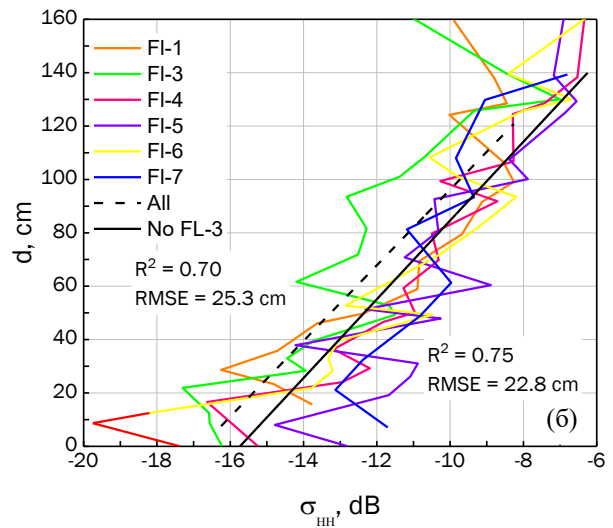
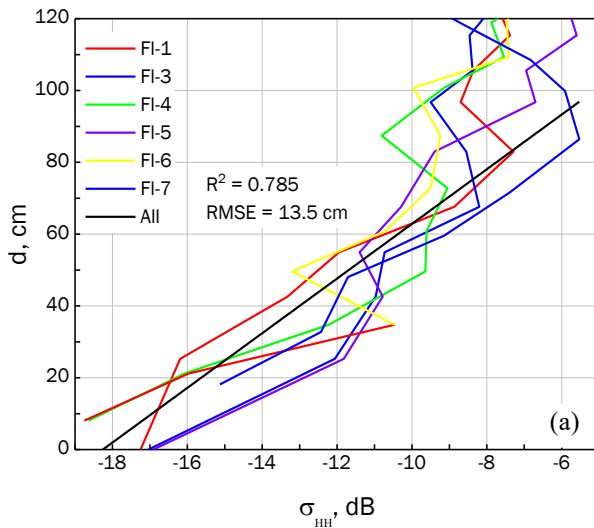


Рис. 5. Зависимость толщины льда, рассчитанной на основе модели Лебедева, от КОР, измеренного Sentinel-1 на НН поляризации в сезон а) 2015-2016 гг. и б) 2016-2017 гг.

Заключение. Радарные данные Sentinel-1 позволяют идентифицировать озёра, промерзающие и не промерзающие до дна, в дельте реки Лена на о. Курунгнах. В результате, на основе радарных данных Sentinel-1 может быть предложена дистанционная технология оценки рыбных ресурсов арктических озёр, доступности незамерзшей воды для промышленных нужд и мониторинга климатических изменений в арктической зоне. Показано, что озёрный лёд, толщиной до 120-140 см, может быть определен на основе данных Sentinel-1 с погрешностью 13,5-25,3 см.

Список литературы

1. The Global Observing System for Climate: Implementation Needs, GCOS-200; GCOS 2016 Implementation Plan. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2016, 315 p.

2. Лебедев В. В. Рост льда в антарктических реках и морях в зависимости от отрицательных температур воздуха. Проблемы Арктики. 1938. Т.5-6. С.9-25.
3. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. URL: <https://www.ecmwf.int/>.
4. Архив погоды с метеостанции на о. Столб. URL: https://rp5.lv/Архив_погоды_на_о._Столб
5. Antonova S., Duguay C. R., Kaab A., Heim B., Langer M., Westermann S., Boike J. Monitoring Bedfast Ice and Ice Phenology in Lakes of the Lena River Delta Using TerraSAR-X Backscatter and Coherence Time Series. Remote Sens. 2016, 8, 903. P. 6.

J. A. Leskova¹, K. V. Muzalevskiy², Z. Ruzicka²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

² Kirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk, Russian Federation

e-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru, leskovajulia.jl@gmail.com

MEASURING THE ICE THICKNESS OF ARCTIC LAKES IN THE LENA RIVER DELTA USING SENTINEL-1 OBSERVATIONS

In this paper the possibilities of remote sensing of freshwater lakes ice thickness were investigated based on Sentinel-1 observations. As a test site, the Kurungnakh Island, located in the Lena River delta, was used. On the Island ten test lakes were selected. For these test lakes, the time series of backscattering coefficients (BC), measured from September 2015 to June 2017 by Sentinel-1 (EW) at horizontal-horizontal polarization and at an angle of 18-20° were analyzed. The thickness of lakes ice was estimated based on the Lebedev model and air temperature according to the data of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF ERA5). As a result, was shown, the dependence between BC and ice thickness (120-140 cm) is described by a linear law with a standard deviation of 13.5-25.3 cm and a determination coefficient of 0.70-0.79. The promise of using Sentinel-1 radar data for remote sensing of freshwater arctic lakes ice thickness was shown in studies carried out.

Keywords: Remote sensing, radiolocation, Sentinel-1, Arctic lakes, backscattering coefficient, ice thickness.

А. В. Мальканова^{1,2}, А. Н.Забродин^{1,2}, Е. И. Пономарев^{2,3}

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: malkanova@ksc.krasn.ru

ПРОГНОЗ ПОЖАРНЫХ РЕЖИМОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ ПРОЛОНГИРОВАННЫХ ХРОНОЛОГИЙ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Предложена методика прогноза пожарных режимов на основе пролонгированных хронологий по материалам современных и ретроспективных спутниковых данных из открытых источников. Рассмотрена динамика пожаров на территории Восточной Сибири (территория бассейн р. Лена в среднем течении). Показана зависимость горимости лесов локальных территорий Восточной Сибири от уровня тепло- и влагообеспеченности. Выявлен диапазон показателя горимости (числа и площадей пожаров) для территории исследования в условиях экстремальной засухи, подтвержденный ретроспективными данными. Показано, что потенциально среднегодовые значения количества пожаров могут в 2.5 раза превышать современную статистику.

Ключевые слова: Сибирь, спутниковые данные, лесной пожар, Landsat, гидротермический коэффициент.

Введение. Лесные пожары – проблема, актуальная во всем мире. Спутниковый мониторинг позволяет оценить масштабы пожарных процессов в лесах России [1–3], что имеет важное значение для прогнозирования пожарных режимов в отдельных субрегионах в изменяющихся климатических условиях [4–6]. В целях повышения достоверности таких прогнозов ряды доступных инструментальных данных о пожарах необходимо расширять, используя доступную ретроспективную спутниковую съемку (Рис. 1) [7].

Эпизодические данные о пожарах в Сибири можно найти в материалах спутников Метеор, полученных в 1980-ых годах (рис. 1а). Проводя предварительный анализ таких эпизодических данных, мы сформулировали гипотезу о том, что для адекватного представления о динамике горимости и возможных сценариях изменения пожарных режимов в ближайшей перспективе необходимо оперировать пролонгированными сведениями о пожарах, расширяя ряд достоверных инструментальных спутниковых наблюдений.

Материалы съемки за 80-е года прошлого века на отдельные субрегионы Сибири частично доступны по данным Landsat 4-5 (рис. 1б).

Цель работы — анализ долгосрочной хронологии пожаров на примере территории Восточной Сибири (средняя часть бассейна р. Лена) и технология прогноза пожарных режимов локальных территорий.

Исходные данные и методы обработки. В работе анализировались данные о послепожарных участках, зафиксированных на территории Восточной Сибири (бас-

сейн р. Лена, 58 – 61°с.ш., 118–122°в.д.) за период 1986 – 2015 гг. по материалам USGS [8] спутников Landsat 1–8 MSS/TM (Multispectral Scanner Sensor/Thematic Mapper) (Рис.2). С учетом всех доступных кадров, процент покрытия района интересов составляет не ниже 65%.

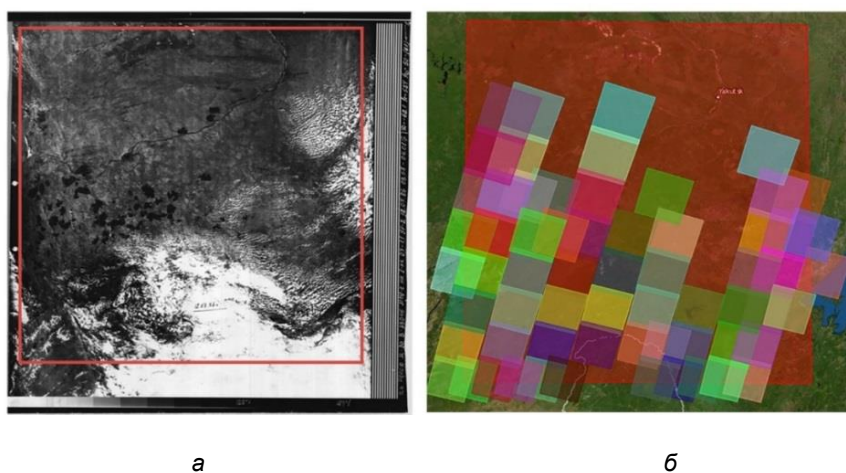


Рис. 1. Район исследований – территория бассейн р. Лена в среднем течении: а – снимок спутника Метеор, СССР, 1986; б – доступные сцены съемки спутника Landsat 4-5 TM, USA, 1986. Красным квадратом выделена граница территории исследования

Исследовались группы снимков, полученных со спутников Landsat 1–8 MSS C1, за четыре периода: 1986 г., 1995 г., 2008 г., 2015 г. в комбинации красного (610–760 нм), зеленого (540–570 нм) и синего (480–510 нм) каналов. Размер пикселя – 30 м. Выборка составила 12 снимков (3 снимка для каждого года); общая площадь рассматриваемого района исследований 81,53 тыс. км². На Рис. 2 представлен пример распределения вегетационного индекса NDVI (Normalized difference vegetation index) для 1986 г. (б). Для расчёта данного индекса использовалась стандартная методика на основе каналов №3 (630–690 нм) и 4 (760–900 мкм) Landsat 1–7 (4 и 5 каналы для Landsat 8) [9].

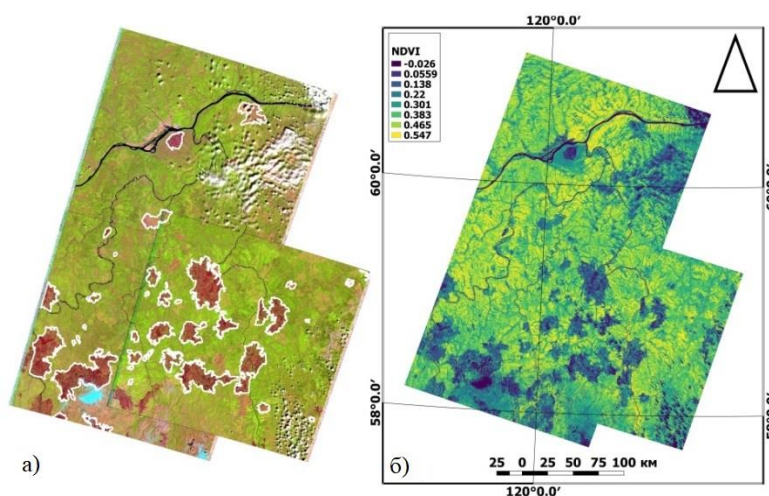


Рис. 2. Район исследования: средняя часть бассейна р. Лена (Восточная Сибирь). Съемка Landsat 1-5 MSS C1 за 1986 г.: 1) Выделенные послепожарные участки, 2) NDVI

С помощью программного пакета QGIS (Quantum Geographic Information System, версия 3.16.3) была произведена классификация с обучением (модуль в QGIS dzetsaka: Classification tool) серии снимков [10]. После проведенной классификации были рассчитаны площади пожарных полигонов и показатель горимости, как отношение годовой площади пожаров к площади лесов рассматриваемой территории [11]. Обработка проводилась в проекции EPSG: 32651 – WGS 84 / UTM zone 51N.

Для оценки зависимости горимости лесов района исследований от уровня тепло и влагообеспеченности территории вычисляли гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) [12]:

$$\text{ГТК} = (R * 10) / \sum t,$$

где R – сумма осадков в миллиметрах за период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$ $\sum t$ – сумма температур, $^{\circ}\text{C}$; 10 – нормировочный коэффициент.

Результаты и обсуждение. Зафиксирован уровень экстремальной горимости рассматриваемого субрегиона в пожароопасный сезон 1986 г. (6,96% общей площади региона). Этот показатель значительно (в 10 и более раз) превышает среднегодовое значение горимости за последние 25 лет, который был определен по материалам инструментального спутникового мониторинга пожаров, проводимого в Сибири с 1995 г. (Табл.) [1].

Таблица

Характеристики исследуемых областей

Год	Число пожаров	Площадь пожаров, км ²	Горимость, %	ГТК	NDVI	
					диапазон	среднее
1986	66	5680.96	6.96	0.36	0.03 ... 0.55	0.37
1995	20	156.76	0.19	1.09	0.10 ... 0.63	0.35
2008	40	706.86	0.87	1.15	0.00 ... 0.71	0.53
2015	17	134.82	0.17	0.74	0.01 ... 1.00	0.31
Среднее без 1986 г.*	26±13	332.81±366.77	0.41±0.45	0.99±0.25		0.40 ± 0.10

* Данные экстремальной горимости пожароопасного сезона 1986 г. не включены, так как имеют существенное превышение относительно последующих.

Пролонгация пожарной хронологии на 10 лет позволила выявить горимости района интересов в условиях экстремального пожароопасного сезона 1986 г. По сравнению с последующим периодом в такой сезон число пожаров в 2.5 раза выше, а общая площадь пожарных повреждений составила до 7 %. Это позволяет сделать предположение о возможности реализации экстремальных пожарных сезонов (с уровнем горимости на 6.5% выше среднегодового) в регионе в будущем, особенно с учетом меняющегося климата и повышения уровня засушливости вегетационного периода (по косвенным данным ГТК [4]).

Заключение. Для исследуемого региона показана возможность продления пожарных хронологий на основе ретроспективных спутниковых данных. Показано, что в условиях экстремального пожароопасного сезона (по материалам ретроспективных данных за 1986 г.) по сравнению с последующим периодом число очагов пожаров может существенно возрасти, увеличивая горимость лесов на порядок величины

(>6.96% при среднемноголетнем – 0.41%). Высокая горимость коррелирует с гидро-термическим коэффициентом увлажнения Селянинова (ГТК), который в условиях экстремальной засухи 1986 г. был равен 0.36 при среднемноголетнем оптимуме для региона $\sim 0.99 \pm 0.25$.

Работа выполнена по темам госзадания № 0287-2021-0040 и № 0287-2021-0008.

Список литературы

1. Пономарев Е.И., Харук В.И., Швецов Е.Г. Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы : монография // Красноярск : СФУ. 2019. 220 с.
2. Барталева С.А., Стыщенко Ф.В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122.
3. Сухинин А.И. Система космического мониторинга лесных пожаров в Красноярском крае // Сибир. экологич. журн. 1996. Т. 3. № 1. С. 85–91.
4. Пономарев Е.И., Скоробогатова А.С., Пономарева Т.В. Горимость лесов Сибири и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности // Метеорология и гидрология. 2018. №7. С. 45–55
5. Харук В.И., Пономарёв Е.И. Пространственно–временная горимость лиственничников Центральной Сибири // Экология. 2017. № 6. С. 413–419.
6. Min Hao W., Nordgren B.L., Petkov A., Corley R.E., Urbanski S.P., Reeves M.C., Scott Baggett L., Balkanski Y., Ciais P., Mouillot F., Yue C. Wetter environment and increased grazing reduced the area burned in northern Eurasia from 2002 to 2016 // Biogeosciences. 2021. V.18. №8. P. 2559–2572
7. Hayasaka H., Yamazaki K., Naito D. Weather conditions and warm air masses during active fire-periods in boreal forests // Polar Science. V.22. 2019. ISSN 1873-9652. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.07.002>.
8. USGS [Электронный ресурс]: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
9. Черепанов, А. С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
10. Dzetsaka: Classification tool [Электронный ресурс]: <https://github.com/nkarasiak/dzetsaka/>
11. Усеня В. В., Каткова Е. Н., Ульдинови С. В. Лесная пирология : учебное пособие для студентов высших учебных заведений по специальности «Лесное хозяйство» // Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. Институт леса НАН Беларуси. Гомель. 2011. 264 с.
12. Селянинов Г.Т. Происхождение и динамика засух. – Гидрометиздат. Л. 1958.

A. V. Malkanova^{1,2}, A. N. Zabrodin^{1,2}, E. I. Ponomarev^{2,3}

¹ Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences", Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ V. N. Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of RAS, Russia

FIRE REGIMES FORECASTING IN EASTERN SIBERIA USING EXTENDED CHRONOLOGY OF SATELLITE DATA

A method for monitoring the dynamics of fire regimes is proposed based on extended chronologies using modern and retrospective satellite data from open sources. The dynamics of forest burning in Eastern Siberia (the territory of the Lena River basin in the middle flow) is reviewed. The dependency of fire frequency and burned area from the level of heat and moisture supply is shown for local territories of Eastern Siberia. The possible range of forest burning (number and area of fires) was evaluated for the study area in extreme drought conditions, confirmed by historical data. It is shown that potentially the average annual values of the number of fires can be 2.5 times higher than the current statistics.

Keywords: Siberia, remote sensing, satellite data, forest fire, Landsat, hydrothermal coefficient, HTC.

Н. Г. Марков¹, К. А. Маслов¹, И. А. Керчев², О. С. Токарева¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Томск, Россия

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

МОДЕЛИ ПОЛНОСВЕРТОЧНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ПОВРЕЖДЕННЫХ ДЕРЕВЬЕВ ПИХТЫ СИБИРСКОЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Предложены и реализованы три модели полносверточных сетей, основанные на архитектурах U-Net, SegNet и ENet. С их помощью решена задача семантической сегментации изображений с беспилотных летательных аппаратов пихтовых деревьев, поврежденных уссурийским полиграфом. Показано, что среди этих моделей лучшее качество сегментации дает модель на основе архитектуры U-Net, позволяющая успешно классифицировать пиксели классов «фон», «живые», «свежий сухостой» и «старый сухостой».

Ключевые слова: уссурийский полиграф, пихта сибирская, беспилотный летательный аппарат, семантическая сегментация изображений, полносверточная сеть, U-Net, SegNet, ENet.

Введение. Сегодня беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно применяются при мониторинге состояния лесного покрова и его картографировании [1, 2] благодаря ряду преимуществ перед космическими аппаратами: мобильность, условно низкая зависимость от погодных условий и высокое пространственное разрешение изображений, получаемых с помощью установленных на БПЛА фото или видеокамер. Особый интерес представляет задача автоматизированного дешифрирования данных съемки с БПЛА для оценки состояния древостоев, пораженных насекомыми-вредителями [3, 4].

В данной работе предложен и исследуется ряд моделей сверточных нейронных сетей (СНС), относящихся к подклассу полносверточных сетей. Модели используются при решении задачи семантической сегментации деревьев пихты сибирской (*Abies sibirica*), поврежденных уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandf.), на изображениях с БПЛА.

Предложенные и реализованные модели полносверточных сетей. Для решения задачи сегментации деревьев пихты разработаны три новые модели СНС, каждая из которых основана на одной из известных архитектур полносверточных сетей: U-Net [5], SegNet [6] и спроектированной для осуществления сегментации в реальном времени сети ENet [7]. При этом в базовые модели СНС вносились следующие изменения. В реализованной в данной работе модели на основе U-Net была применена функция активации ELU, в исходной архитектуре U-Net были изменены размеры входных и выходных тензоров и добавлены слои пакетной нормализации,

а слои свертки не изменяли ширину и высоту карт признаков. Аналогичные модификации были реализованы и в базовой СНС SegNet, более того, реализованная модель SegNet имеет меньшую глубину, чем базовая модель. В реализованной модели СНС на основе сети ENet изменялись только размеры входных и выходных тензоров.

Обучение реализованных моделей сетей. При обучении и исследовании разработанных моделей СНС использовались данные съемки пихтарников, пораженных уссурийским полиграфом, полученные с помощью БПЛА DJI Phantom 3 Standard. Более подробное описание исходных данных и результаты их разведочного анализа приведены в нашей работе [4]. Для формирования обучающей и валидационной выборок исходные изображения пихтарников были нарезаны на фрагменты размером 256 на 256 пикселей со сдвигом в 128 пикселей. Всего было получено 2004 обучающих и 672 валидационных фрагментов изображений.

С целью улучшения обобщающей способности обучаемых моделей полносверточных сетей использовалась техника аугментации «на лету», позволяющая расширять обучающую выборку синтезированными примерами непосредственно во время обучения. Аугментация «на лету» включала случайные изменения масштаба изображений, их яркости, контраста, отражения по вертикальной оси, эластические преобразования.

Для подбора весовых коэффициентов моделей СНС максимизировалось значение коэффициента Жаккара (intersection over union, *IoU*) в мягкой формулировке с использованием алгоритма Adam. Оптимизация гиперпараметров каждой из моделей СНС, алгоритмов аугментации данных и обучения проводилась с использованием байесовского подхода на основе гауссовских процессов.

Эффективность реализованных моделей сетей. Для оценки эффективности реализованных моделей СНС и для их сравнения на одном из снимков с БПЛА было выбрано изображение тестового участка пихтарника, которое не использовалось при обучении СНС и при подборе гиперпараметров. На рисунке приведены эталонная карта сегментации и результаты сегментации изображения тестового участка с помощью каждой из реализованных моделей полносверточных сетей. В таблице показаны значения метрики *IoU* для различных классов состояния деревьев пихты для каждой модели СНС.

Анализ изображений на рисунке показывает, что все реализованные модели полносверточных сетей способны воспроизводить границы между деревьями и успешно классифицировать значительную часть пикселей. Основная доля ошибок классификации приходится на смежные в шкале описания состояний классы деревьев. Основную сложность для всех исследуемых моделей СНС представляет сегментация деревьев пихты класса «отмирающие».

Из таблицы видно, что все реализованные модели продемонстрировали высокое качество сегментации пикселей классов «фон», «живые», «свежий сухостой» и «старый сухостой» ($IoU > 0,5$). Удалось добиться значительного улучшения качества сегментации деревьев класса «отмирающие» ($IoU = 0,46$ против $IoU = 0,22$ в работе [4]). Лучшее качество сегментации позволяет получить модель СНС, основанная на архитектуре U-Net, при этом среднее значение *IoU* по всем классам деревьев для нее составило 0,69.

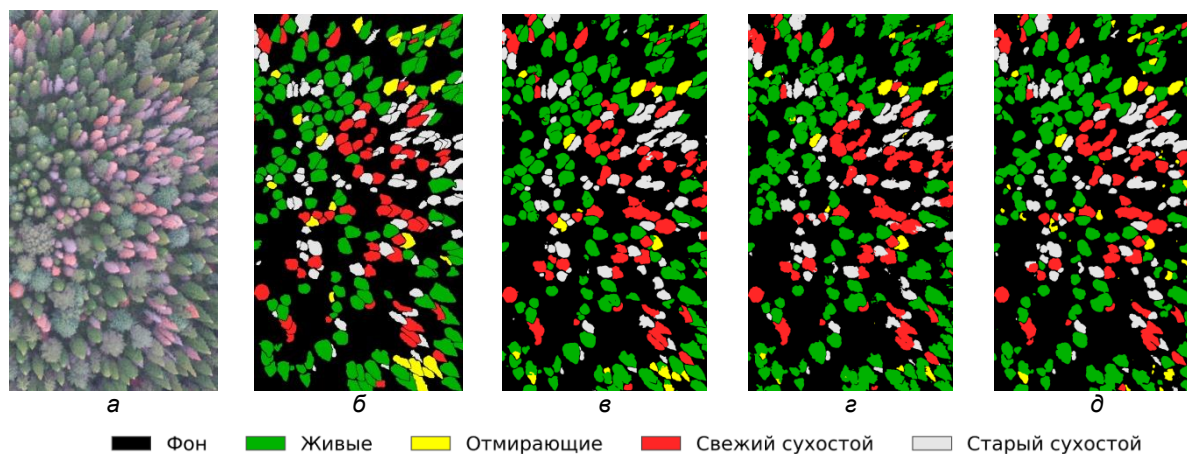


Рисунок. Результаты сегментации деревьев пихты на тестовом участке:
 а – изображение тестового участка, б – эталонная карта сегментации, результаты сегментации с применением модели: в – U-Net, г – SegNet, д – ENet

Таблица

Значения метрики IoU для различных моделей СНС и классов деревьев

Модель СНС	Класс деревьев				
	Фон	Живые	Отмирающие	Свежий сухостой	Старый сухостой
U-Net	0,86	0,76	0,46	0,76	0,63
SegNet	0,85	0,73	0,35	0,76	0,64
ENet	0,83	0,71	0,31	0,77	0,66

Заключение. Предложены и реализованы три модели полносверточных сетей для сегментации изображений пихтовых насаждений, поврежденных уссурийским полиграфом, полученных с БПЛА. Среди этих моделей лучшее качество сегментации позволила получить модель, основанная на архитектуре U-Net. Данная модель успешно классифицирует пиксели всех классов деревьев пихты, кроме класса «отмирающие». Ожидается, что привлечение большего объема исходных данных аэрофотосъемки пихтарников позволит еще улучшить качество сегментации для всех классов пораженных деревьев пихты.

Наземные мониторинговые наблюдения и съемка с БПЛА лесных массивов проводились в рамках НИОКТР № 121031300226-5 ИМКЭС СО РАН.

Список литературы

1. Санников П. Ю., Андреев Д. Н., Бузмаков С. А. Выявление и анализ сухостоя при помощи беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 103–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113.
2. Onishi M., Ise T. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 903. DOI: 10.1038/s41598-020-79653-9.
3. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Y., Herrera F. Detection of Fir Trees (*Abies sibirica*) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning // Remote sensing. 2019. V. 11. No. 6. 643. DOI: 10.3390/rs11060643.
4. Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев И. А., Токарева О. С. Сверточная нейронная сеть для сегментации пораженных деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли – 2020. Материалы VII Между-

народной научной конференции. Красноярск, 29 сентября – 2 октября 2020. Красноярск: СФУ. 2020. С. 102–105.

5. 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 13.07.2021).

6. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation // arXiv preprint arXiv:1511.00561. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1511.00561.pdf> (дата обращения 14.07.2021).

7. Paszke A., Chaurasia A., Kim S., Culurciello E. ENet: A Deep Neural Network Architecture for Real-Time Semantic Segmentation // arXiv preprint arXiv: 1606.02147. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1606.02147.pdf> (дата обращения 14.07.2021).

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

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

² Institute 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

FULLY CONVOLUTIONAL NETWORKS FOR SEMANTIC SEGMENTATION OF DAMAGED *ABIES SIBIRICA* TREES IN UAV IMAGERY

This study proposes three models of fully convolutional networks based on the U-Net, SegNet and ENet architectures. The models perform semantic segmentation of *Abies Sibirica* trees damaged by *Polygraphus Proximus* in unmanned aerial vehicle imagery. The study has shown that among these models, the best segmentation quality is provided by the U-Net-based model which successfully classifies pixels of the “background”, “living trees”, “recently dead trees” and “long dead trees” classes.

Keywords: Polygraphus Proximus, Abies Sibirica, unmanned aerial vehicle, semantic image segmentation, fully convolutional network, U-Net, SegNet, ENet.

А. П. Михеев¹, А. В. Пятаева²

¹ Аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Кандидат технических наук, Сибирский университет науки и технологий
имени М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: neyronbox@gmail.com, anna4u@list.ru

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ**

В работе представлен метод распознавания лиц, использующий выделение лицевых ориентиров, на основе которых исходное изображение масштабируется, вращается и центрируется путем применения аффинных преобразований из библиотеки OpenCV. Для распознавания лиц на наборе данных iBUG-300W обучена модель MMOD CNN. Экспериментальные исследования, проведенные на реальных данных с веб-камеры, обеспечивают среднюю точность распознавания личности около 94%. В качестве меры различия эталонного и исследуемого изображения выбрано евклидово расстояние. Полученная программная реализация разработанного алгоритма позволяет обеспечить прокторинг в электронных обучающих системах.

Ключевые слова: обнаружение лиц, распознавание лиц, MMOD CNN, лицевые ориентиры.

Последние достижения в области нейронных сетей значительно увеличили сферу применения систем распознавания личности по видеоданным или отдельным изображениям. В настоящее время такие системы могут обнаруживать признаки депрессии [1], спонтанные и произвольные тонкие реакции лица, для определения подлинных эмоций человека [2], личные страницы в социальных сетях [3], аномальное или агрессивное поведение людей [4]. Методы распознавания лиц применяются для выслеживания человека в толпе и обнаружения преступника с использованием дрона [5], противодействия академическому мошенничеству в обучающих системах [6] и др. Для распознавания личности по видеоданным с использованием технологий глубокого обучения применяются следующие архитектуры нейронных сетей: ProDpoly (DCNN) [7], DiscFace [8], CircleLoss [9].

Метод максимального перекрытия детектируемого объекта – MMOD [10] использует свёрточную нейронную сеть для извлечения функции из скользящего окна, что позволяет сократить затраты вычислительных ресурсов. Основой метода является поиск векторов с их последующей оценкой принадлежности к определенному классу путем вычисления скалярного произведения между ним и уже обученным вектором. Для этого используется собственная функция оценки скользящего окна размером 50 x 50 пикселей, где происходит пропуск неподходящих скользящих окон, имеющих оценку ниже установленной, что позволяет алгоритму идентификации лиц выполнять поиск не по всему изображению, а только по его части. В отличие от методов гистограммы направленных градиентов с линейным фильтром опорных векторов [11; 12] и Виолы-Джонса [13], MMOD позволяет обнаруживать и распознавать лица в различных положениях и при различных наклонах головы, что является несомненным достоинством этого метода.

Алгоритм распознавания лиц. Алгоритм распознавания личности по видеоданным использует метод встраивания, сопоставляя выделенные особенности лица с данными из базы известных пользователей. Первоначальном этапе работы алгоритма идентификации, является захват видеопотока. На каждом кадре выполняется поиск лица с наложением поверх выделенной области ограничивающей рамки, происходит обрезка остальной части кадра. Затем области, ограниченной рамкой производится поиск 68 точек, отображающих лицевые ориентиры [14]. По полученным лицевым ориентирам каждый снимок подвергается операциям вращения с вычислением для каждого пиксела значения (x_r, y_r) , масштабирования (x_s, y_s) , центрирования с вычислением (x_t, y_t) (рис. 1) при помощи аффинного преобразования реализованного в OpenCV [15]:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & D_x \\ 0 & 1 & D_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

где (x, y) значения координат исходного пиксела изображения, θ – угол поворота оси, D_x и D_y – координаты новой точки начала отсчета координат.



Рис 1. Выделение лицевых ориентиров и выравнивание лица

Далее производится кодировка лица: поиск векторного представления (встраивания) [16], размером 128 элементов. Модель встраиваний представляет собой глубокую свёрточную нейронную сеть, обученную с помощью функции потерь триплетов, которая побуждает векторы для одной и той же личности становиться более похожими (уменьшая расстояние), тогда как векторы для разных личностей становятся менее похожими (увеличивая расстояние).

Последним шагом алгоритма распознавания лица является сравнение характеристик исследуемого лица с данными лиц, находящихся в базе данных пользователей с помощью вычисления евклидова расстояния:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (hist1_i - hist2_i)^2},$$

где $hist1_i$ – столбец гистограммы исследуемого изображения лица с номером i , $hist2_i$ – столбец с номером i гистограммы изображения из базы эталонов лиц, n – количество столбцов гистограмм. Программная реализация разработанного алгоритма выполнена с использованием языка Python 3.7 [17] и библиотек OpenCV и Dlib [18].

Экспериментальные исследования. При проведении экспериментальных исследований в качестве обучающего набора данных использован дэйтасет iBUG-300W [19], включающий в себя 7676 снимков. Каждый снимок имеет маркированный

набор меток, в котором каждому пикселу с координатами (x, y) принадлежит определенный лицевой ориентир (брови, глаз, рот, нос и линия подбородка). Набор данных разделен на две части, 75% снимков использованы для обучения и 25% для проверки. Для тестирования разработанного алгоритма использован набор данных, полученный самостоятельно, на этих видеоданных присутствуют 46 различных персон, разрешение кадров 300×300 пикселей. Для оценки качества работы алгоритма идентификации пользователя по изображению лица каждый кадр при тестировании помечен с использованием следующих меток: истинно положительный (ИП); ложно положительный (ЛП); истинно отрицательный (ИО); ложно отрицательный (ЛО). Оценка эффективности работы алгоритма выполнена с помощью характеристики точность, A_c , рассчитанной с использованием меток кадров следующим образом:

$$A_c = \frac{ИП + ЛО}{ИП + ИО + ЛП + ЛО}.$$

Средняя точность идентификации пользователя при 2 встраиваниях составила 84,3%, при 7 встраиваниях 93,2%, при 12 встраиваниях 94,4%. При использовании 12 встраиваний скорость идентификации каждого человека составляла 5,7 секунд, что медленнее на 3,2 секунды, чем при использовании 7 встраиваний. Данные скорости работа алгоритма получены при характеристиках ПК: процессор Intel® Core™ i5-2500 3.3 GHZ, GPU NVIDIA GeForce GTX 680, память 16 ГБ, операционная система Ubuntu 18.04. Таким образом, наиболее подходящим количеством встраиваний является значение 7, так как точность идентификации увеличивается на 1%, а скорость обработки при этом существенно уменьшается. Разработанная программная реализация идентификации пользователя на базе вычисления лицевых ориентиров может быть интегрирована в систему электронных обучающих курсов для решения задачи прокторинга.

Список литературы

1. He L., Chan J.C.W., Wang Z. Automatic depression recognition using CNN with attention mechanism from videos // *Neurocomputing*. Elsevier, 2021. Т. 422. С. 165–175.
2. Zhao S. и др. A two-stage 3D CNN based learning method for spontaneous micro-expression recognition // *Neurocomputing*. Elsevier, 2021. Т. 448. С. 276–289.
3. Разработчик SearchFace о возможностях алгоритма / Хабр [Электронный ресурс] // URL: <https://habr.com/ru/post/440402/> (дата обращения: 14.07.2021).
4. Wang P., Wang P., Fan E. Violence detection and face recognition based on deep learning // *Pattern Recognit. Lett.* North-Holland, 2021. Т. 142. С. 20–24.
5. K.G. S. и др. Smart drone with real time face recognition // *Mater. Today Proc.* Elsevier, 2021.
6. Sharma N.K. и др. CNN Implementation for Detect Cheating in Online Exams During COVID-19 Pandemic : A CVRU Perspective // *Mater. Today Proc.* Elsevier, 2021.
7. Chrysos G. и др. Deep Polynomial Neural Networks // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* IEEE Computer Society, 2020.
8. Kim I. и др. DiscFace: Minimum Discrepancy Learning for Deep Face Recognition.
9. Sun Y. и др. Circle Loss: A Unified Perspective of Pair Similarity Optimization // *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* IEEE Computer Society, 2020. С. 6397–6406.
10. King D.E. Max-Margin Object Detection // *Comp. Vis. Pattern Recogn.* 2015. Т. 1.
11. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection // *2005 IEEE CSC on CV and PR(CVPR'05)*. 2005. Т. 1. С. 886–893 т. 1.
12. Géron A., Safari an O.M.C. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow, 2nd Edition. O'Reilly Media, Incorporated, 2019. 199 с.

13. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. 2001. Т. 1.
14. Kazemi V., Sullivan J. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees // Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. IEEE Computer Society, 2014. С. 1867–1874.
15. OpenCV: Affine Transformations [Электронный ресурс] // URL: https://docs.opencv.org/4.5.2/d4/d61/tutorial_warp_affine.html (дата обращения: 10.07.2021).
16. Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J. FaceNet: A unified embedding for face recognition and clustering // Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. IEEE Computer Society, 2015. Т. 07-12-June-2015. С. 815–823.
17. Python Release Python 3.7.0 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.python.org/downloads/release/python-370/> (дата обращения: 15.07.2021).
18. dlib C++ Library [Электронный ресурс] // URL: <http://dlib.net/> (дата обращения: 14.07.2021).
19. Sagonas C. и др. A semi-automatic methodology for facial landmark annotation // IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. Work. 2013. С. 896–903.

A. P. Mikheev¹, A. V. Pyataeva²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: neuronbox@gmail.com, anna4u@list.ru

DEEP LEARNING FACE RECOGNITION

The article presents a face recognition method that uses facial landmarks, on the basis of which the original image scales, rotates and centers by applying affine transformations from the OpenCV library. For face recognition the iBUG-300W dataset, the MMOD CNN model is trained. Experimental studies conducted on dataset from a webcam provide an average accuracy of personality recognition of about 94%. As a measure of the difference between the reference and the studied image, the Euclidean distance is selected. The resulting software implementation of the developed algorithm allows for procuring in electronic training systems.

Keywords: face detection, face recognition, MMOD CNN, facial landmarks.

Т. С. Плешкова, Д. А. Краснов, А. Е. Алехина, А. Н. Сафонова

Лаборатория глубокого обучения ДНиИД,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: tpleshkova@sfu-kras.ru, dkrasnov@sfu-kras.ru,
a.tolmacheva@solutionfactory.ru, asafonova@sfu-kras.ru

СЕГМЕНТОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ДЕРЕВЬЕВ НЕЙРОСЕТЬЮ MASK R-CNN НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ GOOGLE

В представленной работе выполнено сегментирование деревьев на новом наборе данных спутниковых изображений низкого разрешения, полученных с геоинформационного портала Google Earth на территории Красноярского края. Проведена оценка производительности предложенной модели с применением библиотеки Detectron2. Результаты эксперимента показывают, что сверточная нейронная сеть Mask R-CNN на этапе тестирования продемонстрировала высокую точность обнаружения объектов до 71,36%.

Ключевые слова: нейронные сети, Mask R-CNN, Detectron2, изображения Google Earth, сегментирование.

Введение. Одной из областей применения, в которой эффективно используются подходы глубокого обучения и нейронных сетей, является анализ цифровых изображений и видео для решения задач свойственных конкретному набору данных. Однако некоторые задачи предоставляют ограниченные в количестве или низкого качества данные, что влияет на эффективность решения проблемы, такие, например, как решение задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В статье реализовано решение задачи сегментации экземпляров (instance segmentation) нейронной сетью Mask R-CNN на малом объеме спутниковых изображений низкого разрешения, полученных с геоинформационного портала Google Earth с использованием библиотеки Detectron2 [1].

Методы. В качестве метода для задач сегментирования отдельных деревьев на изображениях ДЗЗ была выбрана сверточная нейронная сеть Mask R-CNN [2-3] реализованная на библиотеке Detectron2. Сегментация экземпляров выполняется в два этапа [3]:

Обнаружение объекта (object detection). Изображение, поступившее на вход, сканируется, затем дается предположения об областях, в которых могут содержаться искомые объекты. Объекты выделяются с помощью ограничительной рамки (bounding box) с процентной оценкой относительной точности измерения координат (ширины и высоты).

Сегментация. Каждое предположение первого этапа сегментируется, затем формируются рамки и маски для каждого объекта.

В качестве метрики оценки использовалась mAP с расчётом параметров Precision (1), Recall (2), F1-score (3), loss (4) [2].

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$\text{F1 - score} = 2 * \frac{\text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (3)$$

$$L = L_{cls} + L_{box} + L_{max} \quad (4)$$

Подготовка данных осуществлялась с помощью географической информационной системы QGIS 3.16.3. Аннотация данных производилась с помощью программного обеспечения LabelMe [4].

Материалы. Подготовка нового набора данных осуществлялась с помощью геоинформационного портала Google Earth [5]. Область исследования расположена в Сухобузимском районе, 70 км к северу от города Красноярска, между деревней Шошкино и поселком Шилинка. Объектом исследования выступали следующие породы деревьев: сосна, береза, кедр, пихта, лиственница, тополь и другие быстрорастущие, которые имеют различный возраст посадок от 3 до 20 и более лет [6].

Был подготовлен малый набор данных – 200 спутниковых изображений с низким пространственным разрешением до 20 м/пиксель, который был разделен на 80% для обучения модели и 20% – для тестирования.

Результаты. Эксперимент выполнялся на предварительно обученной нейросети Mask R-CNN ResNet-50 в вычислительном кластере Google Colaboratory с графическим ускорителем GPU Tesla P100-PCIE [7]. Обучение модели производилось до 1500 итераций в течение 10 минут.

Общая точность и потери тестирования обученной модели составили 71,36% и 1,79%, соответственно (Таблица).

Таблица

Результаты оценки качества обученной модели

Наименование метрики	Mask R-CNN
Precision	0,78
Recall	0,65
F1-мера	0,71
loss	0,02

Результат тестирования нейросети Mask R-CNN представлен на Рисунке.

Как видно на рисунке, обученная нейросеть Mask R-CNN не всегда способна распознать класс «дерево».

По результатам проведенного эксперимента выявлено, что используемая нейронная сеть показывает хороший результат для решения задач сегментации деревьев на малом наборе данных спутниковых изображений низкого разрешения. Полученный результат может быть использован для подсчета количества деревьев. В дальнейшем предусматривается развитие исследования с применением других моделей.

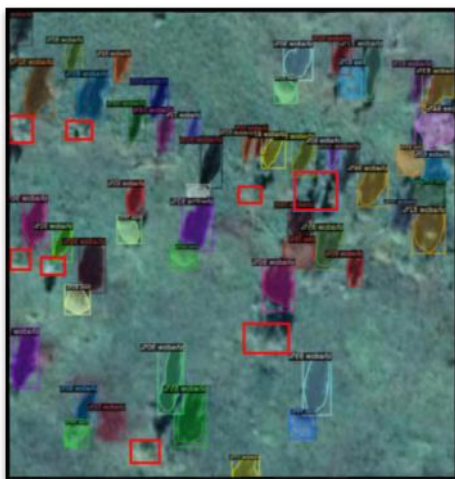


Рис. Результат работы нейросети Mask R-CNN на тестовом изображении

Список литературы

1. Detectron2: A PyTorch-based modular object detection library. URL: ai.facebook.com/blog/detectron2, (Дата обращения: 10.07.2021).
2. Safonova, A.; Tabik, S.; Alcaraz-Segura, D.; Rubtsov, A.; Maglinets, Y.; Herrera, F. Detection of Fir Trees (*Abies sibirica*) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning. *Remote Sens.* 2019, 11, 643. <https://doi.org/10.3390/rs11060643>.
3. Safonova, A.; Guirado, E.; Maglinets, Y.; Alcaraz-Segura, D.; Tabik, S. Olive Tree Biovolume from UAV Multi-Resolution Image Segmentation with Mask R-CNN. *Sensors* 2021, 21, 1617. <https://doi.org/10.3390/s21051617>.
4. Wada, K. Labelme: Image Polygonal Annotation with Python – 2021; URL: <https://github.com/wkentaro/labelme> (Дата обращения: 10.05.2021).
5. Google Earth. URL: <https://earth.google.com/> (дата обращения: 25.04.2021).
6. Официальный портал Сухобузимского района. URL: suhobuzimo.ru (Дата обращения: 20.04.2021).
7. Google Colab URL: <https://colab.research.google.com>.

T. S. Pleshkova, D. A. Krasnov, A. E. Alekhina, A. N. Safonova

Deep Learning laboratory,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: tpleshkova@sfu-kras.ru, dkrasnov@sfu-kras.ru,
a.tolmacheva@solutionfactory.ru, asafonova@sfu-kras.ru

SEGMENTATION OF INDIVIDUAL TREES BY THE MASK R-CNN NEURAL NETWORK ON GOOGLE IMAGES

In the presented work, trees were segmented on a new dataset of low-resolution satellite images obtained from the geographic information portal Google Earth in the Krasnoyarsk Territory. The performance of the proposed model was evaluated using the Detectron2 library. The results of the experiment show that the Mask R-CNN convolutional neural network at the testing stage demonstrated a high accuracy of object detection up to 71.36%.

Keywords: neural networks, Mask R-CNN, Detectron2, Google Earth images, segmentation.

Д. С. Русин¹, А. Е. Алехина¹, А. Н. Сафонова¹, Е. В. Дмитриев²

¹ Лаборатория глубокого обучения,

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия

e-mail: drusin@sfu-kras.ru, a.tolmacheva@solutionfactory.ru, asafonova@sfu-kras.ru, e.dmitriev@inm.ras.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕКСТУРНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В данной работе представлены результаты текстурной сегментации спутниковых изображений с пространственным разрешением <1 м с использованием сверточных нейронных сетей U-Net. Для проведения численных экспериментов использовалось панхроматическое изображение WorldView-2 тестового участка на территории Бронницкого лесничества (Московская область). Исследовались возможности автоматизации выбора параметров нейронной сети на основе генетических алгоритмов. Предлагаемый метод позволяет эффективно сегментировать основные типы природных и техногенных объектов, а также выделять структурные классы лесных массивов.

Ключевые слова: глубокое обучение, нейронные сети, дистанционное зондирование Земли, сегментация.

В данной работе была поставлена задача создания модели глубокого обучения на основе сверточных нейронных сетей. Данная модель должна автоматически сегментировать природно-техногенные объекты на панхроматических спутниковых изображениях сверхвысокого пространственного разрешения по текстурным особенностям.

Методы. В работе использовалась один из видов U-net архитектуры -Xception [1] с возможностью изменения ряда параметров для улучшения точности. Архитектура Xception представляет собой сверточную нейронную сеть, которая способна работать с малым количеством обучающих данных для задач сегментации. Обобщенная архитектура U-Net [2] представлена на рис. 1.

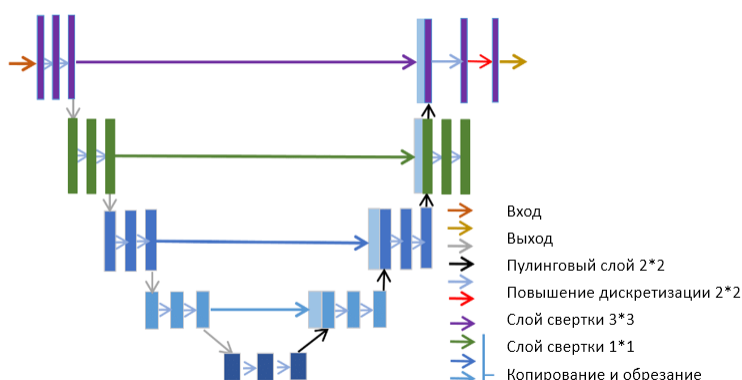


Рис. 1. Обобщенная архитектура U-Net [2]

Автоматизированная настройка параметров производилась с применением генетического алгоритма (ГА). Работа алгоритма основывалась на выходной оценке качества модели U-Net. Для сравнения эффективности автоматизированной настройки параметров, проведены расчеты, в которых модель была обучена как с использованием, так и без использования генетического алгоритма. Для сравнения качества моделей было решено использовать кроссвалидацию [3] для оценки на независимых данных. Параметры ГА представлены в Таблице 1 [4].

Таблица 1

Параметры ГА	
Наименование	Значение
Коэффициент мутации	0.1
Размер популяции	20
Количество итераций	50
Коэффициент скрещивания	3

Для оценки качества модели использовалась метрика mAP (1), основанная на матрице ошибок *F1-score* (2), она же представляет из себя баланс между *Precision* (3) и *Recall* (4). В качестве функции потери модели использовалась категориальная кросс-энтропия (5).

$$mAP = \sum_{i=1}^N AP_i = \frac{1}{N} \sum_{Recall} Precision(Recall_i), \quad (1)$$

$$F1_score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}, \quad (2)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (3)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (4)$$

$$Loss = - \sum_{i=1}^{Output\ size} y_i * \log y_i, \quad (5)$$

где $y_i - i$ скалярная величина на выходе модели, *Output size* – количество скалярных значений в выходных данных модели.

Данные. Набор данных представляет из себя спутниковые снимки Бронницкого лесничества Московской области, суммарно изображение имеет размер 10140×10120 пикселей, для начала была произведена обработка данного снимка, а именно разделение на 64 части для последующей разметки данных (Рис. 2).

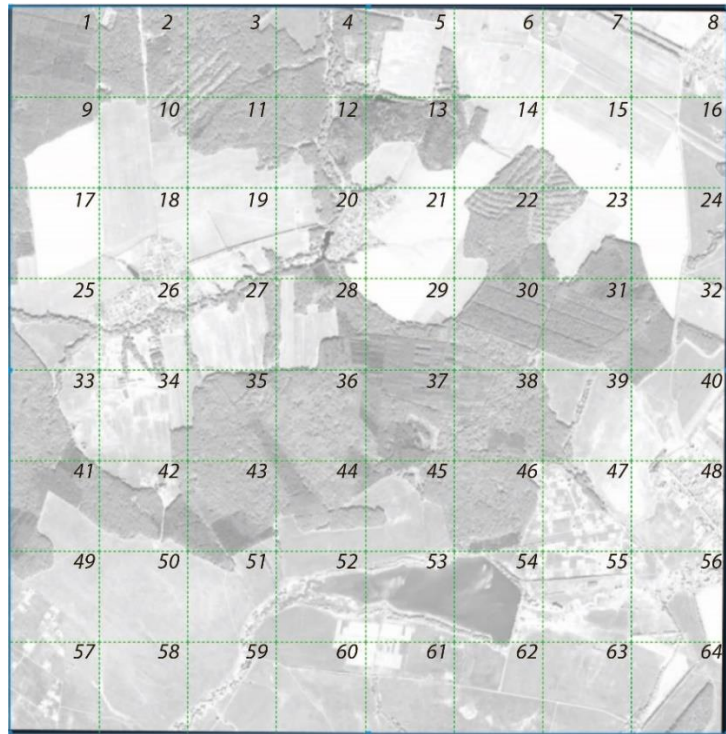


Рис. 2. Разделение исходного снимка на кадры

Разделение снимка позволяет снизить нагрузку во время обучения, а также более детально разметить данные. Окончательный размер каждого кадра равен 1267*1265 пикселей.

В данной задаче было выделено 6 классов: Смешанный лес, поле, город, лесополоса, упорядоченный лес, вода. Далее производилась разметка классов на изображении с использованием открытого инструмента для аннотации данных LabelMe [5]. Пример разметки одного из кадров представлен на Рисунке 3.



Рис. 3. Пример размеченного снимка

Полученная выборка была разделена на 80% – предназначенная для обучения модели и 20% – для тестирования.

Результаты. Обучение архитектуры нейронной сети (НС) производилось с помощью бесплатной облачной вычислительной машины Google Colab [6]. Было обучено две разных модели: U-Net и U-Net+ГА с оптимальным количеством обучающих итераций 500 на протяжении 130 минут каждая.

Основные результаты эксперимента на тестовых данных представлены в Таблице 2. Для оценки качества модели использовались метод случайной независимой проверки (СНП), в котором тестовая выборка составляет 20% от общего объема данных, и метод k-folds кроссвалидации (КВ) с разделением исходных данных на 5 частей.

Таблица 2

Результаты оценки качества обученных моделей

Наименование метрики	U-net		U-net+ГА	
	СНП	КВ	СНП	КВ
F1-score	0.7574	0.8237	0.7786	0.79
Loss	0.2212	0.13	0.1675	0.1526
mAP	0.7154	0.7649	0.7356	0.743

Результаты работа U-Net и U-Net+ГА отображают среднее по 15 запускам каждый. Как видно из Таблицы 2, модель U-Net справляется с обработкой спутниковых снимков в задаче сегментирования, но для более высоких результатов необходима более точная настройка сети, т.к. даже изменение нескольких параметров позволило повысить точность модели. Также модель чувствительна к количеству входных данных, это видно на основе результатов работы кроссвалидации. В дальнейшем планируется тестирование данных моделей на новых участках.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 20-07-00370 «Фундаментальные проблемы повышения информативности обработки данных оптоэлектронных авиакосмических устройств высокого пространственного и спектрального разрешения» и № 19-01-00215 «Исследование оперативных возможностей гиперспектральных технологий ДЗЗ для решения региональных задач с использованием действующих и перспективных ГСК космического базирования».

Список литературы

1. Chollet, F. Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions. arXiv:1610.02357 [cs] 2017.
2. Olaf Ronneberger, U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, arXiv:1505.04597, 2015.
3. Mosteller F. and Tukey J.W. Data analysis, including statistics. In Handbook of Social Psychology. Addison-Wesley, Reading, MA, 1968.
4. Федоренко К. В. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута / Кирилл Владимирович Федоренко, Аркадий Львович Оловянный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. № 4 (44). С. 714-723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.
5. Wada, K. Labelme: Image Polygonal Annotation with Python – 2021; URL: <https://github.com/wkentaro/labelme>.
6. Google Colab URL: <https://colab.research.google.com>.

D. S. Rusin¹, A. E. Alekhina¹, A. N. Safonova¹, E. V. Dmitriev²

¹ Deep Learning Laboratory, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Mathematics named after G. I. Marchuk
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

e-mail: drusin@sfu-kras.ru, a.tolmacheva@solutionfactory.ru,
asafonova@sfu-kras.ru, e.dmitriev@inm.ras.ru

USING DEEP LEARNING ALGORITHMS FOR TEXTURE SEGMENTATION OF ULTRA-HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES

This paper presents the results of texture segmentation of satellite images with a spatial resolution of <1 m using convolutional neural networks U-Net. For numerical experiments, a panchromatic image of the WorldView-2 test site in the Bronnitsky forestry (Moscow region) was used. The possibilities of automating the selection of neural network parameters based on genetic algorithms were investigated. The proposed method makes it possible to effectively segment the main types of natural and man-made objects, as well as to distinguish the structural classes of forest areas.

Keywords: deep learning, neural networks, Earth remote sensing, segmentation.

А. Ж. Сарина

Кандидат технических наук, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан

e-mail: assiya_prog@mail.ru

СЖАТИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОТЕРЯМИ

Работа посвящена описанию разработки алгоритмов сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений на основе дискретных ортогональных преобразований с целью последующего сжатия в системах дистанционного зондирования Земли. В качестве алгоритмов сжатия, необходимого для сокращения объема передаваемой информации, предлагается использование разработанных методов сжатия на основе преобразований Уолша-Адамара и дискретно-косинусного преобразования. В работе рассмотрена методика разработки алгоритмов сжатия с потерями и высоким качеством при восстановлении, с учетом которой разработан адаптивный алгоритм для сжатия гиперспектральных АИ и сгенерированной таблицей квантования. Проведенные исследования показали, что предложенные алгоритмы с потерями имеют эффективность, достаточную для использования и могут быть применены при сжатии гиперспектральных данных ДЗЗ в условиях ограниченной емкости буферной памяти и пропускной способности канала связи.

Ключевые слова: гиперспектральные аэрокосмические изображения, алгоритм сжатия, дискретные преобразования, степень сжатия, дискретно-косинусное преобразование, Уолша-Адамара.

Введение. Гиперспектральные АИ ДЗЗ необходимы для мониторинга природных ресурсов и последствий чрезвычайных ситуаций и т.д. В настоящее время разработка программных систем для сжатия с потерями данных является актуальной задачей. В решении данной задачи существуют различные направления исследования, в которых активно ведутся исследования в области разработки алгоритмов сжатия [1-7]. Алгоритмы и способы сжатия с потерями данных охватывают широкий спектр сжатия. Среди них наиболее распространенными являются ортогональные и вейвлет-преобразования, алгоритм сжатия JPEG. Большой интерес исследователи проявляют к методам сжатия АИ с потерями, которые дают весомые результаты в эффективности степени сжатия, применение ортогональных преобразований: дискретно-косинусного преобразования (ДКП), дискретное вейвлет-преобразование (ДВП), SPIHT, прогнозирование (предсказание), JPEG, JPEG2000 и на последнем этапе энтропийное кодирование. Популярность использования и применения вейвлетов в области обработки изображений возросла после введения французским математиком С. Маллатом концепции кратномасштабного анализа [3]. Он первым применил вейвлеты для кодирования изображений. Учёные США И. Добеши и С. Маллат показали, что практическое выполнение вейвлет-преобразований осуществляется посредством двухполосного банка фильтров, известного в теории субполосного кодирования (поддиапазонные преобразования) [2-3]. Главная особенность заключается в критериях построения фильтров. На основе теории вейвлетов, разработанных Хааром создано семейство вейвлетов Добеши. К примеру группа исследователей Emmanuel, Sujithra, Manickam, Sudheer считают, что вейвлет-преобразование [6,7] является одной из актуальных тенденций в новых алгоритмах сжатия для гиперспектральных АИ. Применение вейвлетов обеспечивает прогрессивный сжатый битовый поток, который позволяет достичь сжатие без потери качества с минимальными потерями информации. Преимущество обеспечивается

благодаря использованию сжатия энтропийного кодирования. Недостатками могут быть: частично сохраняется производительность сжатия с потерями; увеличение сложности алгоритма с точки зрения необходимой оперативной памяти; относительно низкое качество при промежуточных вейвлет преобразованиях.

В обработке сигналов и изображений используется алгоритм быстрого преобразования Уолша-Адамара, основанного на системе функций и их свойств.

Учёными Sujithra и др. [6] исследовано сжатие гиперспектральных АИ, использующего ДВП и Уолша-Адамара преобразование (УАП). Предлагается гибридная технология, называемая Уолш вейвлет-преобразованием, состоящая из четырех этапов. На первом этапе, применяются два уровня ДВП, на втором этапе применяются 2D-УАП на каждом блоке низкочастотного диапазона ($N=4$). На третьем этапе нахождение значений от трансформированных подизображений каждого диапазона, затем они сжимаются арифметическим кодированием, это четвертый этап. Данная технология обеспечивает коэффициент сжатия – 1,8. Индийские исследователи Keerthana, Poopam, Ramesh применили анализ главных компонент (РСА) к сжатию гиперспектральных АИ [5-6]. Использовался метод гибридного сжатия (ДВП-ТД), который являлся эффективным, поскольку он обеспечивал подробную информацию о спектральных диапазонах изображения. ДВП-ТД с использованием «глобальной» кодировки достигает более высокого значения «пикового отношения сигнала к шуму» (PSNR), меньшее время выполнения и высокий коэффициент сжатия – 8,0. Основным недостатком является то, что ковариационная матрица РСА, которая используется для декорреляции среди частотных полос, уже должна быть рассчитана, и, следовательно, зависит от данных. Поэтому, требуется снижение вычислительной нагрузки предлагаемого метода.

Ученые Cheng и Dill улучшили алгоритм EZW Шапиро [4]. Гибридные преобразования заключаются в том, что Karhunen-Loève Transform (KLT), которые декодируют спектральные данные гипер-перспектрального АИ, а ДВП применяется к пространственным данным. Предлагаемое сжатие изображения имеет степень сжатия – 7,9. Недостатки: вейвлет коэффициенты могут быть отсканированы раньше, чем другие в подканалах низкого уровня; основой кодера является алгоритм EZW Шапиро, кодирующий остаточные значения и реализующий только доминирующий блок; алгоритм усложнен вычислительной эффективностью.

Алгоритм SPIHT основанный на вейвлетах Хаара и Добеши используется в обработке сжатия цифровых и гиперспектральных АИ. К преимуществам алгоритма SPIHT относятся возможность выбора степени сжатия в широких пределах – от 4 до 0,1 бит/пиксел; отсутствие блочности изображения при высоких степенях сжатия; в случае, если часть данных теряется, возможно восстановление всего изображения (с худшим качеством). К недостаткам данного алгоритма следует отнести относительную сложность реализации; неустойчивость к сбоям. Информация, переданная до сбоя, позволяет восстановить все изображение с худшим качеством, но информация после сбоя не может быть использована.

Исследователями Ouahioune, Dubey [6] исследовано сжатие гиперспектральных АИ с использованием 3D SPIHT алгоритма. На первом этапе применяется 3D ДВП, на втором этапе кодируется 3D-SPIHT алгоритмом, где есть значимая корреляции

между различными диапазонами каналов. После декомпрессии изображения оцениваются с помощью PSNR алгоритма. Основа сжатия ДКП и SPIHT обеспечивает высокую степень сжатия. Недостаток: алгоритм может быть реализован для любого размера изображения, размер изображения пропорционально увеличивает время необходимое для сжатия и восстановления изображения, что повышает вычислительную сложность алгоритма.

Одним из популярных графических форматов, предназначенных для хранения изображений является алгоритм JPEG, опубликованный в 1991 г., позволяющий сжимать изображения с потерями и без потерь. Рассмотрим алгоритм работы разновидности простейшего кодера JPEG с потерями, процесс которого состоит из следующих этапов (рисунок).

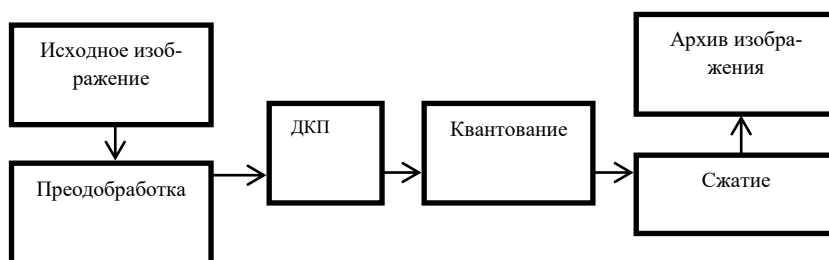


Рис. Этапы работы кодера JPEG

Преодобработка – предварительная обработка изображения, приводящая его к удобному для последующего кодирования представлению.

ДКП используется кодером JPEG для преобразования изображения от его пространственного представления к спектральному.

Квантование – этап, при котором происходит основная потеря информации за счет округления несущественных, высокочастотных ДКП-коэффициентов.

Сжатие – это кодирование полученных данных энтропийными алгоритмами (арифметическое кодирование, алгоритм Хаффмана и др.)

Важным шагом в алгоритме JPEG является ДКП, представляющее собой разновидность преобразования Фурье [3]. Если рассматривать изображение как совокупность пространственных волн, где оси X и Y соответствуют ширине и высоте изображения, а по оси Z значения цвета соответствующих пикселей, то можно перейти от пространственного представления картинки к ее спектральному представлению и обратно [2]. ДКП преобразует матрицу пикселей размера N×N в матрицу частотных коэффициентов соответствующего размера по формулам.

$$DCT(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2N}} C(i)C(j) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos\left[\frac{(2x+1)i\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)j\pi}{2N}\right]$$

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} C(i)C(j) DCT(i, j) \cos\left[\frac{(2x+1)i\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)j\pi}{2N}\right] C(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & x=0 \\ 1, & x>0 \end{cases}$$

Проведенный анализ существующих и отдельно разработанных алгоритмов и методов сжатия гиперспектральных АИ с потерями позволяет определить основные

направления исследования в области построения эффективных алгоритмов сжатия для решения задачи сжатия и применения в обработке гиперспектральных АИ:

- дискретные преобразования;
- вейвлет и ортогональные преобразования;
- оценка критериев качества восстановленных изображений с использованием метрик качества PSNR, MSE, PMSE и др.;
- на этапе сжатия полученных преобразований: адаптивное арифметическое кодирование и алгоритм Хаффмана.

Этапы алгоритма сжатия. Разработаны алгоритмы обработки гиперспектральных АИ с потерями на основе дискретных преобразований. Последовательность этапов следующая.

Преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, значения коэффициентов, на основе Уолша – Адамара трех уровней.

Оригинальное преобразование структуры данных на основе исходного гиперспектрального АИ, хранящей значения коэффициентов, на основе дискретно-косинусного преобразования с генерированной таблицей квантования. Преобразование полученных структур данных на основе этапов 1-2 путем сгенерированной таблицы квантования коэффициентов.

Использование стандартных критериев качества восстановленных изображений.

Сжатие полученных структур этапа 4 одним из стандартных энтропийных алгоритмов. Экспериментальное исследование алгоритмов преобразования по степени сжатия и качеству восстановленных данных.

Рассмотрим этапы алгоритмов подробнее.

Преобразование Уолша – Адамара.

Для пошагового описания преобразования необходимо ввести в рассмотрение следующие объекты:

– исходное изображение – матрица значений изображения $I[m,n,k]$, где m,n,k – индексы строк, столбцов и каналов исходного изображения, $m = 1,2,\dots,M$, $n = 1,2,\dots,N$, $k = 1,2,\dots,K$;

– преобразование WHT – это фильтры, разделяющих изображение на низкочастотную и высокочастотную составляющие (чтобы получить исходное изображение, нужно снова объединить составляющие);

– СК – спектральная компонента матрицы $I[m, n, k]$.

Рассмотрим пример преобразования Уолша-Адамара (WHT) для фрагмента гиперспектрального АИ.

Пусть фрагмент АИ представляет матрицу, состоящую из m строк, n столбцов и k каналов: $I[m, n, k] = I[10, 10, 10]$.

Прямое преобразование WHT представлено в матричной форме H_{w2} , взят фрагмент АИ (123, 105, 121, 103, 118, 100, 123, 123, 122, 104), т.е. $H_{w2} \bullet I[m, n, k] = H_{w2} '[СК]$.

В результате после такого преобразования получим коэффициенты низкочастотной и высокочастотной составляющих СК = 114, 9, 112, 9, 114, 9, 123, 0, 123, 9. В процессе квантования высокочастотные коэффициенты (близкие к нулю и отрицательные значения) округляются до нуля.

Следует отметить, что матрицы уровней H_{w4} и H_{w8} вычисляются аналогично, как и H_{w2} .

На этапе восстановления исходных каналов изображения происходит декодирование СК. $H_{wt2}^T \bullet H_{wt2} [CK] = I[m, n, k]$, где H_{wt2}^T – обратное преобразование вейвлета ВНТ, $H_{wt2} [CK]$ – спектральная компонента.

Преимущество преобразования Уолша-Адамара: повышенная способность выявлять низкочастотные составляющие за счет разделения областей каналов гиперспектрального АИ на подуровни и сгенерированного коэффициента квантования.

Заключение. Основным достоинством данной метрики является охват всего изображения при подсчете значения, а не конкретной локальной области (частотной или временной). Данный критерий является сложной задачей, возникающей во многих областях, связанных с обработкой сжатия изображения.

Список литературы

1. Ouahioune mohand, Akrou leila, Lahdir mourad, Ameer soltane. Aviris Hyperspectral Images Compression Using 3d Spiht Algorithm. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719, www.iosrjen.org Volume 2, Issue 10 (October 2012), PP 31-36.
2. Lossless Compression of Hyperspectral Images Using Adaptive Prediction and Backward Search Schemes. JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING 27, 2011, pp. 419-435.
3. 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, NO. 2, MARCH 2011. Fernando García-Vilchez.
4. Emmanuel Christophe. Hyperspectral Data Compression Tradeoff. Augmented Vision and Reality, 3, DOI: 10.1007/978-3-642-14212-3_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
5. Lossless multispectral & hyperspectral image compression. CCSDS Recommended standard for lossless multispectral & hyperspectral image compression. Recommended Standard, Issue 1. CCSDS Secretariat. Space Communications and Navigation Office, 7L70. NASA Headquarters. Washington, DC 20546-0001, USA. May 2012. 52 p.
6. N.M. Mary Sindhuja, A.S. Arumugam. SPIHT BASED COMPRESSION OF HYPER SPECTRAL IMAGES. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 2, Issue 10, October 2013.
7. D.S. Sujithra, T. Manickam, D.S. Sudheer. Compression of Hyperspectral Image Using Discrete Wavelet Transform And Walsh Hadamard Transform. International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE) Volume 2, Issue 3, March 2013. ISSN:2278 – 909X.

A. Zh. Sarinova

Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan
e-mail: assiya_prog@mail.ru

LOSSY HYPERSPECTRAL IMAGE COMPRESSION

The work is devoted to the description of the development of compression algorithms for hyperspectral aerospace images based on discrete orthogonal transformations for the purpose of subsequent compression in Earth remote sensing systems. As the compression algorithms necessary to reduce the amount of transmitted information, it is proposed to use the developed compression methods based on the Walsh-Hadamard transforms and the discrete-cosine transform. The paper discusses a technique for developing lossy compression algorithms with high quality during recovery, taking into account which an adaptive algorithm for compressing hyperspectral AI and a generated quantization table has been developed. The studies carried out have shown that the proposed lossy algorithms have an efficiency sufficient for use and can be applied when compressing hyperspectral ERS data under conditions of limited buffer memory capacity and communication channel bandwidth.

Keywords: hyperspectral aerospace imagery, compression algorithm, discrete transforms, compression ratio, discrete cosine transform, Walsh-Hadamard.

**А. В. Сорокин¹, А. Н. Борисов², М. Ю. Реушев¹,
В. В. Иванов², Д. В. Харламов¹**

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

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

ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ДИАПАЗОНА L1

Представлены экспериментальные данные о распространении сигналов навигационных спутников диапазона L1 в лесопосадках сосны с анизотропной горизонтальной структурой размещения деревьев. Рассмотрен вариант распространения сигналов вдоль и перпендикулярно рядам деревьев. Особенностью среды распространения является нерегулярное расстояние между деревьями в рядах и постоянное расстояние между рядами. Регистрация сигналов осуществлялась антенной, расположенной внутри лесного массива на высотах 0,6 и 10 метров. Выявлены отличия амплитудно-временных зависимостей регистрируемого сигнала в зависимости от ориентации трассы зондирующего сигнала в древостое.

Ключевые слова: анизотропия, горизонтальная структура древостоя, радиоскопия, сигналы навигационных спутников, диапазон L1.

Введение. Формирование лесных культур в лесохозяйственной практике путем посадки саженцев является важным инструментом выращивания высокопродуктивных лесных насаждений. Посадка саженцев обычно производится рядами, но расположение вырастающих деревьев в одном ряду со временем становится нерегулярным. Некоторые саженцы не приживаются из-за конкуренции за доступный ресурс. Для культур сосны обострение конкурентных отношений происходит к моменту смыкания крон сначала в рядах, а затем и между рядами.

В данной работе рассмотрен вариант мониторинга анизотропии горизонтальной структуры лесопосадок сосны в возрасте 72-х лет с использованием сигналов навигационных спутников (НС) в диапазоне L1. Характеристики стволовой древесины и крон деревьев, в зависимости от того или иного этапа их формирования, влияют на параметры сигналов НС в процессе прохождения сигналов сквозь лесной полог с азимутом вдоль или поперек рядов.

Объект исследования. Экспериментальным тестовым участком является лесопосадки сосны I класса бонитета, расположенные на территории городских лесов вблизи Академгородка. Возраст лесопосадок составляет 72 год. Размер участка составляет 480x90 метров. Основные таксационные характеристики соснового древостоя следующие; густота 1425 шт/га; средняя высота деревьев (H_{cp}) – 25 м; средний диаметр стволов на высоте 1,3 м – 24,2 см; запас стволовой древесины – 743 м³/га; сумма поперечных сечений стволов – 65,5 м²/га; полнота древостоя -1,47. Посадки сосны выполнены рядами, ориентированными по азимуту 72° с междурядным расстоянием 2,5 метра. Расстояние между деревьями в рядах варьируется от 1 до 3 мет-

ров при среднем расстоянии между деревьями в ряду – 1.5 м. Густота деревьев на тестовом участке значительно превышает этот параметр для нормального древостоя в этом возрасте – 757 шт/га [1]. Возникает напряженная конкуренция между деревьями за доступные ресурсы, что приводит к ослаблению древостоя в целом и меньшей величины среднего диаметра стволов с плохо развитыми кронам. Основная масса деревьев (более 80%) в классификации по степени господства и угнетённости относится к III и IV классам Крафта [2].

Вид тестируемого участка сверху показан на рисунке 1а. Внутренняя структура древостоя с азимутом вдоль или поперек рядов представлена на рисунках 1б и 1в.

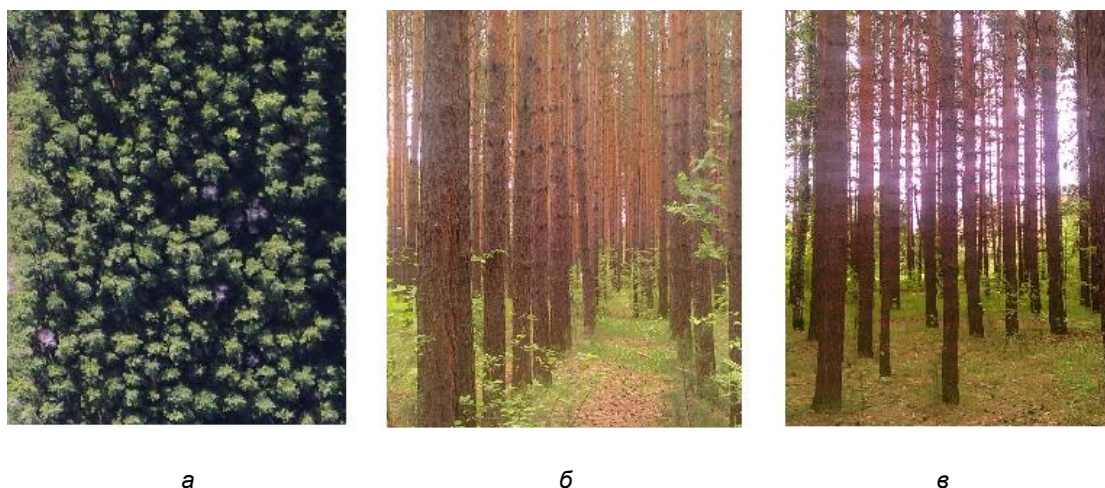


Рис. 1. Вид фрагмента тестового участка сверху (а); наземное изображение структуры древостоя вдоль рядов (б); перпендикулярно рядам (в)

Как можно видеть из рисунка 1, горизонтальная структура древостоя обладает явно выраженной анизотропией. Расстояние между рядами вдвое больше среднего расстояния между деревьями в ряду. В процессе роста возникает слоистая структура распределения деревьев в виде рядов.

Распространение сигналов НС в древостое. Ослабление сигналов НС при прохождении сквозь лесной массив зависит от размера стволов, густоты древостоя. Полнота тестового участка превышает на 47% таковую для «нормального древостоя» [1].

В вертикальном направлении древостой имеет слоистую структуру. Верхний слой, сформированный кронами деревьев, находится на высоте от 15 до 20 метров. Средняя протяженность крон равна 5,4 м, слоя стволов 19,6 м. Оценка соотношения эффективной средней плотности биомассы слоев крон и стволов дает величину 1/16. [3]. В древостое реализуется вертикальная ориентационная упорядоченность стволов и частичная ветвей крон. Имеются значимые отличия электрофизических свойств слоев крон и стволов древостоя – плотности биомассы, вертикальной протяженности величины и анизотропии эффективной диэлектрической проницаемости.

Измерения характеристик сигналов НС систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo и QZSS в процессе распространения в древостое проведены с использованием специализированного четырехканального приемника. Приемная антенна с право круговой поляризацией размещалась на высотах $h=0.5$ м и $h=10$ м от поверхности земли. Траектории и протяженность трасс сигналов НС в древостое определялись по данным располо-

жения спутников, протяженности слоев крон и стволов и высотам антенны над почвой h .

Экспериментальные данные использовались для получения амплитудно-временных зависимостей (АВЗ) сигналов, принимаемых приемником. Полученные результаты обрабатывались с помощью математического пакета для анализа и обработки данных Origin 8.5.

Примеры АВЗ приведены на рис. 2 и 3 в виде нормированных (0-1) графиков $S(t)$.

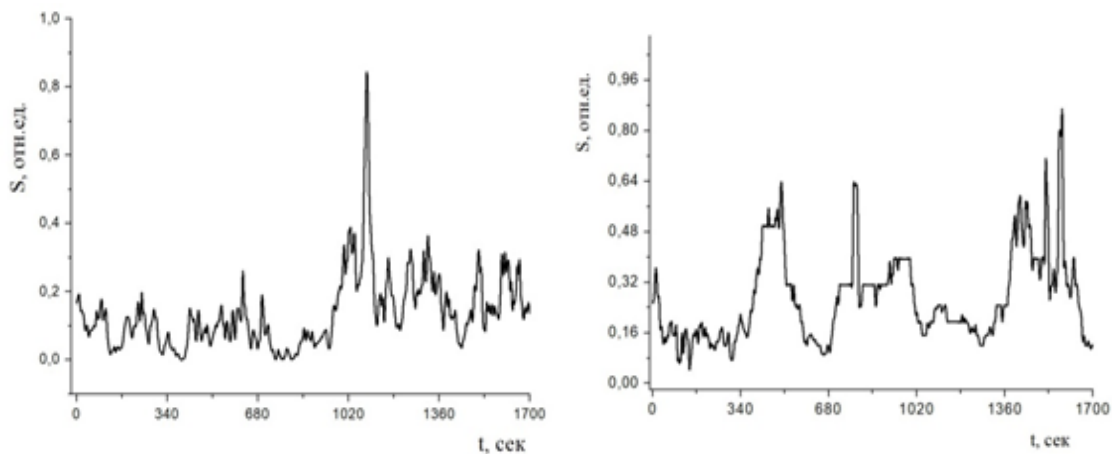


Рис.2. Зависимости $S(t)$, $h = 10$ м: секторов азимута ГЛОНАСС 4 (а), и Galileo 12 (б) соответственно поперек и вдоль рядов деревьев

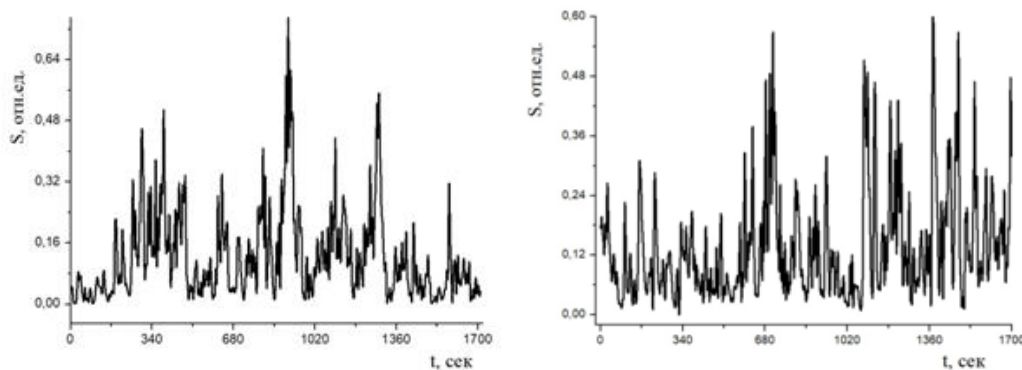


Рис 3. Зависимости $S(t)$, $h = 0.6$ м: секторов азимута ГЛОНАСС 7 (а), и Galileo 4 (б) соответственно поперек и вдоль рядов деревьев

Как видно из рис. 2 и 3, общий вид зависимостей $S(t)$ существенно различаются в зависимости от направления приема сигналов от НС и высоты расположения приемников. Последующий анализ $S(t)$ при помощи быстрого Фурье – преобразования (FFT) предполагает выявить вклады горизонтальной и слоистой структур древостоя. Важным является возможность послойного сканирования древостоя с использованием перемещения приемной антенны по высоте.

Выводы. Электрофизические характеристики древостоя определяют изменения сигналов НС в процессе распространения в объеме леса над антенной. Направления

радиопросвечивания в пространстве восстанавливаются по регистрируемым данным угловых координат НС и высоты расположения антенны. Координатная привязка зондирующего сигнала дает возможность восстанавливать структурные особенности древостоя.

Список литературы

1. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) // Москва, 2008. 886 с.
2. 2. Эйтинген Г.Р. Лесоводство. Москва.: Сельхозгиз. 1949. 246 с.
3. 3. Стаканов В.Д. Распределение органического вещества в различных частях сосны обыкновенной // Лесоведение, 1990. №4. С. 25-33.

A. V. Sorokin¹, A. N. Borisov², M. U. Reushev¹,
V. V. Ivanov², D. V. Kharlamov¹

¹Federal Research Center KSC SB RAS, ²Institute of Forest named after V. N. Sukachev
FIC KSC SB RAS Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
e-mail: sorav@iph.krasn.ru

THE INFLUENCE OF THE HORIZONTAL STRUCTURE OF THE TREE ON THE SPREAD OF SIGNALS OF NAVIGATION SATELLITES OF THE L1 RANGE

Experimental data on the propagation of signals from navigation satellites of the L1 range in pine forest plantations with an anisotropic horizontal tree arrangement structure are presented. A variant of signal propagation along and perpendicular to tree rows is considered. A feature of the propagation environment is the irregular distance between trees in the rows and the constant distance between the rows. Signals were recorded by an antenna located inside the forest at heights of 0.6 and 10 meters. The differences in the amplitude-time dependences of the recorded signal depending on the orientation of the path of the sounding signal in the forest stand were revealed.

Keywords: anisotropy, horizontal structure of the stand, radioscopy, signals of navigation satellites, L1 band.

В. С. Тутатчиков¹, М. В. Носков²

¹ Старший преподаватель. ² Доктор физико-математических наук, профессор
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: vtutatchikov@sfu-kras.ru, mvnoskov@yandex.ru

**ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА КОСМОСНИМКОВ
ПРИ ПОМОЩИ ГЛОБАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ**

В современных системах дистанционного зондирования Земли широкое распространение получило двумерное быстрое преобразование Фурье (БПФ) для обработки космоснимков и последующей фильтрации изображений. В данной работе рассмотрена возможность применения комбинации высоко- и низкочастотных глобальных фильтров для улучшения снимков земной поверхности.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, частотная фильтрация, дистанционное зондирование Земли.

Введение. В настоящее время дистанционное зондирование Земли тесно связано с цифровой обработкой изображений, так как получаемые аэрокосмические снимки представлены в цифровой форме в виде растровых изображений. Для улучшения изображений обычно применяют изменение яркости и контрастности, пространственную фильтрацию, преобразование Фурье и последующую частотную фильтрацию [1]. Рассмотрим в данной работе возможность применения комбинации результатов применения фильтров высоких и низких частот для улучшения изображения.

Описание метода. Рассмотрим в качестве исходных данных снимок Красноярска и его окрестностей со спутника LandSat-8 от 07.04.2016 [2] (рис. 1). Для удобства вычислений зададим размер исследуемой области как степень двойки: 512*512 пикселей. 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 [1] предлагается домножить все элементы изображения $f(x,y)$ на $(-1)^{x+y}$, а затем вычислить дискретное преобразование Фурье данной функции [3]. В этом случае мы получим центрированный Фурье-образ $F(u,v)$ в частотной области, в котором 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.

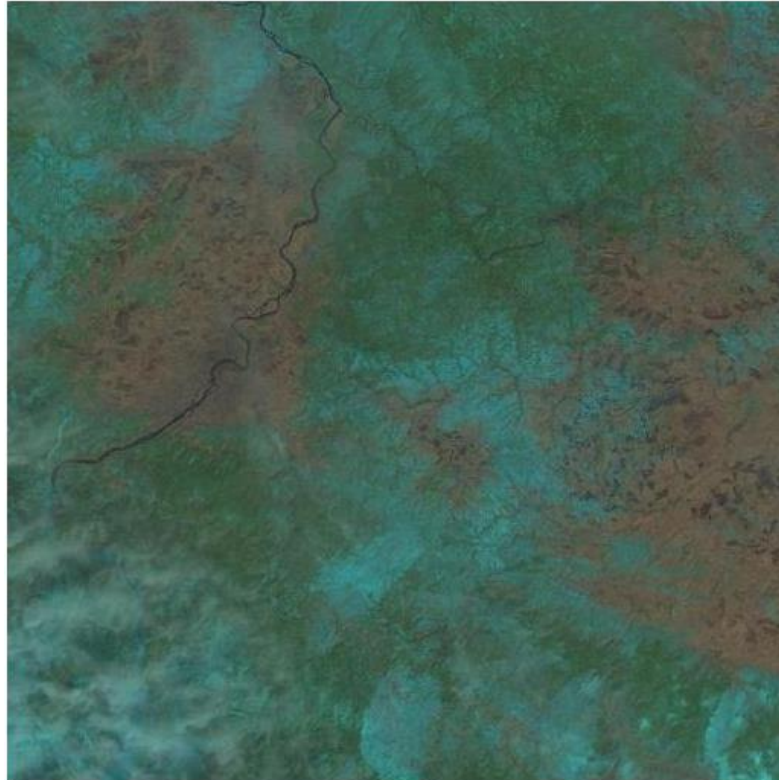


Рис. 1. Снимок поверхности Красноярска со спутника

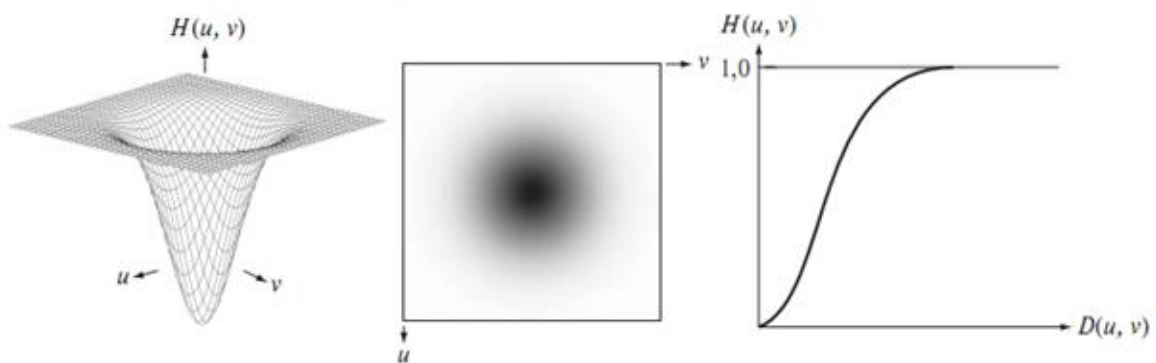


Рис. 2. График функции ФВЧ Гаусса слева, полутоновое изображение фильтра в центре, радиальный профиль фильтра справа

В результате фильтрации высокие частоты останутся без изменений, а низкие частоты за пределом радиуса D_0 будут обнулены. После этого вычисляем обратное двумерное преобразование Фурье, домножаем все отсчеты полученной функции на $(-1)^{x+y}$ для отмены центрирования, и получаем обработанное изображение $f_1(x,y)$ (рис. 3 слева).

Затем к функции $F(u,v)$ глобальный низкочастотный фильтр, например, фильтр низкой частоты (ФВЧ) Гаусса:

$$H(u,v) = \exp\left(\frac{-D^2(u,v)}{2 \cdot D_0^2}\right)$$

где $D(u,v)$ – расстояние от центра Фурье-образа до точки с координатами (u,v) , D_0 – частота среза. График ФНЧ Гаусса представлен на рисунке 4.

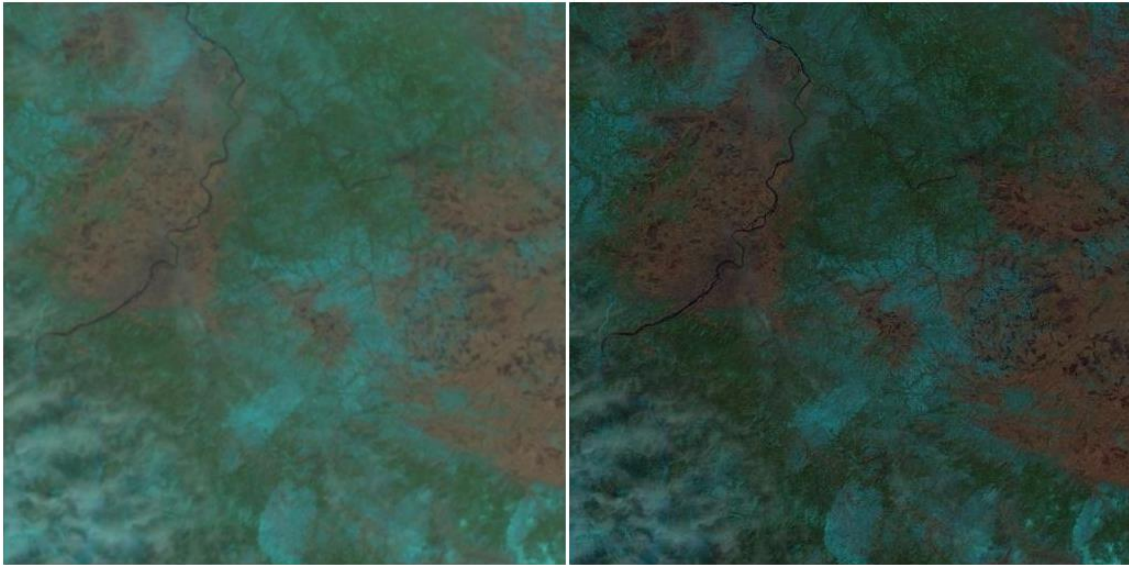


Рис. 3. Результат применения ФНЧ Гаусса слева, ФВЧ Гаусса с $D_0=1$ справа

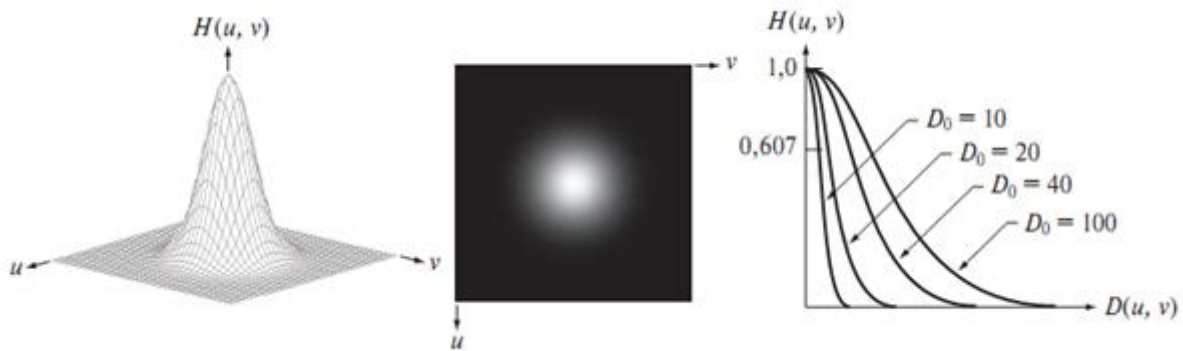


Рис. 4. График функции ФНЧ Гаусса слева, полутоновое изображение фильтра в центре, радиальные профили фильтров для различных значений D_0 справа

В результате фильтрации низкие частоты останутся без изменений, а высокие частоты за пределами радиуса D_0 будут обнулены. После этого аналогично вычисляем обратное двумерное преобразование Фурье, домножаем все отсчеты полученной функции на $(-1)^{x+y}$ для отмены центрирования, и получаем обработанное изображение $f_2(x, y)$.

Затем выполняем шаг объединения полученных изображений. Для каждого пикселя нового изображения $f_3(x, y)$ пересчитываем значение яркости по формуле:

$$f_3(x, y) = a \cdot f_1(x, y) + b \cdot f_2(x, y)$$

где $a, b \geq 0, a + b = 1$. В данном случае $a = b = 0.5$.

Полученные результаты. Итоговый результат фильтрации представлен на рисунке 5. На изображении стали заметно очерчены контуры объектов, увеличилась насыщенность цвета.

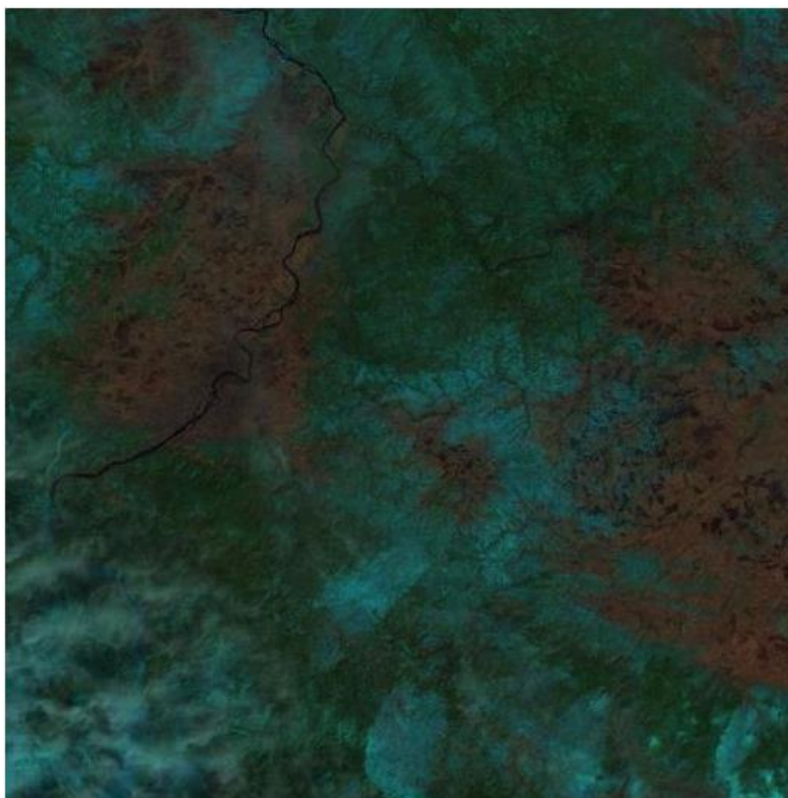


Рис. 5. Результат глобальной высокочастотной фильтрации

Заключение. На примере снимка Красноярска и его окрестностей со спутника показан способ применения комбинации глобальной высоко- и низкочастотной фильтрации для улучшения изображения. В результате обработки детали изображения становятся заметнее, а цвета ярче.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ-2020-0011).

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений, Москва: Техносфера, 2012. 1104 с.
2. Снимок Тасеевского района Красноярского края от 30.07.2020 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.
3. V.S. Tutatchikov, “Two-dimensional fast Fourier transform”, Proceeding of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016), pp. 495 – 498.

V. S. Tutatchikov, M. V. Noskov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: vtutatchikov@sfu-kras.ru, mvnoskov@yandex.ru

DIGITAL PROCESSING OF SPACE IMAGES USING GLOBAL FILTERING IN THE FREQUENCY AREA

In modern systems, remote sensing widespread two-dimensional fast Fourier transform (FFT) for processing satellite images and the subsequent image filtering. In this paper we consider the possibility of using combinations of high and low frequency filters to improve global images terrestrial surface

Keywords: digital signal processing, high frequency filtering, Earth remote sensing.

Е. В. Федотова¹, А. А. Гостева²

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: elfed@ksc.krasn.ru, AGosteva@sfu-kras.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GOOGLE EARTH ENGINE В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА

В работе рассмотрены процедуры использования облачного сервиса Google EarthEngine (GEE) для решения задач мониторинга. Использование облачных геоинформационных систем облегчает оперативный анализ пространственных данных и расширяет круг пользователей за счет использования её специалистами в прикладных областях. Работа проведена на примере территорий Красноярского края. Используются операции выделения данных из баз данных: фильтрация данных из наборов, построение функций, графиков, трендов; выделение данных с помощью векторных и растровых масок. Использован интерфейс GEE в форме скриптов на языке JavaScript.

Ключевые слова: Google EarthEngine, базы данных, пространственный анализ.

Введение. Облачные системы ГИС предлагают надежные инструменты для решения задач мониторинга, реализующие методы геоинформатики, и мощные программно-аппаратные средства: географические серверы с открытым доступом, устройства для формирования электронных карт и алгоритмы многофакторного анализа.

Облачная платформа Google Earth Engine уникальна как интегрированная платформа для расширения возможностей не только специалистов, занимающихся дистанционным зондированием, но и гораздо более широкой аудитории, которой не хватает технических возможностей, необходимых для использования традиционных суперкомпьютеров или крупномасштабных ресурсов облачных вычислений [1]. GEE содержит:

- интерактивный прикладной сервер, работающий с открытым каталогом данных;
- вычислительную среду в виде редактора кода (интегрированная среда разработки (IDE) для написания и запуска скриптов);
- геопространственный прикладной программный интерфейс (клиентские библиотеки предоставляют оболочки Python и JavaScript для веб-API в архитектуре REST).

Каталог данных GEE содержит большое хранилище общедоступных наборов геопространственных данных: с различных съемочных систем в оптическом и микроволновом диапазоне длин волн, переменные окружающей среды, прогнозы погоды и климата и ретроспективные прогнозы, растительный покров, топографические и социально-экономические данные.

Пользователи имеют доступ к данным из общедоступного каталога, а также могут использовать собственные данные, используя библиотеку операторов, предоставляемую API Earth Engine. Данные документированы и снабжены примерами кода

на JavaScript для их открытия и визуализации. Операторы реализованы в системе параллельной обработки, автоматически разделяющей и распределяющей вычисления, обеспечивая возможности анализа с высокой пропускной способностью. Пользователи получают доступ к API через библиотеку тонких клиентов или через интерактивную веб-среду разработки, построенную на основе этой клиентской библиотеки [1]. Интеграция с GEE появилась в QGIS на основе плагина QGIS Earth Engine с помощью Earth Engine Python API. Плагин реализует лишь небольшую часть функционала платформы, однако он активно развивается и имеет преимущества за счёт вывода данных непосредственно в QGIS [2].

На рис. 1 показано рабочее окно, в котором отображена часть кода для визуализации данных, изображение параметра в окне карты и график среднемесячных значений для полигона пользователя.

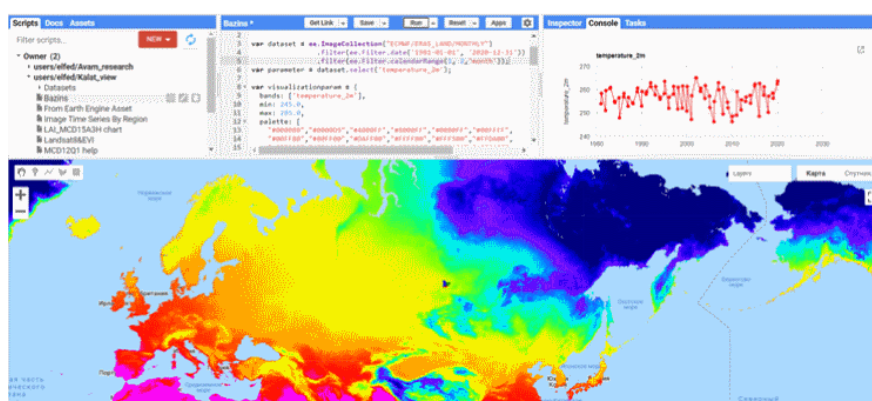


Рис. 1. Рабочее окно редактора кода (Google Earth Engine Code) на языке Java Script

Клиентские библиотеки GEE представляют собой прокси-объекты для изображений (*ee.Image*), коллекций (*ee.ImageCollection*, *ee.FeatureCollection*) и других типов данных: числа (*ee.Number*), строки (*ee.String*), векторные объекты с геометрией (*ee.Geometry*), списки (*ee.List*).

Изображения, объединённые по смыслу, группируются в коллекции изображений (*ImageCollection*), которые имеют функционал выбора данных из коллекции путем фильтрации и сортировки по заданным пространственным, временным или другим критериям. Библиотека API позволяет осуществлять операции над изображениями с использованием растровой алгебры и поддержкой функций более высокого порядка: *map()* и *iterate()*, которые позволяют применять произвольные функции к коллекциям изображений. Для вычисления статистики по коллекциям изображений применяется оператор свёртки *reduce()*, который, к примеру, может агрегировать данные методом скользящего окна [6].

Инструментарий. Для решения задачи мониторинга первым шагом необходимо выбрать данные из баз данных. Выборка данных из БД и их визуализация выполняется с помощью операций фильтрации. Характеристики данных в БД и коды для их визуализации представлены в GEE для всех данных. Например, следующий оператор осуществляет выборку данных из БД ERA5-Land с 2013 по 2020 годы с марта по ноябрь для каждого года:

```
ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
```

```

        .filter(ee.Filter.date('2013-01-01', '2020-12-31'))
        .filter(ee.Filter.calendarRange(3, 11, 'month'));

```

Визуализация данных в окне карты осуществляется с помощью оператора `Map.addLayer`, например,

```

Map.addLayer(buz_moth, {color: 'red'}, 'Name');

```

– визуализация векторного слоя `buz_moth` красным цветом по значению атрибута `Name`.

Операция `reduce` применяется для попиксельного вычисления статистической характеристики из `image collection`. Это сокращает коллекцию изображений до одного изображения. Для базовых статистик, таких как `min`, `max`, `mean` и т. д., `ImageCollection` имеет методы быстрого доступа, такие как `min()`, `max()`, `mean()` и т. д. В данном примере определяются медианные значения изображений в коллекции:

```

var burnMedian = burnedArea.reduce(ee.Reducer.median());

```

Данные можно не только визуализировать в окне карты, но и строить графики. Например, для вывода графика среднего значения параметра в пределах полигона `Buzim` используется оператор `print`:

```

print(Chart.image.series(parameter, Buzim, ee.Reducer.mean(),
30).setOptions(options));

```

На следующем шаге из отфильтрованных данных необходимо извлечь характеристики для объектов (по маскам): по векторным объектам – точкам, включая выбор пиксели в Инспекторе, по линии – профили, по полигону. Для выделения анализируемой территории можно использовать и растровые маски из других наборов растровых данных.

Для вычисления специфических характеристик данных, например, вегетационных индексов, используются функции, как встроенные, так и созданные пользователем. Функция применяется к каждому изображению, выбранному из коллекции.

Для анализа трендов по узлам сетки (гридам) и по векторным объектам существует встроенная функция построения трендов `formaTrend(covariates, windowSize)`. Результат ее выполнения – четыре растра в формате с плавающей запятой: долгосрочные `long-trend` и краткосрочные `short-trend` тренды, `t-тест` долгосрочного тренда `long-tstat` по отношению к временным рядам и тест Брюса – Хансена на стабильность параметров `hansen-stat`.

Пример использования. Проведен анализ динамики лесного покрова и стока в бассейнах рек Сым и Кас на участках, где лесной покров уничтожен во время вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в 2017-2018 годах.

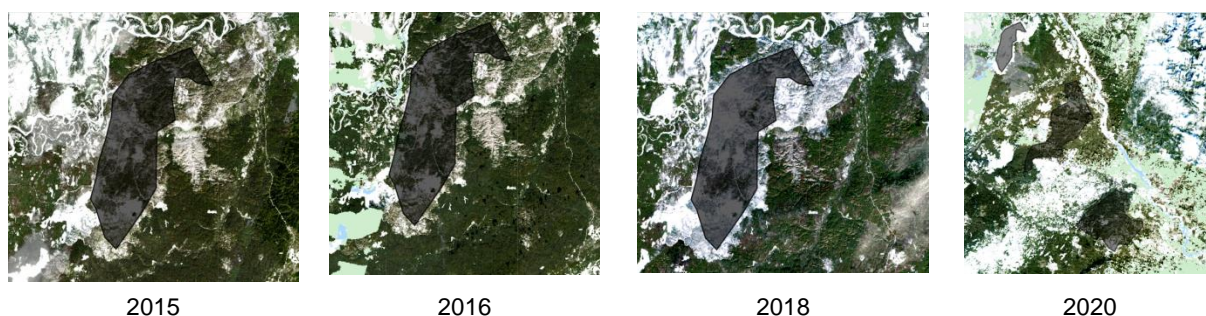


Рис. 2. Территория погибших в 2013 году лесов на снимках 2015-2020 годов

На рисунке 3 показано, что даже в 2018 году на анализируемой территории присутствовали по крайней мере стволы погибших деревьев. И только в 2020 году участок выглядит как безлесный.

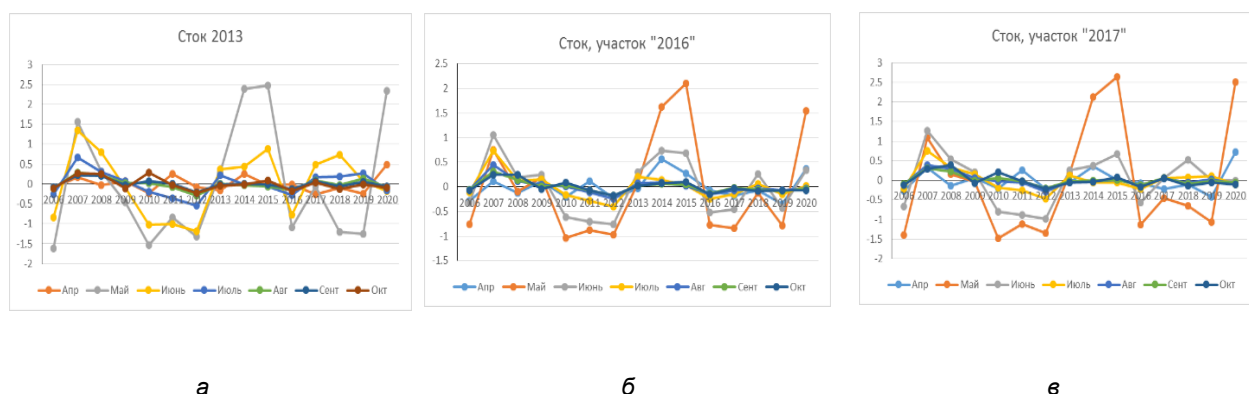


Рис. 3. Динамика аномалий стока, средние значения в день за месяц на участках погибших лесов: а – в 2013 г., б – в 2016 г., в – в 2017 г.

Гибель лесного покрова в результате повреждения сибирским шелкопрядом приводит к постепенному изменению подстилающей поверхности в течение нескольких лет (рисунок 2) и не приводит к одномоментному изменению величины стока (рисунок 3).

Список литературы

1. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone//Remote Sensing of Environment. – 2017, vol. 202. – P. 18–27.
2. Лобанов В. Earth Engine от Google — уникальная платформа для анализа больших геоданных//[https:// URL: habr.com/ru/post/500020/](https://habr.com/ru/post/500020/), 2020, May.

E. V. Fedotova¹, A. A. Gosteva²

¹ FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² SFU, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: elfed@ksc.krasn.ru, AGosteva@sfu-kras.ru

USING OF GOOGLE EARTH ENGINE IN MONITORING SYSTEMS

The paper discusses the procedures for using the Google EarthEngine (GEE) cloud service to solve monitoring problems. The use of cloud-based geographic information systems facilitates the operational analysis of spatial data and expands the range of users due to its use by specialists in applied fields. The work was carried out on the example of the territories of the Krasnoyarsk Region. The operations of data extraction from data bases were used: data filtering from sets, functions construction, graphs, trends; data selection using vector and raster masks. The GEE interface in the form of JavaScript scripts is used.

Keywords: Google EarthEngine, databases, spatial analysis

А. С. Гаченко, А. Е. Хмельнов

Кандидат технических наук, Институт динамики систем
и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail: hmelnov@icc.ru, gachenko@icc.ru

ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА РЕК И ВОДОХРАНИЛИЩ

В статье авторами рассмотрены технологии построения рельефа прибрежной территории водных объектов. Такая информация представляет большой интерес для решения ряда задач, связанных с изменениями уровня воды. Разработаны методы для решения этой проблемы, которые основываются на различных исходных данных: метод объединения надводного с подводным рельефов по полученным измерениям подводной части, а также получение береговой линии по спутниковым данным. Описанные в работе технологии были апробированы для решения практических задач и показали свою эффективность в научных проектах. Разработано специализированное программное обеспечение и использованы данные по рельефу из различных источников для уточнения, детализации и получения конечного результата.

Ключевые слова: рельеф, изолинии, моделирование, прогнозы, береговая линия, наводнения.

Для решения многих научных задач необходима информация о подводном рельефе. При выполнении работ по моделированию зон затопления на реке Ангара (в том числе Иркутского водохранилища) авторы проанализировали имеющиеся источники информации о батиметрии и пришли к выводу о том, что наиболее качественные данные о подводном рельефе можно получить из лоцманских карт, которые всё равно являются очень схематичными, поэтому авторы разработали технологию морфинга карт для их совмещения с топографическими картами [1]. Дальнейшее сравнение полученных данных с результатами промеров дна с лодки эхолотом на отдельных участках акватории Братского водохранилища показало, что они могут существенно отличаться [2].

Таким образом, для уточнения модели подводного рельефа требуется найти дополнительные источники информации о глубинах. При этом использование эхолота является очень трудоёмким и дорогим, поэтому не получится таким образом обработать всю акваторию протяжённого водного объекта. Более широкий захват дна под судном позволяет получить многолучевой эхолот [3], но такой прибор не может эффективно работать на мелководье.

При помощи современных ГИС-технологий: QGIS и оригинального программного обеспечения (TINSmith) с использованием триангуляции Делоне [1,2] было проведено моделирование зон возможного затопления при поднятии уровня воды на водном каскаде ГЭС реки Ангара. Выявлены опасные участки и населенные пункты, которым представляет опасность при различных сценариях водности.

Для данных методик использовались рельефы из открытых источников SRTM, ALOS, лоцманские карты и векторная карта в масштабе 1:50000. 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: плано-высотная основа (рельеф), поверхности водохранилищ (поверхности с постоянной высотой), реки, ручьи (линейные и площадные объекты) используются для коррекции рельефа. При работе с подводной частью используются отметки урезов воды и данные о подводном рельефе. Реализован алгоритм коррекции рельефа, построенного по изолиниям. 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 метров и изолиниями через 20 см.

Далее авторами предложен метод построения прибрежного подводного рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Наиболее широкий охват крупных площадных объектов позволяют получить спутниковые наблюдения. Съёмка с таких спутников, как Sentinel и LandSat выполняется регулярно, и такие данные распространяются свободно при разрешении 10 м/пиксел для основных каналов [4]. Существуют методы использования данных ДЗЗ для получения информации о подводном рельефе до некоторой глубины. В работе [5] сделан обзор различных подходов к решению этой задачи. Среди них: использование стереоскопических спутниковых изображений высокой точности, обработка спутниковых радарных изображений различных типов, инверсия батиметрии из данных о цвете воды, восстановление батиметрии по характеристикам волнения.

Большинство из этих методов требует использования данных ДЗЗ, которые нельзя получить бесплатно. Наибольший интерес здесь для нас представляют методы инверсии батиметрии из данных о цвете воды, поскольку они могут быть применены к свободно распространяемым данным. При этом для применения этих методов может потребоваться калибровка и анализ точности результатов, и здесь может быть восстановлен предлагаемый в этой статье подход.

На протяжении нескольких лет Ангаро-Байкальский бассейн находился в состоянии малой водности, которое закончилось в 2019 году. За это время уровень воды Байкала и Иркутского водохранилища изменился в достаточной степени для того, чтобы можно было найти линии уровня прибрежного рельефа по спутниковым данным, просто отслеживая изменения положения береговой линии. Другой объект в Иркутской области, подходящий для проверки рассматриваемой технологии – это Братское водохранилище, на котором за год происходят изменения уровня воды до 10 м. Все рассматриваемые объекты имеют большую площадь, поэтому использование любых платных источников данных сразу существенно увеличивает бюджет проекта. Поэтому задачей нашего исследования было выяснение того, какой наилучший результат можно получить с использованием свободно распространяемых данных ДЗЗ. Основная проблема с этими данными состоит в том, что они имеют достаточно низкое разрешение 10 м на пиксел, что может быть недостаточно для обнаружения изменений уровня воды в диапазоне менее 1 м.

Ранее в ходе выполнения проекта, для которого требовался подводный рельеф, авторы делали попытку применить эти данные с использованием традиционно предлагаемого для решения этих задач подхода:

- 1) вычисляем растр NDWI (для Sentinel используем каналы B03 -Green и B08 – Visible and Near Infrared);
- 2) выполняем бинаризацию этого растра по некоторому порогу;
- 3) векторизуем бинарный растр, что приводит к получению зигзагообразных линий, проходящих по границам прямоугольных пикселей;
- 4) сглаживаем найденные линии. После анализа полученных таким образом береговых линий был сделан вывод о недостаточной точности растров с разрешением 10 м на пиксел для решения рассматриваемой задачи отслеживания изменений береговых линий.

Далее требуется определить: изолиния какого уровня соответствует береговой линии. Для выбора наиболее подходящего порога лучше всего подходят объекты, имеющие чёткую границу с водой при любом направлении съёмки, например мосты: выбираем уровень, при котором мост чётко отделяется от воды. После выделения береговой линии на отдельном снимке, необходимо сопоставить эти линии с результатами обработки других снимков, полученных при других уровнях воды. Здесь мы сталкиваемся с проблемой точности позиционирования спутниковых данных: для работы на субпиксельном уровне её оказалось недостаточно. Может потребоваться немного сдвинуть используемые снимки, чтобы добиться совмещения каких-то заметных объектов, находящихся близко к уровню береговой линии.

На Рисунке 1 показаны примеры результатов такой обработки. Здесь представлены изолинии за 2016 г. и 2020 г., полученные при близких уровнях Байкала (456.45 м и 456.52 м), а также изолиния за 2017 г. на уровне 456.02 м. Видно, что близкие по уровню изолинии переплетены друг с другом, что позволяет оценить точность получаемых рассматриваемым методом результатов.



Рисунок. Изолинии растров NDWI с трёх снимков на фоне Яндекс Спутник, даты и уровни воды – в подписях к изолиниям.

При этом надо учесть, что часть отличий может объясняться реальными изменениями, произошедшими за 4 года. Близкие по уровню изолинии можно усреднять для получения более точного результата, в котором нивелируются случайные по-

грешности. Для этого проще всего строить изолинии по усреднённому растру NDWI. Таким образом, выделение изолиний на растрах NDWI, соответствующих разным уровням воды, позволяет получить по открытым спутниковым снимкам контуры изолиний с точностью, достаточной для того, чтобы можно было построить модель прибрежного подводного рельефа, которая согласуется с моделями наземного и подводного рельефа для большей глубины.

Список литературы

1. Bychkov I., Gachenko A., Rugnikov G., Hmelnov A. 3-D modeling of Angara river bed // Proceedings of the International Conference Mathematical and Information Technologies, 2016, P. 26-32.
2. Gachenko A.S., Hmelnov A.E, Hmelnova T.F., Rugnikov G.M. The use of triangulation processing algorithms for the construction of combined model of the underwater and above-water terrain of the bed of the Bratsk Reservoir, // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. Vol. 190 012028
3. Gubin N.A., Grigorev K.A., Poletaev A.S. and Chensky A.G. Combined hydroacoustic research of Lake Baikal. J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1728 012005
4. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services // Remote Sensing of Environment. 2012. vol. 120, P. 25–36.
5. Salameh E., Frappart F., Almar R., et al. Monitoring Beach Topography and Nearshore Bathymetry Using Spaceborne Remote Sensing: A Review // Remote Sensing. 2019; vol. 11(19):2212.

A. E. Hmelnov, A. S. Gachenko

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IDSTU SB RAS), Irkutsk, Russia
e-mail: gachenko@icc.ru, hmelnov@icc.ru

TECHNOLOGIES FOR RIVER AND RESERVOIR RELIEF MODELING

In this article the authors review the technologies of constructing the coastal territory of water bodies relief. Such information is of great interest for solving a number of problems associated with fluctuation in stage. They worked out the methods to solve this problem, which are based on various base data: the method of combining the surface with the underwater relief under the obtained measurements of the underwater part, as well as getting the coastline from satellite data. The described in the article technologies were approved to deal with practical problems and showed their efficiency for scientific projects. The authors developed specialized software and tested it using data on the relief from various sources for clarification, detailing and obtaining the final result.

Keywords: isolines, relief; modeling, forecasts, coastline, floods.

А. П. Шевырнов, И. Ю. Ботвич, Д. В. Емельянов

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: irina.pugacheva@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ УРОЖАЙНОСТИ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПО СПУТНИКОВЫМ И БЕСПИЛОТНЫМ ДАННЫМ

Сельское хозяйство является одной из перспективных областей внедрения технологий дистанционного зондирования Земли. С их помощью можно своевременно получать широкий спектр динамической информации об условиях роста и развития сельскохозяйственных культур и вносить необходимые коррективы для получения запланированного результата. В работе представлены результаты раннего прогнозирования урожайности яровой пшеницы на основе спутниковых данных Dove (PlanetScope) компании Planet Labs и беспилотных данных DJI P4 Multispectral. Построены карты урожайности яровой пшеницы по спутниковым и беспилотным данным с пространственным разрешением 3 м и 5 см, соответственно. Проведена статистическая оценка неоднородности спектральных оптических характеристик посевов сельскохозяйственных культур. Определена степень корреляционной зависимости между величиной интеграла индексов (NDVI, VARI, MSAVI2, ClGreen) и урожайностью в разные периоды вегетации.

Ключевые слова: точное земледелие, урожайность, вегетационный период, яровая пшеница, PlanetScope, DJI P4 Multispectral.

Повсеместное внедрение энергосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур направлено на снижение материально-технических затрат при производстве продукции растениеводства. Повышение уровня рентабельности сельскохозяйственного производства в современных условиях возможно только на основе внедрения современных энергосберегающих технологий возделывания культурных растений с использованием элементов точного земледелия. Методы дистанционного зондирования земной поверхности дают возможность прогнозировать уровень урожайности полевых культур и, в то же время, оценивать состояние посевов (засоренность, густоту стояния культурных растений, повреждение вредителями и болезнями, состояние посевов после перезимовки и т.п.) и, в конечном итоге, управлять производственным процессом. Цель данного исследования – разработка метода точного земледелия для раннего прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования (спутниковых) и геоботанических исследований.

Исследования проводились на землях ООО учхоз «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края в течение вегетационных периодов 2019 – 2020 гг. Опытное поле состоит из 5 полос. В работе представлен анализ результатов обработки данных по полосам, засеянным пшеницей “Новосибирская-15”. Поля разделены на 4 тестовых участка в соответствии с четырьмя видами обработки почв: вспашка (ПН-5-35 на 20–22 см); плоскорезная обработка (КПШК-3,8 на 20-22 см); поверхностная обработка (дискатор БДШ-5,6 на 8-10 см); прямой посев при нулевой обработке почвы (Агратор 4,8). Внесение удобрений производилось по северной части каждой полосы (шириной 10 м), южная оставалась без удобрений.

Исследование основывается на спутниковых данных PlanetScope с пространственным разрешением 3 метра и данных съемок DJI P4 Multispectral (5 см). По спутниковым и беспилотным спектрофотометрическим данным проводился расчет спектральных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [1], VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) [2], MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) [3], ClGreen (Green chlorophyll index) [4].

Расчет криволинейного интеграла исследуемых индексов (I) проводится по формуле:

$$I = \sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{V_k + V_{k+1}}{2} \right) \cdot (d_{k+1} - d_k) \right)$$

где V_k - значение вегетационного индекса, d_k - время (день съемки), n - количество измерений.

Для определения связи между интегралами индексных величин и урожайностью посевов пшеницы рассчитаны коэффициент детерминации (r^2) между этими переменными. Урожайность пшеницы была измерена в 4-х кратной повторности на каждом виде обработок (всего 64 участка). Для этих же участков были определены значения интегралов индексов NDVI, MSAVI2, VARI, ClGreen.

Анализ связи между урожайностью и величиной интеграла в течение периода вегетации 2020 г. (по беспилотным данным) показал, что с начала июля величина r^2 достигает достаточно значимых величин (от 0.42 до 0.5) для всех индексов, при этом минимальное значение имеет интеграл NDVI, максимальные ClGreen и MSAVI2. Максимальные величины достигнуты к 20 августа – 0.64 (ClGreen) и 0.69 MSAVI2. Максимальные величины интеграла NDVI – 0.71 к первым числам сентября.

Анализ связи между урожайностью и величиной интеграла в течение периода вегетации 2020 г. (по спутниковым данным) показал наличие более выраженного плато. В конце июня (26.06.2020) величина r^2 достигает достаточно высоких величин, более 0.7 для MSAVI2 и ClGreen. Для значений NDVI значения r^2 существенно ниже 0.59. Наиболее низкие значения получены для интеграла VARI 0.53.

Анализ связи между урожайностью и величиной интеграла в течение периода вегетации 2019 г. (по спутниковым данным) показал, что наибольшие значения коэффициент детерминации r^2 имеет при использовании интеграла NDVI. С первых чисел июля r^2 превышает величину 0.86. Наиболее низкие значения в этот период времени были у интеграла VARI. В конце периода вегетации (перед уборкой) все интегралы индексов показали высокую степень связи с урожайностью – от 0.84 для VARI до 0.93 для NDVI, значения детерминации MSAVI2, ClGreen равны 0.9.

Таким образом, анализ данных, полученных за два года исследований по спутниковым и беспилотным измерениям, позволяет сделать вывод, что наиболее оптимальным и надежным является использование интегралов индекса MSAVI2.

Для прогнозирования урожайности посевов пшеницы в начале июля 2020 г. построены линейные регрессионные модели, в которых в качестве параметров использованы значения интеграла под кривой MSAVI2 в разные периоды времени. Множественная линейная модель для прогноза пшеницы по спутниковым данным имеет вид при 6 переменных (коэффициент детерминации 0,72):

$$Y = -50.73 + 14.17 \times Imsavi2_1 + 5.38 \times Imsavi2_2 - 13.18 \times Imsavi2_3 - 5.22 \times Imsavi2_4 - 19.14 \times Imsavi2_5 + 23.4 \times Imsavi2_6$$

Множественная линейная модель для прогноза пшеницы по беспилотным данным имеет вид при 2 переменных (коэффициент детерминации 0,49):

$$Y = 14.33 - 627.23 \times Imsavi2_1 + 429.31 \times Imsavi2_2$$

где $Imsavi2_i$ – значение интеграла под кривой MSAVI2 в момент времени i ; Y - величина урожайности, ц/га.

Проведенные расчеты позволили построить картограмму урожайности исследуемого участка. На рисунках 1 – 2 (I и II) показаны пространственные распределения урожайности исследуемых участка посевов пшеницы, полученные по результатам модельных расчетов по беспилотным (I) и спутниковым данным (II).

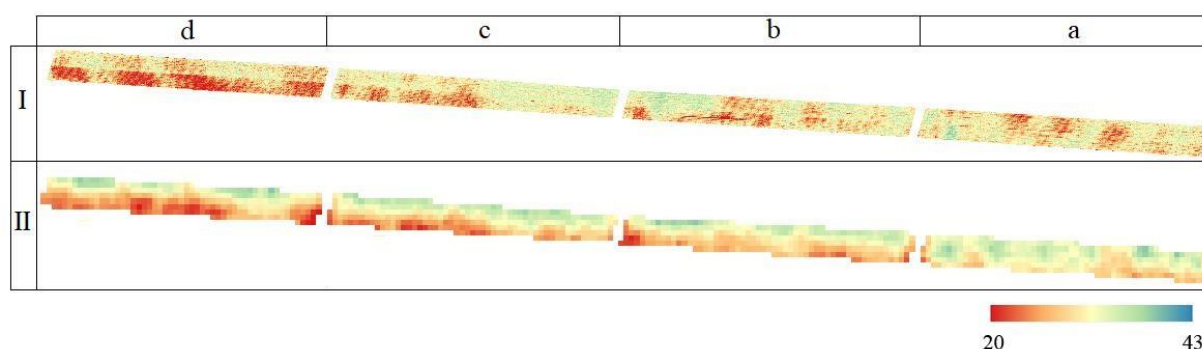


Рис. 1. Карты урожайности посевов яровой пшеницы по пару (3 полоса), полученные по результатам модельного расчета по беспилотным данным (I) и результатам модельного расчета по спутниковым данным (II)

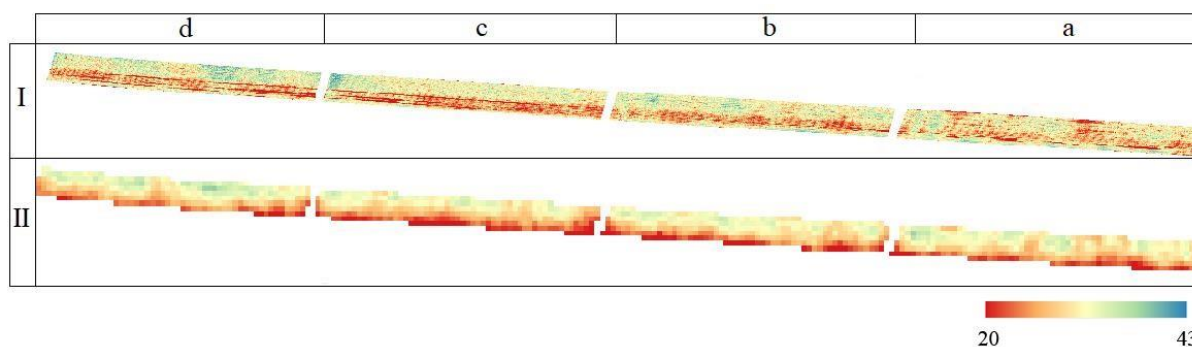


Рис. 2. Карты урожайности посевов яровой пшеницы по кукурузе (5 полоса), полученные по результатам модельного расчета по беспилотным данным (I) и результатам модельного расчета по спутниковым данным (II)

Сопоставление картограмм, полученных по результатам модельного расчета по беспилотным (I) и спутниковым (II) данным (рис. 1, 2), показывают подобие пространственного распределения урожайности. Более высокое пространственное разрешение беспилотных данных (5 см) дает более четкую картину, свидетельствующую о неоднородности посевов, в том числе от наличия и отсутствия удобренного фона. В дальнейшем, полученные по беспилотным данным карты могут быть успешно применены при дифференцированном внесении удобрений и отборе почвенных образцов.

Исследование выполнено при поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках реализации проекта: «Разработка и внедрение метода раннего прогнозирования урожайности зерновых культур в Сибирском регионе по данным дистанционного зондирования Земли».

Список литературы

1. Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor // *Ecology*. 1969. Vol. 50. P. 663–666.
2. Gitelson A.A., Stark R., Grits U., Rundquist D., Kaufman Y., Derry D. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction// *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23. P. 2537–2562.
3. Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Y.H. Kerr Y.H., Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index // *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 48. P. 119–126.
4. Dall'Olmo G., Gitelson A.A., Rundquista D.C., Leavitt B., Barrow T., Holz J.C. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands // *Remote Sensing of Environment*. Vol. 96. P. 176–187.

A. P. Shevyrnogov, I. Yu. Botvich, D. V. Emelyanov

Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia,

E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

CROP YIELD MAP DEVELOPMENT BASED ON SATELLITE AND UAV DATA

Agriculture is one of the promising areas for the introduction of remote sensing technologies. With its help, you can timely receive a wide range of dynamic information about the conditions for the crops growth and development and make the necessary adjustments to obtain the planned result. The paper presents the results of early forecasting of spring wheat yields based on Dove (PlanetScope) satellite data from Planet Labs and DJI P4 Multispectral unmanned data. The maps of the yield of spring wheat were constructed using satellite and unmanned data with a spatial resolution of 3 m and 5 cm, respectively. A statistical assessment of the inhomogeneity of the spectral optical characteristics of agricultural crops has been carried out. The degree of correlation dependence between the value of the integral of the index (NDVI, VARI, MSAVI2, CIGreen) and the yield in different periods of the growing season has been determined.

Keywords: precision farming, yield, growing season, spring wheat, PlanetScope, DJI P4 Multispectral.

М. М. Шляхова

Кандидат технических наук, Сибирский государственный университет
геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
e-mail: m.m.shlyahova@sgugit.ru

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАЩИТНЫХ
СООРУЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Основное назначение магистральных трубопроводов заключается в транспортировке нефтепродуктов от пункта до пункта назначения. Следовательно, протяженность его может составлять тысячи километров, чаще всего он расположен в сложных природных и климатических условиях. Для его постоянной работоспособности и защиты от аварий или поломки, необходимо выполнять пассивный или активный контроль защитных сооружений с помощью 3D-технологий. В статье кратко описана технология создания 3D-моделей по материалам воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки.

Ключевые слова: 3D-модель, данные воздушного лазерного сканирования, магистральные трубопроводы, защитные сооружения.

Транспортировка продуктов нефтедобычи выполняется в основном трубопроводным способом, что несет риски аварий и в свою очередь разлив нефти. Использование 3D моделей для контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов является актуальной задачей, так как позволяет получать реалистичные данные о состоянии объекта съемки и в дальнейшем принимать решения о выявлении отклонений от заданных параметров. Точность и детальность 3D моделей в основном будет зависеть от выбранной технологии сбора информации. Существуют классификация защитных сооружений в зависимости типа материала.

В зависимости от материала, из которого состоит защитное сооружение магистрального трубопровода, выделяют два основных типа: земляные и бетонные. В работе [1] были выделены основные критерии контроля точности (таб. 1).

Таблица 1

Выбор технологии сбора данных в зависимости
от типа защитного сооружения

Тип защитного сооружения	Точность в плане	Точность по высоте	Технология сбора данных для создания 3D моделей защитных сооружений
Земляное сооружение	15 см	15 см	Аэрофотосъемка, воздушная лазерная съемка
Бетонное сооружение	10 мм	15 мм	Воздушная и наземное лазерное сканирование

В северных районах основным защитным сооружением являются земляные сооружения, для контроля которых рационально использовать методы воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки. При применении данной технологии сбора

информации получают следующие типы данных: цифровая модель рельефа и местности, а также информация о текстуре поверхности [2, 3].

Для построения 3D модели используются следующие технологические процессы (рисунок 1) [4].

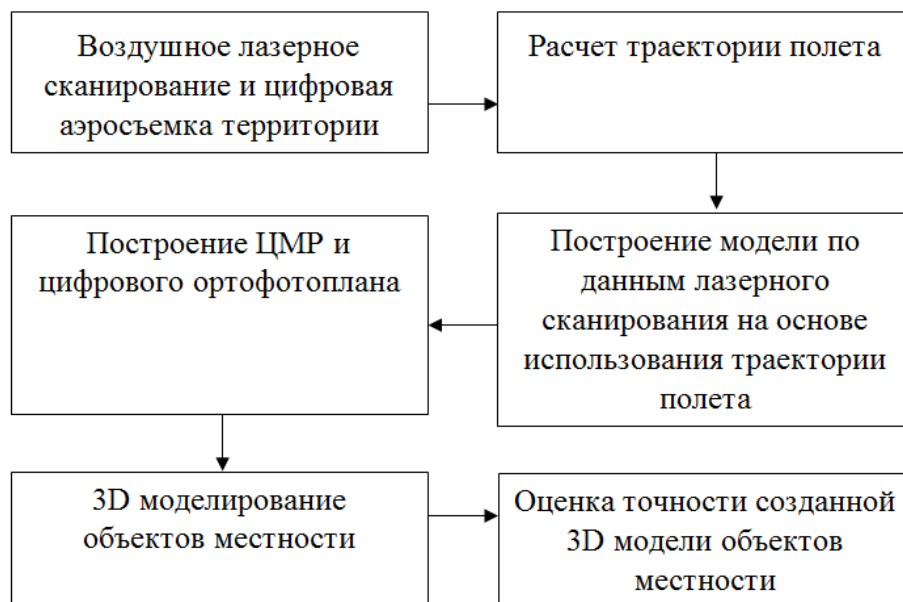


Рис. 1. Схема обработки данных лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки для создания 3D моделей

Для создания 3D моделей магистральных трубопроводов и защитных сооружений выполнялась стереофотограмметрическая и лазерная съемка с использованием лазерного сканера Leica ALS-60 и цифрового аэрофотоаппарата Leica RCD 105 (рисунок 2). Следующий этап заключался в построении цифровой модели рельефа и цифрового ортофотоплана. В результате чего создавалась каркасная 3D модель и выполнялась оценка точности, путем определения точек на фотоизображении и готовой модели, после этого находили коэффициенты аффинного преобразования и координаты элементов текстуры. Результат оценки точности СКО по высоте 0,33 м, в плане 0,57 м. [5].

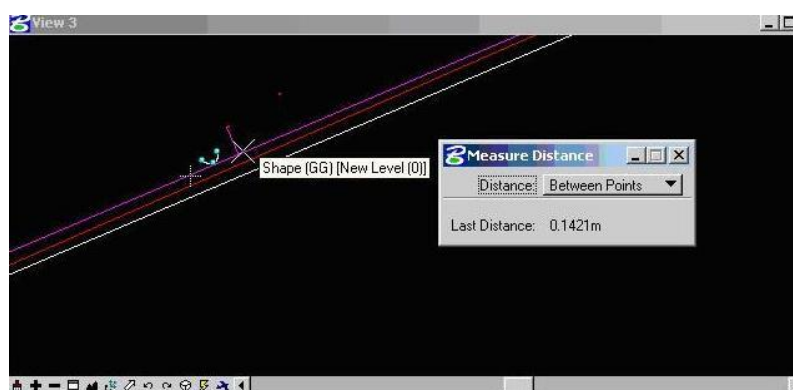


Рис. 2. Измерение расхождения между моделями

Таким образом, зная точность контроля защитных сооружений и выбора методов съемки можно с максимальной точностью создавать 3D модели, чтобы своевременно выявлять потенциально опасные участки трубопроводов и снижать риск возникновения аварий.

3D модели позволяют отслеживать изменения и автоматически моделировать ситуации в трехмерной форме участка отклонений от предельных значений. Использование 3D моделей защитных сооружений магистральных трубопроводов, позволяет: проводить пассивный и активный контроль защитных сооружений, который заключается в оценке отклонённый от проектных значений, а также в динамической оценке расхождения между объектами; осуществлять мониторинг состояния трубопровода и конкретных сооружений; моделировать аварийные ситуации по материалам различных датчиков (давление, температура) и предотвращать их.

Следует отметить, что транспортировка сырья осуществляется различными способами, но трубопроводный до сих пор является наиболее выгодным и безопасным способом. Чтобы не допускать аварийных ситуаций необходимо производить 3D мониторинг, используя методы дистанционного зондирования, и на основании полученной информации осуществлять построение 3D моделей с максимальной точностью и детальностью. С помощью таких моделей выявляются и анализируются проблемы на участках трубопровода с целью их быстрой ликвидации аварий или поломок, следовательно, можно избежать экологических катастроф.

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. Комиссаров А.В., Шляхова М.М., Алтынцев М. А., Кулик Е. Н. Критерии контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 96–104.
2. Дедкова В.В., Шляхова М.М. Мониторинг технического состояния магистральных трубопроводов методами дистанционного зондирования // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Международной научной конференции, Красноярск, 29 сент.- 2 окт. 2020 г. – С. 192–195.
3. Шляхова М.М., Дедкова В.В. Перспективы применения аэросъемок для контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Международной научной конференции, Красноярск, 29 сент.- 2 окт. 2020 г.– Красноярск, 2020. – С. 316–319.
4. Гук А.П., Шляхова М.М. Разработка методик создания 3D моделей по аэрокосмическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения и другим данным дистанционного зондирования // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С.32-34.
5. Гук А.П., Шляхова М.М. Некоторые проблемы построения реалистичных измерительных 3D моделей по данным дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ 4 (32), 2015. – С. 51-60.
6. Гук А.П., Шляхова М.М., Брежнев Р.В. Потенциальные возможности использования реалистичных 3D моделей, построенных по цифровым снимкам для решения широкого круга задач // Национальная научно-практическая конференция «Регулирование земельно-имущественных отношений в России» 2018, СГУГиТ, Т.1. – С. 172-176.

M. M. Shlyahova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

e-mail: m.m.shlyahova@sgugit.ru

THE USE OF 3D MODELS FOR MONITORING THE PROTECTIVE STRUCTURES OF MAIN PIPELINES

The main purpose of trunk pipelines is to transport petroleum products from point to destination. Therefore, its length can be thousands of kilometers, most often it is located in difficult natural and climatic conditions. For its constant performance and protection from accidents or breakdowns, it is necessary to perform passive or active monitoring of protective structures using 3D technologies. The article briefly describes the technology of creating 3D models based on the materials of aerial laser scanning and aerial photography

Keywords: 3D model, aerial laser scanning data, main pipelines, protective structures.

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ

УДК 528.88

Е. В. Варламова¹, В. С. Соловьев^{1,2}

¹ Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия
e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Проведено исследование пространственно-временной динамики TIN растительного покрова Восточной Сибири по многолетним (1982-2015 гг.) спутниковым данным (продукт GIMMS NDVI3g). Показано, что за исследуемый период на территории Восточной Сибири, в целом, наблюдается положительная динамика TIN. Наиболее сильные тренды (на 13,6%) локализованы на севере Якутии в условиях значительного роста (на 1,90С) среднегодовой температуры воздуха, и не столь существенного изменения (на 31 мм) годовой суммы осадков. Положительная тенденция TIN на севере Якутии обусловлена существенным ростом NDVI в мае-июне (на 17-19%), который хорошо согласуется ($R=0,8-0,9$) с вариациями и значительным ростом (на 2,7-3,40С) температуры воздуха в эти месяцы.

Ключевые слова: NDVI, GIMMS, растительный покров, Восточная Сибирь.

Введение. Лесные экосистемы севера вследствие суровых климатических условий обладают низким реабилитационным потенциалом, а динамика их показателей и сложная взаимосвязь с климатическими и антропогенными факторами не изучена до конца. Наблюдаемое изменение климата особенно заметно происходит в высоких северных широтах и, в частности, в Восточной Сибири. Целью данной работы является исследование пространственно-временного отклика TIN растительного покрова Восточной Сибири на потепление климата по многолетним (1982-2015 гг.) спутниковым данным.

Данные и методика. В работе использованы глобальные композиты 15-дневных значений NDVI, полученные на основе данных радиометра AVHRR спутников NOAA (продукт GIMMS NDVI3g, [1]) за период 1982-2015 гг., а также глобальные среднемесячные данные по приземной температуре воздуха и атмосферным осадкам, полученные на основе данных наземных метеостанций (продукт CRU TS v4.05, [2]) за аналогичный период.

На основе 15-дневных NDVI были рассчитаны и построены ежегодные карты распределения интегральных значений индекса NDVI – Time-integrated NDVI (сокращенно TIN) [3] на территорию Восточной Сибири за период 1982-2015 гг. TIN рассчитывается как сумма 15-дневных значений NDVI за период май-сентябрь и отражает общее состояние надземной растительности в течение всего вегетационного периода.

Тренды TIN, среднегодовой температуры воздуха и суммы атмосферных осадков за период 1982-2015 гг. были проанализированы с использованием метода оценочной функции Тейла-Сена [4; 5]. Статистическая значимость трендов оценивалась с помощью критерия значимости Манна-Кендалла [6; 7] на уровне 95% ($p < 0,05$).

Результаты. Карта распределения тренда TIN за исследуемый период (1982-2015 гг.) на территории Восточной Сибири представлена на рис. Как видно из рис., на исследуемой территории, в целом, наблюдается положительная динамика TIN. Наиболее сильные значимые тренды TIN (выше 10%) локализованы на севере Якутии выше 65-й параллели северной широты и отмечены на рисунке чёрным контуром. Среднее значение тренда TIN в этой области (далее по тексту – «на севере Якутии») составляет 13,6%.

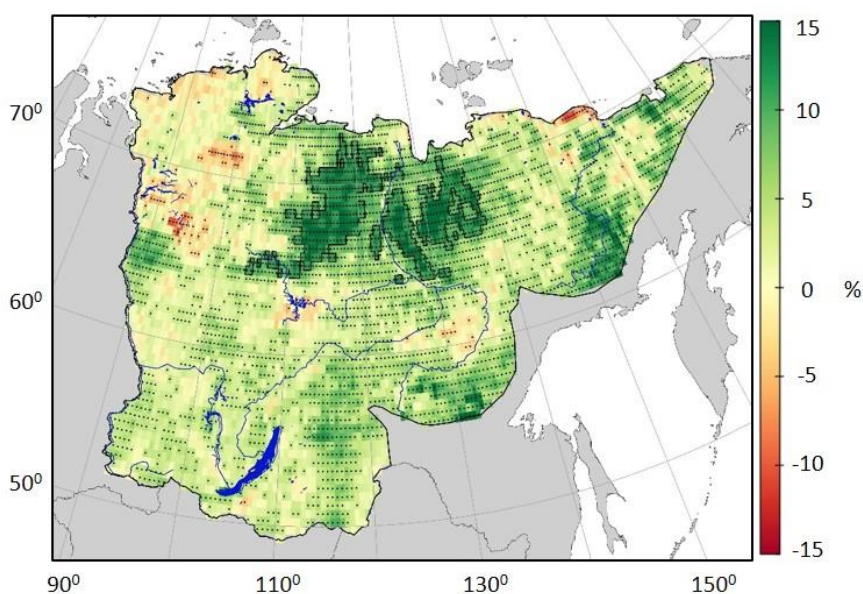


Рис. Карта тренда TIN (%) на территории Восточной Сибири за период 1982-2015 гг. Статистически значимые тренды ($p < 0,05$) обозначены чёрными точками. Территория со значимым трендом TIN выше 10% отмечена чёрным контуром

Таблица

Значения трендов среднемесячных вариаций NDVI (%) и температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на севере Якутии за период 1982-2015 гг. Стандартная ошибка оценки указана в скобках. Статистически значимые тренды ($p < 0,05$) обозначены звездой. Значения коэффициентов корреляции между вариациями NDVI и температуры приведены в R

	NDVI	Температура	R
Май	19 (± 5)*	3,4 ($\pm 1,6$)*	0,82
Июнь	17 (± 6)*	2,7 ($\pm 1,4$)*	0,88
Июль	10 (± 2)*	1,3 ($\pm 1,3$)	0,35
Август	10 (± 3)*	1,7 ($\pm 1,1$)*	0,54
Сентябрь	10 (± 8)*	0,6 ($\pm 1,2$)	0,17

Следует отметить, что значимый рост среднегодовой приземной температуры воздуха за аналогичный период наблюдается преимущественно на севере Восточной Сибири. Однако, изменение годовой суммы осадков на всей территории, в целом, не

столь существенно. При этом средние значения трендов температуры воздуха и осадков на севере Якутии составляют $1,9 (\pm 0,8)^{\circ}\text{C}$ и $31 (\pm 27)$ мм, соответственно.

Значения трендов среднемесячных вариаций NDVI и температуры воздуха за рассматриваемый период на севере Якутии приведены в таблице. Как видно из таблицы, значительная тенденция роста (на 17-19%) NDVI и температуры воздуха (на $2,7-3,4^{\circ}\text{C}$) наблюдается в мае-июне. Также отмечено хорошее согласие между вариациями NDVI и температуры в мае-июне, значения коэффициентов корреляции составили $R=0,8-0,9$.

Выводы. Показано, что за 1982-2015 гг. на территории Восточной Сибири, в целом, наблюдается положительная динамика TIN. Наиболее сильные тренды (на 13,6%) локализованы на севере Якутии в условиях значительного роста (на $1,9^{\circ}\text{C}$) среднегодовой температуры воздуха, и не столь существенного изменения (на 31 мм) годовой суммы осадков. Положительная тенденция TIN на севере Якутии обусловлена существенным ростом NDVI в мае-июне (на 17-19%), который хорошо согласуется ($R=0,8-0,9$) с вариациями и значительным ростом (на $2,7-3,4^{\circ}\text{C}$) температуры воздуха в эти месяцы.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № АААА-А21-121011990007-1)

Список литературы

1. Pinzon J.E., Tucker C.J. A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series // Remote Sens. 2014. Vol. 6. P. 6929–6960. doi:10.3390/rs6086929.
2. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Sci Data. 2020. V. 7. P. 109. doi: 10.1038/s41597-020-0453-3.
3. Bhatt U.S. et al. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environ. Res. Lett. 2017. Vol. 12. No. 5. doi:10.1088/1748-9326/aa6b0b.
4. Theil, H. 1950. A Rank Polynomial- and Linear-Invariant Method of Regression Analysis no. 1: 386–392.
5. Sen, P.K. 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. 63: 1379–1389.
6. Mann, H.B. 1945. Non-Parametric Tests against Trend. Econometrica no. 13: 245–259.
7. Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods. 4th ed. London: Griffin.

E. V. Varlamova¹, V. S. Solovyev^{1,2}

¹ Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

² M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

STUDY OF VEGETATION COVER DYNAMICS IN EASTERN SIBERIA ON REMOTE SENSING DATA

Investigate of the spatio-temporal dynamics of vegetation cover TIN in Eastern Siberia was carried out using the long-term (1982-2015) satellite data (GIMMS NDVI3g). An analysis of TIN annual variations during the study period showed the positive trend of TIN prevails over Eastern Siberia. The significant increase (13.6%) of TIN is located in the northern part of Yakutia in conditions of significant increase ($1,9^{\circ}\text{C}$) of average annual air temperature and negligible change (31 mm) of amount precipitation. This greening trend in the northern part of Yakutia is mainly due to a significant increase (17-19%) of NDVI in the May-June months. At the same time, there is a significant increase ($2,7-3,4^{\circ}\text{C}$) in air temperatures in these months. The variations between NDVI and temperatures have a close relation ($R=0,8-0,9$).

Keywords: NDVI, GIMMS, vegetation cover, Eastern Siberia.

С. А. Васильева

Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю. Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия e-mail: tomskaya@ikfia.ysn.ru

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО МЕТАНА НА ВЫСОКИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Проведены предварительные исследования пространственно-временных вариаций распределения метана на высоких широтах северного полушария по данным AIRS и JR-STATION. Анализ показал, что наблюдается заметный рост (~4 %) концентрации метана в приземной атмосфере и верхней тропосфере. В сезонном цикле 2004–2018 гг. содержание метана по наземным данным имеет известные зимний (февраль) и летний (июль– август) максимумы. В верхней тропосфере сезонные вариации метана по данным AIRS имеют схожий с наземными наблюдениями характер, но с меньшей амплитудой.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, метан, AIRS

Введение. В последние десятилетия в высоких широтах северного полушария наблюдается существенное потепление [1]. Изменение климата оказывает значительное влияние на источники метана (CH_4). Потенциал глобального потепления CH_4 превышает аналогичный показатель у CO_2 более чем в 20 раз [2]. Температура воздуха напрямую влияет на источники CH_4 в почве, воздействуя на скорость метаболизма метаногенов [3], а также косвенно – через таяние вечной мерзлоты и изменения глубины грунтовых вод, характеристик снежного покрова [4]. Другие климатические изменения в Арктике, могут увеличить поступление в атмосферу CH_4 из-за возможной дестабилизации гидратов метана в океанских отложениях [5].

Быстрые темпы изменения климата в высоких широтах и расширение антропогенной деятельности в Арктике в будущем могут привести к значительному увеличению эмиссии CH_4 в атмосферу. Которое может поспособствовать усилению темпа нагрева атмосферы. В складывающихся условиях очень важно проводить исследования вариаций атмосферного метана.

Цель данной работы – исследование пространственно-временных вариаций распределения атмосферного метана на высоких широтах северного полушария.

Материалы. Для анализа динамики распределения концентрации CH_4 были использованы данные за 2004-2018 гг. радиометра AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), установленного на спутнике AQUA (продукт AIRX3STM, <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>). В работе были использованы данные уровня 400 гПа, выбор которого был обусловлен максимальной чувствительностью AIRS к CH_4 , зависящей от широты. На средних и высоких широтах Северного полушария он приходится на 400-300 гПа (примерно 7-9 км) [6].

Также были использованы данные сети мониторинга парниковых газов JR-STATION за 2004-2018гг (<http://db.cger.nies.go.jp/portal/>). Сеть мониторинга парниковых газов расположена на территории Западной Сибири. [7].

Результаты и обсуждение. Для исследований был выбран район, захватывающий часть Западно-Сибирской равнины и Среднесибирского плоскогорья (60°-73° с.ш., 68°-126° в.д.). На рис. 1 черными линиями ограничен сектор исследуемого участка, точками показаны расположения четырех наземных станций сети JR-STATION: Игрим, Ноябрьск, Демьянское, Карасевое.

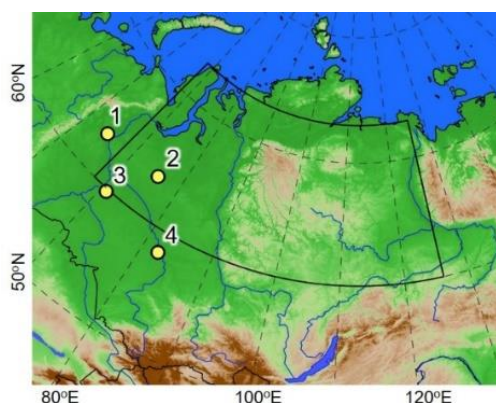


Рис. 1. Расположение тестового участка и наземных станций:
1- Игрим, 2- Ноябрьск, 3-Демьянское, 4-Карасевое

В результате обработки спутниковых и наземных данных, были построены межгодовые и сезонные вариации. На Рис. 2а показаны межгодовые вариации содержания CH₄ по спутниковым и наземным данным за 2004-2018гг. Из Рис. 2а следует, что концентрация CH₄ увеличивается в приземной атмосфере и верхней тропосфере; рост за исследуемый период по данным AIRS составил ~ 67 ppb, по наземным данным ~ 86 ppb.

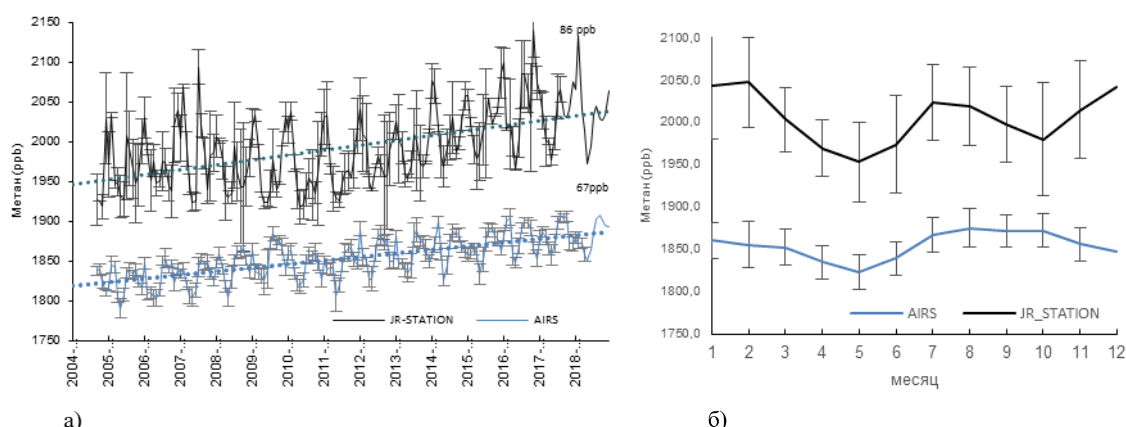


Рис. 2: а) межгодовые вариации концентрации метана, б) сезонный ход концентрации метана по данным AIRS на высоте 400 гПа и усредненных для 4х станций данных JR-STATION

На Рис. 2 б показан сезонные вариации содержания CH_4 по спутниковым и наземным данным за 2004–2018 гг. В приземном слое наблюдается два максимума: зимний (февраль) и летний (июль–август) и два минимума: весенний (май) и осенний (октябрь) [7, 8]. Возрастание концентрации метана в летний период фиксируется с начала мая, когда температура почвы увеличивается, что способствует нарастанию активности метаногенных микроорганизмов и достигает своего пика в июле–августе, отражая сезонный максимум эмиссий CH_4 из болотных экосистем [9]. Сезонные вариации содержания метана в верхней тропосфере имеют схожий характер с вариациями в нижней тропосфере, но имеют меньшую амплитуду. В верхней тропосфере так же наблюдается зимний максимум (январь) и летнее возрастание концентрации метана. Весенний минимум концентрации тоже приходится на май, а зимний минимум (декабрь) менее выражен. Одним из объяснений летнего возрастания метана в верхней тропосфере может быть усиление вертикального переноса с нижней тропосферы летом [10]. Так же в работе [11] авторы показали, что в летний период вклад в содержание метана могут вносить удаленные источники в Европе, Северной Америке и в Азии.

Заключение. Анализ пространственно-временных вариаций распределения атмосферного метана на высоких широтах Северного полушария за 2004–2018 гг. показал, что наблюдается заметный рост ($\sim 4\%$) концентрации метана в приземной атмосфере и верхней тропосфере. В сезонном цикле для рассмотренного в работе периода содержание метана по наземным данным имеет зимний (февраль) и летний (июль–август) максимумы. В верхней тропосфере сезонные вариации содержания метана имеют схожий характер, но имеют меньшую амплитуду. В верхней тропосфере так же наблюдается зимний максимум (январь) и летнее возрастание концентрации метана. Весенний минимум концентрации тоже приходится на май, а зимний минимум (декабрь) менее выражен.

Список литературы

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to AR5. P. 465–570 (Bern, Switzerland, 2016).
2. Отчет Межправительственной группы Экспертов по Изменениям Климата (МГЭИК), 2007 // http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf.
3. Christensen, T. R., Ekberg, A., Ström, L., Mastepanov, M., Panikov, N., Öquist, M., Svensson, B. H., Nykänen, H., Martikainen, P. J., and Oskarsson, H.: Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1414, doi:10.1029/2002GL016848, 2003.
4. Khvorostyanov, D.V., Ciais, P., Krinner, G. and Zimov, S.A. Vulnerability of east Siberia's frozen carbon stores to future warming. *Geophys. Res. Lett.* 35, doi: 10.1029/2008GL033639. 2008.
5. Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Yusupov, V., Kosmach, D., and Gustafsson: Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf, *Science*, 327, 1246–1250, doi:10.1126/science.1182221, 2010.
6. Xiong X., Barnett C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L. and Goldberg M. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // *Journal of Geophysical Research*. Vol. 113. 2008. P. 1–14.
7. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T. et al. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia. *Tellus B*, 2010, vol. 62, pp. 403–416.
8. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуе Г. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO_2 и CH_4 в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири. *Оптика атмосферы и океана*, 2009. Т. 22, № 2. с. 183–192.

9. Kim, H.-S.; Maksyutov, S.; Glagolev, M.V.; Machida, T.; Patra, P.; Sudo, K.; Inoue, G. Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling. *Environ. Res. Lett.* 2011, 6, 035201.

10. Xiong, X., Barnett, C. D., Zhuang, Q., Machida, T., Sweeney, C., and Patra, P. K. (2010), Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, D19309, doi:10.1029/2009JD013796.

11. Мордвин, Е. Ю. Метан в атмосфере Западной Сибири : [монография] / Е. Ю. Мордвин, А. А. Лагутин ; АлтГУ. – Барнаул : [Азбука], 2016. – 148 с. : ил.

S. A. Vasileva

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
e-mail: tomskaya@ikfia.ysn.ru

SPATIAL-TIME VARIATIONS IN THE DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC METHANE AT HIGH LATITUDES OF THE NORTHERN HEMISPHERE

Preliminary studies of spatio-temporal variations in methane distribution at high latitudes of the northern hemisphere have been carried out using AIRS and JR-STATION data. The analysis showed that there is a noticeable increase (~ 4%) in the concentration of methane in the surface atmosphere and the upper troposphere. In the seasonal cycle 2004–2018, the methane content according to ground-based data has known winter (February) and summer (July – August) maxima. In the upper troposphere, seasonal variations in methane according to the AIRS data are similar to ground-based observations, but with a smaller amplitude.

Keywords: remote sensing, methane, AIRS, JR-STATION.

**Ф. К. Восидов¹, Н. Б. Курбонов^{2,3},
А. В. Митусов⁴, А. М. Халимов¹**

¹ Центр изучения ледников НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан,

² Кандидат технических наук, Таджикский национальный университет,
Душанбе, Таджикистан

³ Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана,
Душанбе, Таджикистан

³ Кандидат сельскохозяйственных наук, Казахстанско-Немецкий Университет,
Алматы, Казахстан

e-mail: knomvarb.0502@gmail.com

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПОДВИЖКА ЛЕДНИКА РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

В данной статье рассматривается временной период с 1977 по 2019 годы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что язык ледника РГО за период 1977-1992 году находится на стадии подвижки. Относительно 1977 года языковая часть этого ледника отступила на 118 м в 1992 г, а в 2018 г. на 793 м. В 2019 г. ледник РГО отступил на 9 метров относительно 2018 года. В 2009 г., 2011 г., 2013 г., 2016 г., 2018 г. и 2019 г. его язык активно наступал, перекрывая русло реки Абдукагор. Из-за чего река поменяла своё русло в долине. Пульсация ледника РГО объясняется динамикой температуры воздуха и накоплением веса при повышении атмосферных осадков или таянии снежников. Это подтверждается климатическим данным показывающими, что в данной местности годовое количества осадков уменьшилось на 14 %, а годовая температура воздуха повысилась на 0,8°C.

Ключевые слова: дистанционные зондирование, Landsat, Sentinel, изменение климата, подвижка ледника, РГО.

Введение. Подвижки пульсирующих ледников происходят периодически с продолжительностью полного цикла пульсации от 10-15 до 100 и более лет. В Таджикистане насчитывается [3, 10] свыше 40 «пульсирующих» ледников, которые имеют различный характер подвижки. Такие ледники, как Медвежий, Русское Географическое Общество (РГО), Дидал, Скогач, Абдукагор и другие, время от времени испытывают стремительные подвижки, которые могут перекрыть и запрудить реки, тем самым создают угрозу прорыва воды и катастрофических наводнений.

По данным Дробышева [4] на Кавказе опасно-пульсирующим ледником является ледник Колька, он имеет быстро-неопределённый пульсирующий характер. При подвижке этого ледника проходит сильная лавина наносящая, большой экономический ущерб [6, 9].

Наиболее изученным и единственным пока пульсирующим ледником, наблюдения на котором велись в течение всего периода пульсации, является ледник Медвежий на Западном Памире [1, 5]. Выявленные закономерности его динамики послужили основой для прогноза очередной подвижки ледника, который полностью оправдался [2].

Изучение изменения температуры воздуха показывает, что за базовый период в данной местности температура повысилась, и эти изменения могут привести к различным последствиям.

Множество пульсирующих ледников на территории Таджикистана ещё недостаточно изучены, что выносит неопределённости в сценарии оценки рисков. Ледник РГО, как и Медвежий при подвижке перекрывает русло реки Абдукагор. В результате образуется озеро, прорыв которого может нанести ущерб населённым пунктам вниз по течению. Динамика повторных подвижек ледника РГО до сих пор не определена.

Место исследования. Ледник РГО расположен в Ванчском ущелье между хребтов Дарваз и Академии наук (Центральный Памир), на территории Республики Таджикистан (рис.1). Это крупнейший ледник в бассейне реки Ванч (в верховьях – реки Абдукагор). Длина ледника составляет – 24,2 км, а площадь поверхности – 64,4 км².

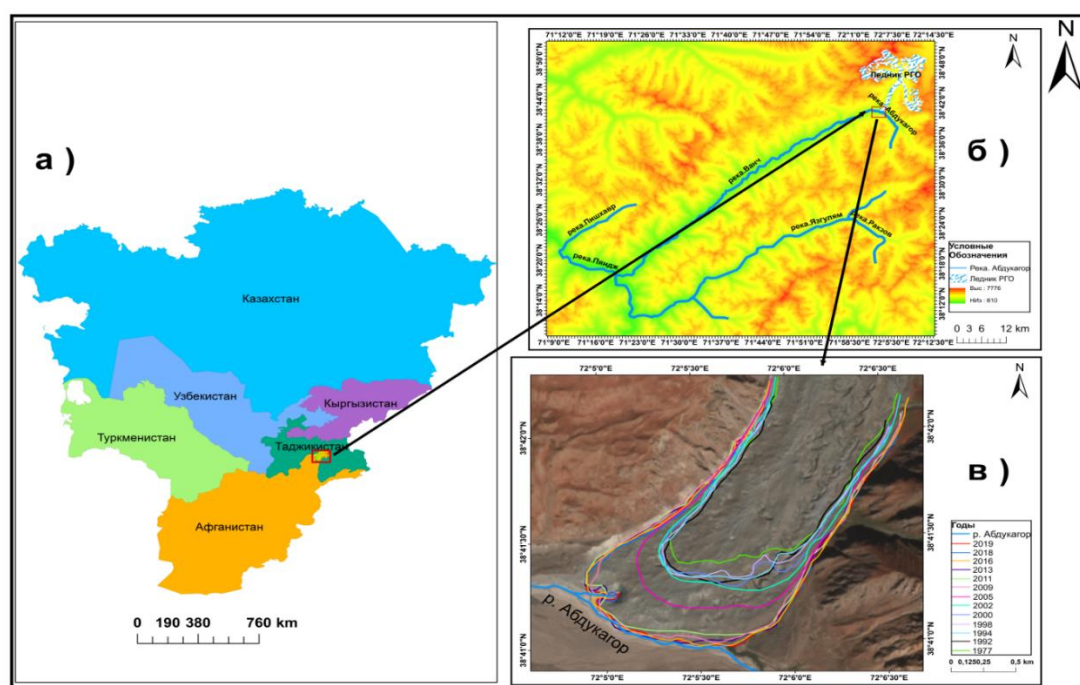


Рис.1. Карта объекта исследования: а) Центральная Азия; б) Бассейн реки Ванч и Язгулям; в) Язык ледника РГО

Рельеф района. Район бассейнов рек Ванч и Язгулям относится к Памирскому тракту с высокими горами и глубокими долинами. Высотность меняется в широких пределах. Максимальная высота поднятия (до 7000 м) характеризуется хребет Академии Наук в районе пика Исмаила Самани и Гармо. Данный район отличается большими абсолютными и относительными высотами. Глубокое расчленение рельефа местности является главным очагом крупного современного оледенения. Все наиболее крупные ледники бассейнов рек Ванча и Язгулема приурочены к району стыка хребта Академии Наук с хребты Дарваз, Ванч и Язгулем.

Здесь можно сказать, что рельеф водоразделов среднегорного типа, широкая сеть глубоко врезанных долин и большие абсолютные высоты создают благоприятные условия для развития оледенения преимущественно долинного и карового типа [5].

Климатические условия. Климат данного района связан с его географическим положением, и расположением на западной периферии обширного горного поднятия. Климат ледниковой зоны обусловлен в большей степени влиянием свободной циркуляции атмосферы и вертикальной зональностью.

Ветровой режим очень неоднороден в пространстве и во времени. Скорость ветра в различные периоды определяется барической обстановкой и соотношением направлений основного потока и хребтов. В целом скорость ветра повышается в зимние месяцы. В теплом полугодии (III–X) велика роль горно-долинной циркуляции, которая здесь получает большое развитие благодаря соседству раскалённых полупустынь и ледниковых полей.

Основные климатические условия в верховье реки Ванч характеризуются по метеостанции имени академика Горбунова на леднике Федченко, ее высота составляет 4300 м над уровнем моря.

По данным этой станции летом температура повышается до $-2 - -3^{\circ}\text{C}$ зимой средняя температура опускается до -18°C . Низкие температуры в высокогорьях по хребтам Дарвоз, Ванч, Язгулям и Академии Наук благоприятные для выпадения твёрдых осадков.

Низовья реки Ванч характеризуется климатическими данными станции Хумраги. Метеостанция Хумраги расположена на высоте 1320 м над уровнем моря, ее закрытость между двумя хребтами ограждает от холодных вторжений и выветривания. Зимой средняя температура опускается до -2°C , а летом поднимается до $+26 - 27^{\circ}\text{C}$ [11]. Таким образом, климат низовья можно считать умеренно теплым, а верховья – сурово холодным.

Методы исследования. В статье проведено дешифрирование космических снимков за период с 1977 по 2019. Для определения границы ледника, использовали снимки спутников Landsat и Sentinel-2 полученные с интернет сервиса Earth Explorer Геологической службы США [8]. Этот уровень обеспечивает определённую точность Гео позиционирования на основе использования наземных контрольных точек и цифровой модели поверхности земли. Данная точность представлена круговой ошибкой Гео позиционирования при соответствующей доверительной вероятности (Дв). Эта ошибка для снимков спутников Landsat составляет: Landsat-2 < 60 М при 88% Дв; Landsat-5 < 30 М при 99,5% Дв; Landsat-7 < 30 М при 99,7% Дв; Landsat-8 < 30 М при 99,6% Дв.

Наряду со этими, Мандычев А.Н. и другие авторы свои исследования [7] написали, что для остальных исходных данных, используемых при дешифрировании, аналогичная оценка точности Гео позиционирования отсутствует. Минимальная ошибка дешифрирования всех используемых снимков соответствует величине разрешения снимка. Снимки дешифровали с помощью программы ArcGIS Desktop.

При расчётах имеется небольшая погрешность и данные погрешности рассчитываются с помощью подсчёта площади ледника и количества пикселей, на которые показывают границы ледника: если ледник заполняет данный пиксель полностью это 100 точность если меньше, то это считаем ошибки. Таким образом, мы рассчитывали погрешность границ языка ледника РГО.

По данным расчёта границ оледенения за период 1977 погрешность составили ± 20 м, а для других это погрешность составляет ± 15 м.

Для определения причин пульсации ледника необходимо анализировать метеоданные ближайших метеостанций. Поэтому, для описания климатических колебаний использованы данные температуры воздуха и количества осадков с метеорологической станции – Хумраги. [11].

Результаты. Исследование оледенения за период 1977-2019 гг. выявлено, что ледник находится на стадии подвижки. Относительно 1977 года языковая часть ледника РГО подвижка на 118 в 1992 г. (таб. 1), а в 2018 году на 793 м, в 2019 наблюдается стадия отступления на 9 метров по отношению 2018 года.

Таблица 1

Динамика ледника Русская Географическая Общество за период 1977–2019 гг.

Периоды	n	Минимальные значения	Максимальные значения	Средняя величина положения языка ледника относительно 1977 года	Стандартное отклонение
1977-1992	5	62	208	118	63,6
1977-1994	4	103	209	147	43,8
1977-1998	4	94	186	138	33,9
1977-2000	4	102	207	155	36,8
1977-2002	4	114	323	235	62,2
1977-2005	4	337	472	425	33,2
1977-2009	4	722	950	786	116,0
1977-2011	4	621	790	726	45,3
1977-2013	4	607	803	733	49,5
1977-2016	4	620	876	772	73,5
1977-2018	5	554	904	793	78,5
1977-2019	5	534	942	802	99,0

Примечание: n – количество значения, полученных с 1977 года по году наблюдения

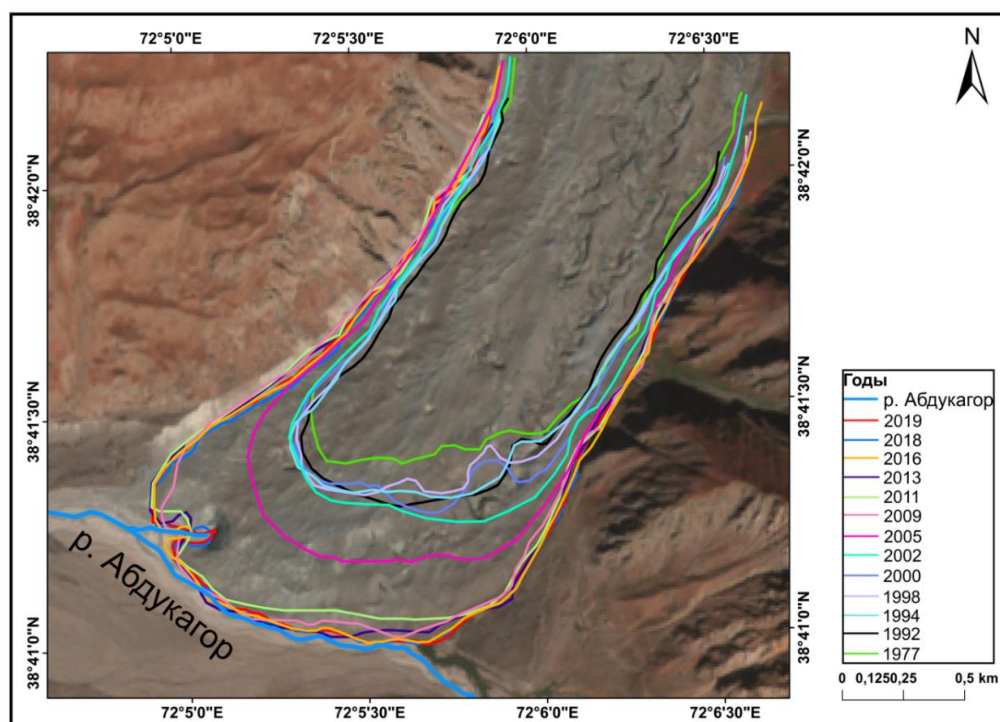


Рис. 2. Границы языка ледника Русское Географическое Общество (РГО) в разные годы

Все значения подвижки языковой линии ледника измерены относительно 1977 года, т.е. получено из одной измерительной точки. Поэтому средняя величина подвижка языка ледника РГО с 1977 года неуклонно возрастала с годами. Например, если в период 1977-1992 гг. эта величина была 118 метров, то в период 1977-2002 гг. составляла 235 метров и с 1977 года по 2019 год достигла 802 метра (таб. 1).

Наглядным примером может служить космический снимок языка ледника РГО (рис. 2). На данной карте хорошо видна положительная подвижка ледника по годам и в последние годы язык ледника находится в долине реки Абдукагор.

Обсуждение. При исследовании изменения климатических данных выявлено, что в данной местности годовое количества осадков уменьшилось на 32,9 мм или на 14% от годового количество осадков (рис. 3). При сравнении температуры воздуха подвижке ледника картина более наглядно показывает их взаимосвязь (рис.4). За период с 2000 по 2019 наблюдается рост температуры воздуха, что согласуется с повторными пульсациями ледника. Поэтому для определения зависимости подвижка языка ледника РГО от метеорологических условий (атмосферные осадки и температуры воздуха) на рисунках 3 и 4 построили графики подвижка ледника и изменения метеоусловия за периоды наблюдения.

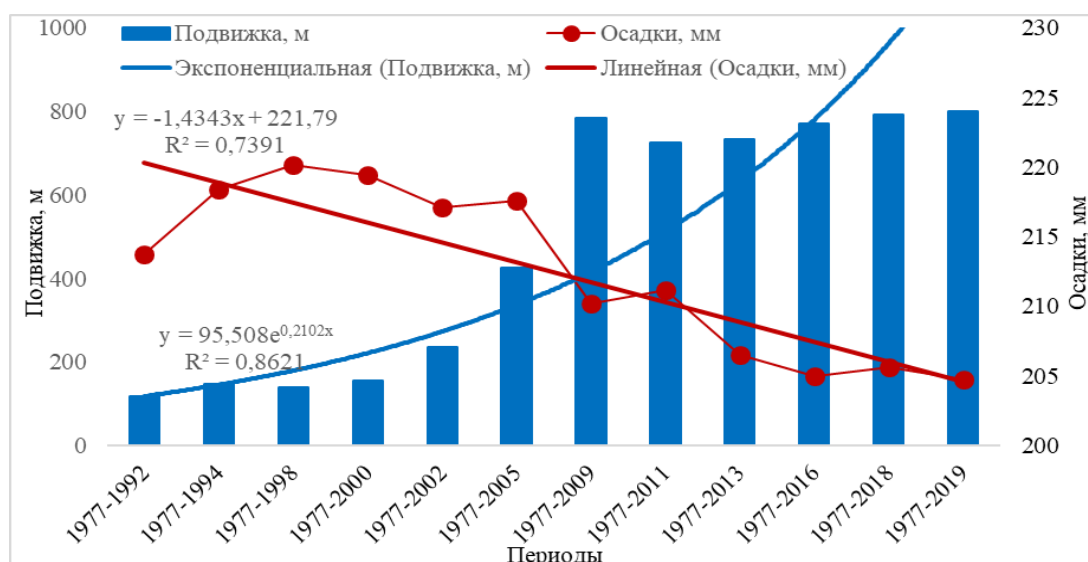


Рис. 3. Сравнение количество осадки с подвижкой ледника за период 1977-2019 гг.

Как ясно из рис. 3 в середине 2000-х параболический тренд изменения осадков сменился на нисходящий линейный. В свою очередь движение языка ледника РГО резко ускорилось (рис. 3) в тот же период. На основании чего можно предположить, что имеет место функциональная связь между этими явлениями.

Рисунок 4 показывает, что за весь период наблюдения с 1977 по 2019 гг. температура воздуха и подвижка языка ледника имеют тенденцию к значительному увеличению. Тенденция увеличения для обеих значениях составляются 0,6679 и 0,8616 относительно. Хотя детальное описание механизма этой связи требует дальнейшего детального изучения, что выходит за рамки данной статьи. Положительная связь между движением языка ледника и ростом температуры явно видна при визуальном сопоставлении, как самих данных, так и их трендов (рис. 4).

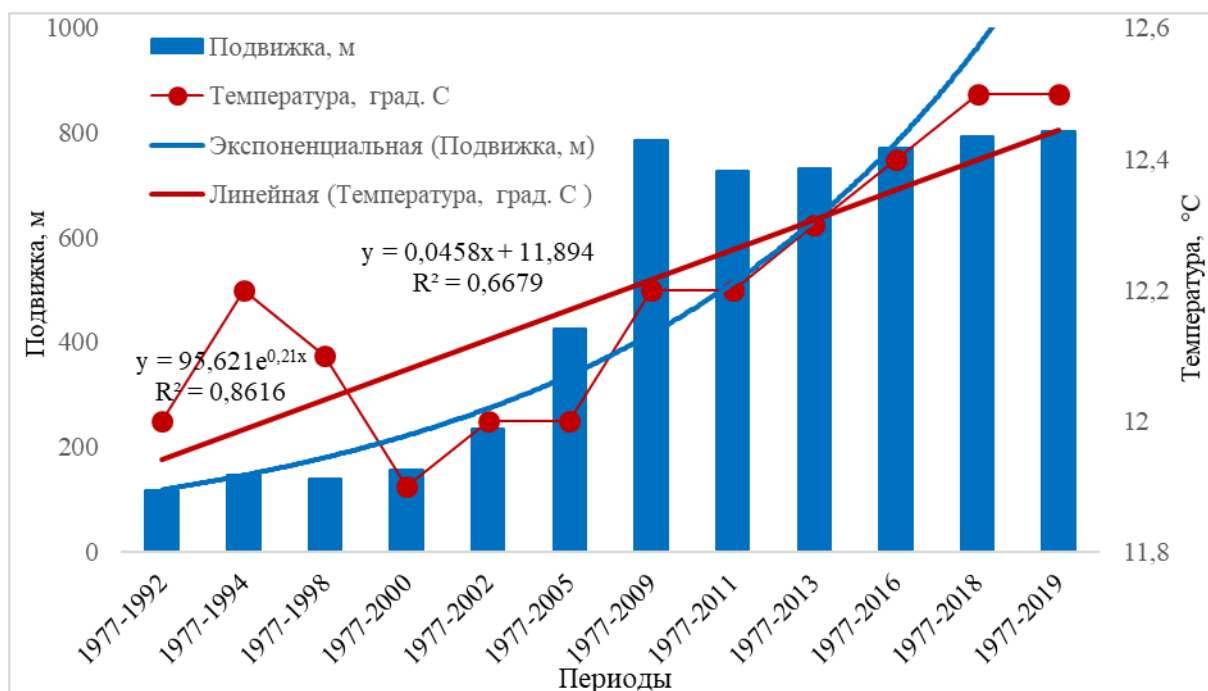


Рис. 4. Сравнение подвижки ледника с температурой воздуха за период 1977-2019 гг.

Таким образом, за 42 года наблюдений язык ледника постоянно находится на стадии «продвижение вниз по склону» и в 2018 достиг самой низкой отметки. Ледник РГО имеет дендритный характер и при створе данного ледника существует еще 5-6 ледников, которые в свою очередь также имеют свойства пульсации. Хотя динамика данных ледников на сегодняшний день плохо изучена, мы считаем, что именно пульсация этих ледников-притоков является определяющей в динамике главного ледника.

Выводы. К 2019 году нижняя граница языка ледника РГО продвинулась вниз по склону в среднем на 486 метров относительно отметки 1977 года. Скорость подвижки увеличилось после 2000 года и только за последние десять лет в пять раз, что привело к перекрытию русла реки Абдукагор.

Многолетние наблюдения за подвижками языковой части ледника и анализ метеоданных ближайшей метеостанции – Хумроги за 1977-2019 гг. показывают, что подвижка ледника РГО тесно связана с колебаниями температуры. Ибо, наблюдения за атмосферными осадками в районе ледника показывают, что, изменения формы их многолетних трендов осадков совпадают по времени с изменением интенсивности движение языка ледника РГО.

Список литературы

1. Десинов Л.В., Коновалов В.Г. Дистанционный мониторинг многолетнего режима оледенения Памира / Материалы гляциологических исследований // Институт географии РАН, 2007. – №103. – С.129-133.
2. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Ледники. – М., Мысль, 1989. – 447 с.
3. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Пульсирующие ледники. – Л., Гидрометиздат, 1982. – 192 с.
4. Дробышев В.Н. Гляциальная катастрофа Северной Осетии 20 сентября 2002 года / Устойчивое Развитие: Экология, Экономика, Социальные Отношения // Вестник Владикавказского научного центра, 2012. – Т.12. – №3. – С.20-36.

5. Забиров Р.Д. Оледенение Памира. – М.: Географгиз, 1955. – 372 с.
6. Котьяков В.М., Десинов Л.В., Осипова Г.Б., Хаузер М., Цветков Д.Г., Шнайдер Ж.Ф. События 2002 года на леднике Географического общества (РГО), Памир // Материалы гляциологических исследований, Вып.95.
7. Мандычев А.Н., Усубалиев Р.А., Азисов Э.А. Изменения ледника Абрамова (Алайский хребет) с 1850 по 2014 г. // Лёд и Снег, 2017. – Т.57. – №3. – С.326-333.
8. Наука для меняющегося мира. Геологическая служба США // URL: <https://www.usgs.gov/>
9. Носенко Г.А., Рототаева О.В., Никитин С.А. Особенности изменений ледника Колка с 2002 по 2016 г. // Лёд и Снег, 2017 – Т.57. – №4. – С.468-482.
10. Осипова Г.Б., Цветков Д.Г., Щетинников А.С., Рудак М.С. Каталог пульсирующих ледников Памира // Материалы гляциологических исследований. – М., 1998. – Вып.85. – С.3-136.
11. ТМС-84 Метеорологической станции Хумроги за период 1955-2019 гг. // Архивные данные Агентство по гидрометеорологии Республики Таджикистан (дата обращения: декабрь 2019 г. – январь 2020 г.).

F. K. Vosidov¹, N. B. Kurbonov^{2,3}, A. V. Mitusov⁴, A. M. Khalimov¹

¹ Glacier Research Center of the National Academy of Sciences
of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

² Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

³ Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences
of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

⁴ Kazakh-German University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: knomvarb.0502@gmail.com

REMOTE MONITORING OF THE GLACIER MOVEMENT OF THE RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

This article covers the time period from 1977 to 2019. The results obtained indicate that the tongue of the RGS glacier for the period 1977-1992 is at the stage of movement. Relative to 1977, the lingual part of this glacier retreated by 118 m in 1992, and in 2018 by 793 m. In 2019, the RGS glacier retreated by 9 meters relative to 2018. In 2009, 2011, 2013, 2016, 2018 and 2019, his tongue actively advanced, blocking the channel of the Abdukagor River. Because of what the river changed its course in the valley.

The pulsation of the RGS glacier is explained by the dynamics of air temperature and the accumulation of weight with an increase in atmospheric precipitation or melting of snowfields. This is confirmed by climatic data showing that in this area the annual precipitation has decreased by 14%, and the annual air temperature has increased by 0.8°C.

Keywords: remote sensing, Landsat, Sentinel, climate change, glacier movement, Russian Geographical Society.

**А. С. Голюков^{1,2}, И. А. Петров¹, А. С. Шушпанов^{1,3},
С. Т. Им^{1,2}, В. И. Харук^{1,2}**

¹ Институт леса им. В.Н. Сукачева

СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

e-mail: jedirevan@ya.ru

ГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ СПУТНИКОВАЯ СЪЕМКА В АНАЛИЗЕ ДИНАМИКИ ПРИРОСТА ДЕРЕВЬЕВ ЛИСТВЕННИЦЫ

В работе исследована связь индекса радиального прироста (ИП) деревьев лиственницы, произрастающих в криолитозоне, с динамикой водной массы на территории произрастания. Водная масса определялась на основе данным гравиметрической съемки со спутника GRACE. Динамика водной массы объясняет более 60% вариабельности ИП лиственницы. Построенная модель зависимости ИП лиственницы от водной массы, влажности корнеобитаемого слоя, температуры воздуха в начале и конце периода вегетации позволяет объяснить 96% вариабельности ИП.

Ключевые слова: спутниковая гравиметрия, GRACE, лиственница, индекс прироста.

Около 70% лиственничных насаждений произрастают на территории распространения вечной мерзлоты. Происходящие климатические изменения приводят к деградации вечной мерзлоты, вследствие чего увеличивается сток водной массы и выбросы углерода. Увеличение температуры воздуха способствует возрастанию продуктивности северных фитоценозов, включая лиственничные редколесья. Увеличивается радиальный прирост деревьев на северном пределе их произрастания [2; 3; 4; 5; 6].

Цель работы: анализ связи динамики водной массы в регионе с динамикой радиального прироста деревьев лиственницы на северном пределе их произрастания.

Объект исследования расположен в экотоне северной лесотундры (участок Ары-Мас; 72°26' с.ш., 102°02' в.д.). Ары-Мас является самым северным участком произрастания древостоев лиственницы (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) [7]. Лиственничники занимают террасы правого берега р. Новой на высотах до 80 м над у.м. Деревья растут полосами шириной 0.5–1.5 км, простираясь вдоль реки на ~20 км. Сомкнутость древостоев достигает 0.5. Высота и диаметр деревьев в среднем 5–8 м и 10–14 см, достигая 10–12 м и 25 см, соответственно. Возраст деревьев до 500–700 лет.

Климат района резко континентальный с годовым количеством осадков ~250 мм и среднегодовой температурой –12°C. Среднемесячная температура в июле +12°C, в январе –32°C. Период с положительными температурами длится около 110 дней (данные метеостанции «Хатанга»).

Материалы и методы. Информация о водной массе в виде среднемесячных аномалий водного эквивалента массы (АВЭМ) получена по данным гравиметрической съемки со спутника GRACE/GRACE-FO с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (<http://www.grace.jpl.nasa.gov>) [8]. Климатические данные получены с метеостанции «Хатанга» (индекс ВМО 20891; ~55 км от объекта исследования). Влажность почвы (на глубине до ~7 см) определялась по базе данных ERA5-Land с пространственным разрешением $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) [9]. В работе использовались данные о радиальном приросте 60 деревьев лиственницы. Древесно-кольцевая хронология построена с применением стандартных дендрохронологических методик. Для анализа зависимостей между переменными использовался коэффициент корреляции Пирсона. Построение модели было произведено с помощью множественного регрессионного анализа.

Пространственный анализ деревьев проводился на основе экспертного дешифрирования летних снимков (аэрофотосъемка 1984 г. и снимки WorldView-2 2019 г.). Пространственное разрешение снимков ~0.5 м. Геометрическая коррекция осуществлялась с использованием полиномиальной трансформации и интерполяции нерегулярной триангуляционной сети (ошибка привязки ~0.2–2.1 м). Динамика количества деревьев оценена по шести участкам (площадь каждого 20–80 га).

Результат. Выявлена обратная связь ($r = -0.79$; $p < 0.05$) прироста древостоев лиственницы с влажностью (АВЭМ; 2005–2019 гг.) в почвогрунтах в августе. Наблюдаемое снижение водной массы способствовало увеличению прироста лиственницы (Рис. 1а). Динамика АВЭМ объясняет ~62% вариации прироста лиственницы (Рис. 1б)

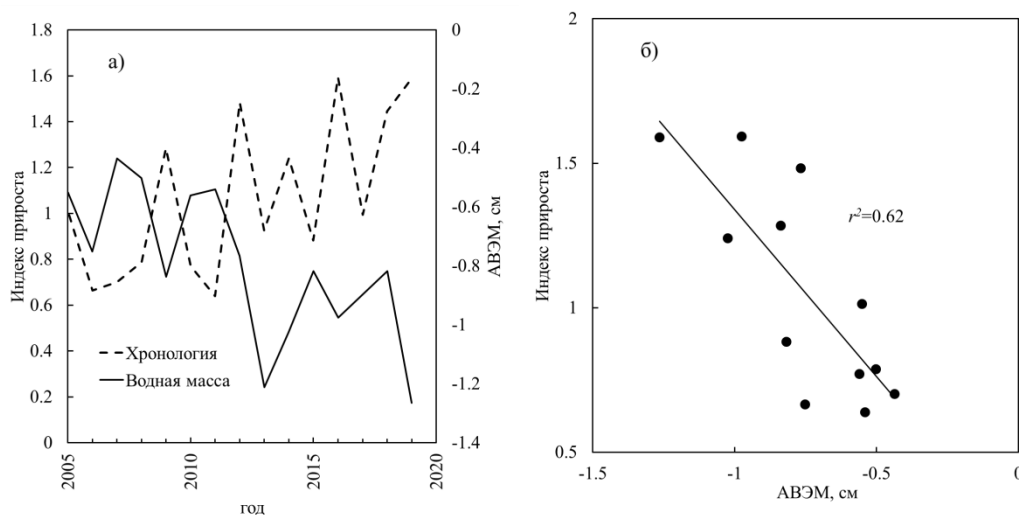


Рис. 1. (а) Динамика прироста деревьев лиственницы и АВЭМ в августе (период: 2005-2019 гг.); (б) зависимость прироста от АВЭМ в августе; период 2005-2019 гг.

Построена статистическая модель (уравнение множественной регрессии) прироста, объясняющее 96% вариабельности радиального прироста лиственницы ($r^2 = 0.96$; $p < 0.05$):

$$GI = 0.45 * T1 + 0.39 * T2 - 0.49 * GRACE - 0.29 * BKC + 0.12$$

где GI – индекс прироста лиственницы; $T1, T2$ – средние температуры воздуха с 12 июня по 6 июля и с 2 по 12 сентября, соответственно; $GRACE$ – средний АВЭМ в августе, BKC – среднее влагосодержание почвогрунтов в июле. Данные стандартизированы. 2013 год исключен из модели, т.к. за него нет достоверных данных для АВЭМ. Из уравнения следует, что максимальный вклад в динамику прироста лиственницы вносят переменные $GRACE$ и $T1$. Моделируемая и исходная хронологии лиственницы показаны на рисунке 2.

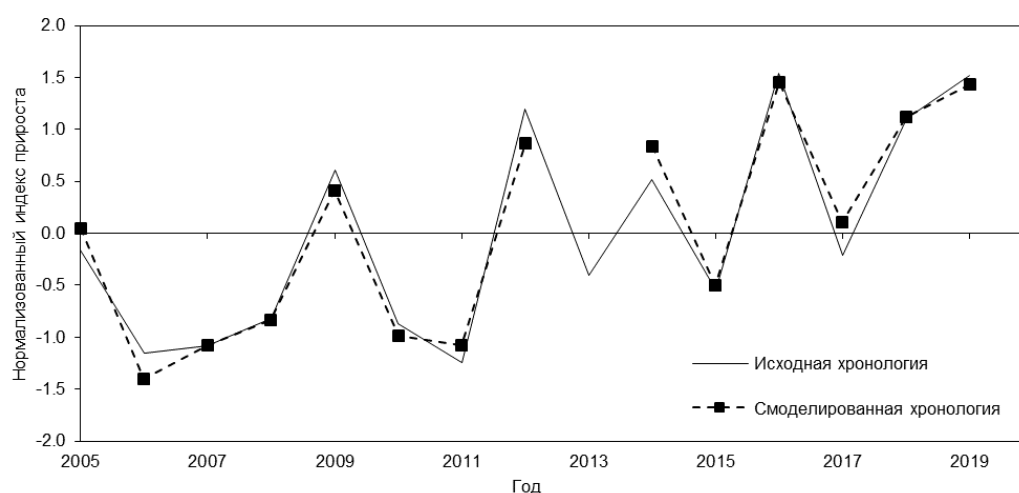


Рис. 2. Исходная и смоделированная хронологии

Наряду с возрастанием прироста, наблюдается миграция деревьев в зону лесотундры и возрастание сомкнутости древостоев в редколесьях (+10% за период с 1980-х).

Заключение. Установлена связь между аномалиями водной массы, измеряемой методом гравиметрии, и приростом лиственницы ($r^2 = 0.62$; $p < 0.05$). Получена функция отклика прироста лиственницы на динамику эколого-климатических переменных ($r^2=0.96$). Показано, что возрастание АВЭМ в конце периода вегетации (август) оказывает существенное отрицательное влияние на прирост лиственницы. Выявлено возрастание сомкнутости лиственничных редколесий и миграция лиственницы в зону тундры.

Авторы выражают благодарность Кривококову Л.В. с.н.с. лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, в г. Красноярске, за предоставление полевых данных с территории ГПБЗ «Таймырский» (участок Ары-Мас).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-44-240007.

Список литературы

1. Коропачинский И. Ю., Встовская Т. Н. Древесные растения Азиатской России // Новосибирск: Академическое издательство «Гео». 2012. 707 с.
2. Lloyd A.H., Bunn A.G. Responses of the circumpolar boreal forest to 20th century climate variability // Environ Res Lett. – 2007. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045013>

3. Richardson A.D., Friedland A.J. A review of the theories to explain Arctic and alpine treelines around the world // J Sustainable – 2009. URL: <https://doi.org/10.1080/10549810802626456>
4. Kharuk V.I., Ranson K.J., Im S.T., Dvinskaya M.L. Forest-tundra larch forests and climatic trends // Rus J Ecol – 2006. URL: <https://doi.org/10.1134/S1067413606050018>
5. Kirilyanov A.V., Prokushkin A.S., Tabakova M.A. Tree-ring growth of Gmelin larch under contrasting local conditions in the north of Central Siberia // Dendrochronologia – 2013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.10.003>
6. Romanovsky V.E., et.al. Terrestrial permafrost [in Bstate of the climate in 2016^]. // Bull Am Meteorol Soc – 2017. URL: <https://doi.org/10.1175/2017BAMSStateoftheClimate.1>
7. Ары-Мас // под ред Б.Н. Норина Л.: Наука .1978. 190 с.
8. Long D., Longuevergne L., Scanlon B.R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites // Water Resour Res – 2014. URL: <https://doi.org/10.1002/2013WR014581>
9. Hersbach H., de Rosnay P., Bell B. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP, ECMWF ERA // Report Series – 2018. № 27. 63 p.

A. S. Golyukov^{1,2}, I. A. Petrov¹, A. S. Shushpanov^{1,3},
S. T. Im^{1,2}, V. I. Kharuk^{1,2}

¹ Institute of Forest named after V.N. Sukacheva
SB RAS FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev,
Krasnoyarsk, Russia
e-mail: jedirevan@ya.ru

GRAVIMETRIC SATELLITE DATA IN ANALYSIS OF THE GROWTH DYNAMICS OF LARCH TREES

The relationship between the radial increment index (RI) of larch trees growing in the permafrost zone and the dynamics of the water mass in the growing area has been investigated in this work. The water mass was determined based on the data of the gravimetric survey from the GRACE satellite. The dynamics of the water mass explains more than 60% of the variability of the RI of larch. The constructed model of the dependence of the RI of larch on the water mass, moisture content of the root layer, air temperature at the beginning and end of the growing season makes it possible to explain 96% of the RI variability.

Keywords: satellite gravimetry, GRACE, larch, growth index.

А. С. Гордиенко¹, К. Д. Дыбина²

¹ Кандидат технических наук. ² Студент
Сибирский государственный университет
геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
e-mail: a.s.gordienko@sgugit.ru

МОНИТОРИНГ НЕФТЕРАЗЛИВОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

В данной статье приведены исследования возможностей снимков, полученных со спутников PlanetScore, для мониторинга территорий, загрязненных нефтепродуктами. Представлены результаты экспериментов по выявлению разливов нефти на основе визуального анализа синтезированных снимков и методами автоматизированного дешифрирования в программе ERDAS Imagine. Результаты подтверждены с помощью снимков Sentinel-2. Выполненные исследования показали, что для мониторинга состояния объектов нефтяной промышленности по снимкам PlanetScore, недостаточно спектральной информации из четырех спектральных каналов. Необходимо наличие канала, полученного в тепловом диапазоне спектра.

Ключевые слова: мониторинг, нефтепродукты, PlanetScore, Sentinel-2, автоматизированное дешифрирование.

Введение. Ежегодно в мире происходит большое количество разливов при добыче, переработке и транспортировке нефти. Большинство исследований по мониторингу объектов нефтегазовой промышленности направлены на выявление аварий на водной поверхности. Для этого используются методы активного и пассивного дистанционного зондирования Земли. Выявление разливов нефти на суше является более сложной задачей, так как распознать наличие нефтепродуктов на залесенной или заболоченной территории, в большинстве случаев, можно только по косвенным признакам – результатам негативного воздействия нефти на окружающую среду.

Цель данного исследования – распознавание утечек нефти по космическим снимкам на основе методов автоматизированного дешифрирования, а также анализ возможностей снимков PlanetScore при дешифрировании нефтепродуктов.

Материалы и методы исследования. В исследовании использовались снимки PlanetScore, полученные на территорию Усинского района Республики Коми. На данной территории расположены нефтеперерабатывающая станция «Уса» и наземный участок нефтепровода [1; 2].

Из источников, доступных широкому кругу пользователей, известно, что крупные утечки нефтепродуктов происходили 1 августа 2020 года и 11 мая 2021 года [1; 2]. Таким образом, были получены космические снимки на следующие даты: 1 августа 2018 года, 13 августа 2019 года, 20 августа 2020 года, 14 мая 2021 года.

Кроме снимков PlanetScore использовались снимки Sentinel-2 и данные с Google.Карт [1], для подтверждения полученных результатов.

Для достижения поставленных целей применялись методы автоматизированной классификации и визуальный анализ синтезированных изображений.

Результаты. Для выявления утечек нефти по космическим снимкам, как правило, анализируют синтезированные изображения, получаемые следующим сочетанием спектральных каналов: красный, ближний инфракрасный, синий [3]. При данной комбинации каналов, потенциальные утечки выделяются темно-розовым цветом.

В результате анализа разновременных снимков выявлено темное пятно в верхней части снимка, представленное на Рис. 1, которое предположительно является разливом нефти.

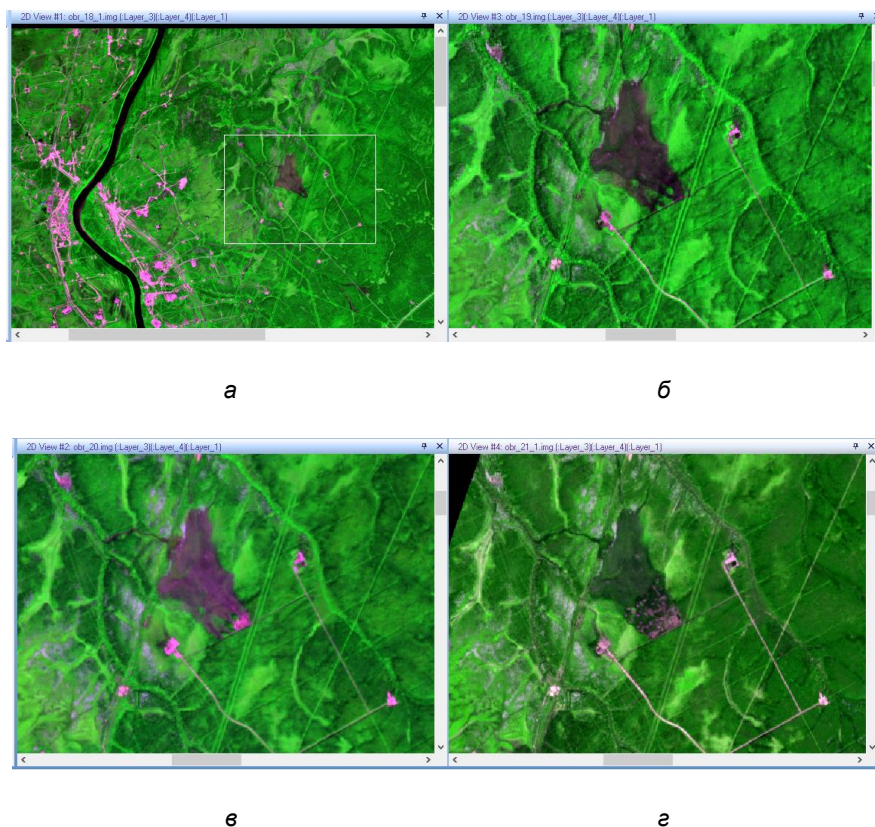


Рис. 1. Предполагаемый разлив нефти: а) 1 августа 2018 год; б) 13 августа 2019 год; в) 20 августа 2020 год; г) 14 мая 2021 год

Заметно, что предполагаемый разлив ярче в 2020 году, что может свидетельствовать о регулярных утечках. Это предположение подтверждает анализ снимков Sentinel-2, так как данной съемочной системой формируется изображение с большим числом спектральных каналов, чем PlanetScore [4]. Как известно, попадая в почву, нефть оказывает влияние на ее теплофизические свойства. Таким образом, дальняя инфракрасная область спектра позволяет распознать нефтезагрязненные территории лучше, чем видимый и ближний инфракрасный диапазоны [5].

На снимках Sentinel-2 в комбинации каналов $R = 12$, $G = 7$, $B = 2$, выделяются ярко-зеленый, красный, ярко-сиреневый и синий цвета. Ярко-зеленым цветом обозначена растительность. Синему цвету соответствует водоем возле нефтеперерабатывающей станции, а ярко-сиреневому – антропогенные объекты. Следовательно, красному цвету, соответствуют нефтеразливы.

Таким образом, можно подтвердить, что выявленный ранее по снимкам PlanetScore участок с разливом нефти, действительно соответствует утечке нефте-

продуктов. Данный участок был выбран в качестве эталона для автоматизированной классификации с обучением.

На Рис. 3. представлены результаты классификации за четыре года.

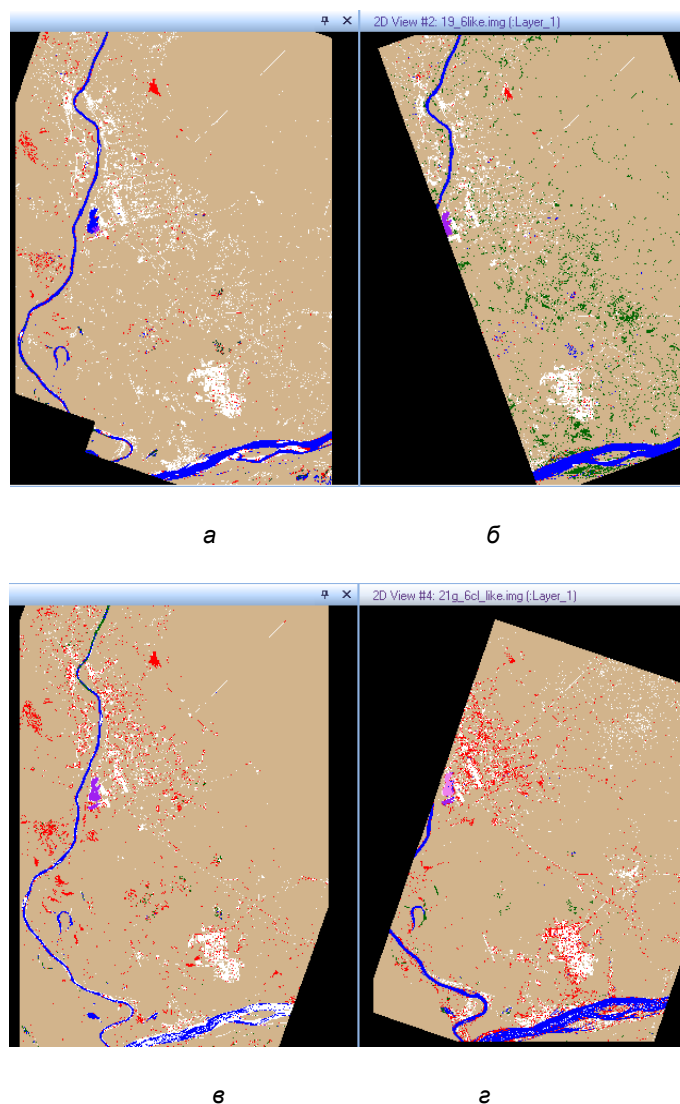


Рис. 3. Классификация с обучением: а) 1 августа 2018 года; б) 13 августа 2019 года; в) 20 августа 2020 года; г) 14 май 2021 год

Анализ результатов классификации и данных полученных с карты показал, что класс, содержащий потенциальные нефтеразливы, содержит также заболоченные участки местности.

Выводы. В результате проделанной работы получено, что для выявления разливов нефти на суше необходимо использовать данные со съемочных систем, имеющих тепловые спектральные каналы, информация из которых позволила бы с более высокой точностью выделить участки, загрязненные нефтепродуктами при автоматизированной классификации. Но пространственное и спектральное разрешение снимков PlanetScore позволяет проводить мониторинг с помощью других методов, в частности, создания индексных изображений, что дает возможность провести анализ состояния растительности в зоне добычи и переработки нефти.

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. Интерактивная карта мира / Google // Maps-of-world.ru = Карта мира : [сайт]. URL:<http://maps-of-world.ru/inter.html> (дата обращения: 15.05.2021).
2. Усинск. Люди. Нефть – Усинск, 2017 [сайт]. URL: <https://lr.7x7-journal.ru/usinskneft/> (дата обращения 15.05.2021).
3. Копылов, В.Н. Использование данных ДЗЗ при решении региональных задач рационального природопользования / В.Н. Копылов, Г. А. Кочергин, Ю. М. Полишук, В.А. Хамедов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. №6. С. 33-41.
4. Современная космическая съемка для мониторинга нефтяных загрязнений : сайт. – Москва – URL: <https://innoter.com/articles/sovremennaya-kosmicheskaya-semka-dlya-monitoringa-neftyanykh-zagryazneniy/> (дата обращения: 13.05.2021).
5. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса: научное издание / под редакцией В. Г. Бондура. – Москва : Научный мир, 2012. – 558 с.

A. S. Gordienko¹, K. D. Dybina²

¹ Ph. D. ² Student

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

e-mail: a.s.gordienko@sgugit.ru

OIL SPILL MONITORING BY SPACE IMAGES

This article presents a study of the possibilities of images obtained from PlanetScope satellites for monitoring areas contaminated with oil spills. The results of experiments on oil spill detection based on visual analysis of synthesized images and automated recognize methods in the ERDAS Imagine program are presented. Results confirmed with Sentinel-2 imagery. The performed studies have shown that to monitor the state of oil industry facilities using PlanetScope images, there is not enough spectral information from four spectral channels. The presence of a channel obtained in the thermal range of the spectrum is required.

Keywords: monitoring, oil spill, PlanetScope, Sentinel-2, automated recognition.

Р. Ю. Данилов, О. Ю. Кремнева

Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, Россия
E-mail: daniloff.roman2011@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОРНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В результате гипеспектральных измерений, проведенных на тестовых участках Федерального научного центра биологической защиты растений, были получены спектры отражения отдельных видов культурных и сорных растений. С целью разработки многоцелевой технологии дистанционного фитосанитарного мониторинга сельскохозяйственных культур были организованы испытания беспилотного летательного аппарата GEOSCAN, укомплектованного гиперспектральной камерой Gamma. Проведена работа по формированию базы данных спектральных характеристик сорной растительности. Проведен анализ изменения формы спектральных сигнатур энергетической яркости и коэффициента отражения растительных объектов в зависимости от их фактического состояния, учтенного во время полевых обследований. Анализ спектральных кривых показал, что данные полевого спектрометрирования хорошо соотносятся с данными аэросъемки.

Ключевые слова: мониторинг, культурные и сорные растения, спектральные характеристики.

С целью оперативного мониторинга за состоянием агроценозов необходимо совершенствование методов получения информации о сорной растительности в конкретных регионах с привязкой к агроклиматическим условиям [1, 2]. В связи с этим, весьма актуальной является разработка принципиально новых средств диагностики и оперативного контроля особо опасных вредных видов, способных вызвать чрезвычайную продовольственную ситуацию [3,4].

В современной литературе имеются работы, посвященные вопросам создания наземных спектральных библиотек, по результатам которых установлена возможность идентификации видовых особенностей и изменения состояния разных типов растительности, вызванных влиянием факторов окружающей среды [5,6].

Целью наших исследований являлось усовершенствование методов фитосанитарного мониторинга в отношении сорных растений на основе анализа данных наземных и дистанционных гиперспектральных измерений растительных объектов, с разработкой базы данных спектральных характеристик сорных растений для оптимизации фитосанитарной диагностики.

Для реализации поставленной цели, на опытных полях научного севооборота Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений были проведены работы по созданию тестовых участков с различным видовым составом культурных и сорных растений, составляющих основу агроценозов Краснодарского края [7].

В ходе исследований осуществлялся регулярный фитосанитарный мониторинг за развитием культурных и сорных растений в течение периода исследований.

Приборная база наземных полевых исследований была представлена автоматизированным спектрометром Ocean Optics Maya 2000-Pro, который предназначен для измерения спектральной плотности яркости объектов в области спектра от 350 нм до 1000 нм с высоким спектральным разрешением ~ 1 нм.

Синхронно с наземными измерениями были проведены испытания беспилотного летательного аппарата GEOSCANAGRO-101, укомплектованного гиперспектральной камерой OXIVNIR-40.

В результате гипеспектральных измерений, проведенных на тестовых участках, были получены спектры отражения посевов культурных растений, составляющих основу агроценозов Краснодарского края: озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Батько, озимого ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Михайло, яровой пшеницы (*T. aestivum* L.) сорта Николаша, ярового ячменя (*H. vulgare* L.) сорта Виконт, кукурузы (*Zea mays* L.) (гибрид Краснодарский 194 М), подсолнечника (*Helianthus annuus* L.) (сорт Флагман), люцерны (*Medicago sativa* L.) (сорт Багира), сои (*Glycine max* (L.) Merrill) (сорт Бара).

Сорные растения были представлены следующими видами: ясколка лесная (*Cerastium arvense* L.), яснотка пурпурная (*Lamium purpureum* L.), лисохвост мышехвостиковидный (*Alopecurus myosuroides* Huds.), амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia* L.), дурнишник калифорнийский (*Xanthium strumarium* L.), щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), марь белая (*Chenopodium album* L.), канатник Теофраста (*Abutilon theophrastii* Medik.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.) и дикий овес (*Avena fatua* L.).

На основе их обработки проведена работа по формированию базы данных спектральных характеристик сельскохозяйственных культур и сорных растений в программе Microsoft Access 2013.

На рисунке 1 в качестве примера представлены средние графики зависимостей СПЭЯ L от длины волны разных типов растительности в третьей декаде июня-месяца.

Анализ спектральных кривых показал, что данные наземного полевого спектрометрирования хорошо соотносятся с данными аэросъемки. В результате анализа интервалов значений СПЭЯ L были выявлены особенности изменения отражательной способности культурных посевов и сорных растений:

-отличительные особенности отражательной способности некоторых видов культурных и сорных растений проявляются в видимом диапазоне спектра 450÷680 нм;

- установлено совпадение пределов варьирования показателей спектральной яркости озимых пшеницы и ячменя в фазе Z 92 «созревание» и такое же сходство отражательной способности яровых пшеницы и ячменя в фазе Z 71-72 «молочно-восковая спелость». Подтверждена значительная схожесть отражательной способности яровых пшеницы и ячменя (Z 71-72 «молочно-восковая спелость») со злаковым сорняком лисохвостом мышехвостиковидным в стадии 5 – Плодоношение «полная спелость».

- спектры отражения растений кукурузы в фазе ВВСН 71-73 «молочная спелость» отличаются от других культурных и сорных растений максимальным преде-

лом показателя спектральной яркости, который проявляется вследствие увеличения отражательной способности растений на красном участке спектра (625÷680 нм) и сглаживания пика отражения зеленого цвета (530÷610 нм);

- интервалы значений спектральной яркости растений подсолнечника перекрываются пределами отражательной способности сорных растений дурнишника калифорнийского, канатника теофраста, щирицы запрокинутой и мари белой по всему видимому диапазону спектра 450÷680 нм;

- отличие отражательной способности растений сои от общей совокупности спектральных характеристик культурных и сорных растений проявляется в виде увеличения яркости в зеленом (530÷610 нм) красном (625÷680 нм) участках спектра на момент достижения фазы ВВСН 51-53 «бутонизация»;

- выявлено ярко выраженное достоверное отличие амплитуды колебаний спектральной яркости амброзии полыннолистной от общей совокупности спектров отражения культурных и сорных растений в видимом диапазоне спектра 450÷680 нм;

- отличием отражательной способности также характеризуются сорные растения ясכולки лесной и ясכולки пурпурной в видимом диапазоне 450÷680 нм, дикого овса на зеленом (530÷610 нм) красном (625÷680 нм) участках спектра и осота полевого в видимом диапазоне 450÷680 нм.

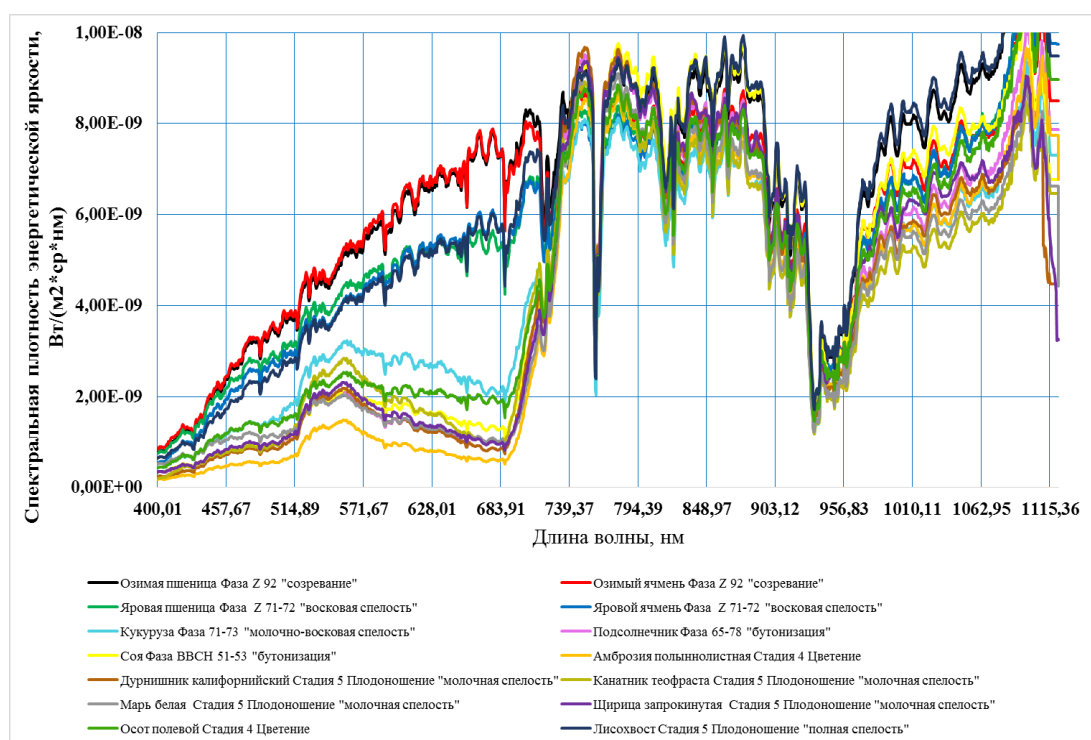


Рис. 1. Средние графики зависимостей СПЭЯ L от длины волны разных типов растительности (III декада июля)

Таким образом, в результате проведенных исследований получены оригинальные спектральные характеристики отдельных видов культурных и сорных растений. Осуществлена интерпретация и сопоставление данных, полученных в результате проведения наземных и дистанционных измерений, и выявлены индикационные спектральные признаки отдельных видов растений. Сформирована база данных

гиперспектральных оптических характеристик сельскохозяйственных культур и сорных растений.

Полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности использования дистанционных гиперспектральных измерений в целях фитосанитарного мониторинга сорной растительности.

Исследования спектральных характеристик культурных и сорных растений проведены в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ № 19-416-233025 р_мол_а и Администрацией Краснодарского края.

Список литературы

1. Афонин А.Н., Лунева Н.Н., Ли Ю.С., Коцарева Н.В. Эколого-географический анализ распространения и встречаемости борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) в связи со степенью аридности территорий и его картирование для европейской территории России // Экология. 2017. № 1. С. 66-69.
2. Афонин А.Н., Баранова О.Г., Федорова Ю.А. Характеристика северной границы распространения *Ambrosia artemisiifolia* L. в Канаде в связи с определением экологических лимитов распространения вида на север // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 50. С. 28-51.
3. Архипова О.Е., Качалина Н.А., Тютюнов Ю.В., Ковалев О.В. Оценка засоренности антропогенных фитоценозов на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере амброзии полыннолистной) // Исследования Земли из космоса. 2014. № 6. С. 15–26.
4. Михайленко И.М., Воронков И.В. Методы обнаружения сорняков, болезней и вредителей растений по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т.13. № 3. С. 72–83.
5. Зимин М.В., Тутубалина О. В., Голубева Е. И., Рис У.Е. Методика наземного спектрометрирования растений Арктики для дешифрирования космических снимков // Вестник Московского государственного университета. Серия 5. География. 2014. № 5 С. 34-41.
6. Григорьев А.Н., Рыжиков Д.М. Общая методика и результаты спектрорадиометрического исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в диапазоне 320–1100 нм в интересах дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т.15. № 1. С. 183–192.
7. Лунева Н.Н., Закота Т.Ю. Видовой состав сорных растений и количественные показатели засоренности посевов пшеницы озимой степной зоны Краснодарского края // Вестник защиты растений. 2018. № 1(95). С. 45–52.

R. Yu. Danilov, O. Yu. Kremneva

Federal Research Center of Biological Plant Protection, Krasnodar, 350039, Russia

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGICAL BASIS FOR USING HYPERSPECTRAL EQUIPMENT FOR WEED MONITORING

As a result of hyperspectral measurements carried out on test sites of the Federal Research Center for Biological Plant Protection, reflection spectra of certain species of cultivated and weed plants were obtained. In order to develop a multipurpose technology for remote phytosanitary monitoring of agricultural crops, tests of an unmanned aerial vehicle GEOSCAN equipped with a Gamaya hyperspectral camera were organized. Work on the formation of a database of spectral characteristics of weeds has been carried out. The analysis of changes in the shape of spectral signatures of energy brightness and reflection coefficient of plant objects, depending on their actual state, taken into account during field surveys. The analysis of the spectral curves showed that the field spectrometry data correlate well with the aerial survey data.

Keywords: monitoring, cultivated and weed plants, spectral characteristics.

А. В. Дергунов¹, О. Э. Якубайлик²

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru, oleg@icm.krasn.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА В КРАСНОЯРСКЕ

В работе проводится анализ метеорологических условий в Красноярске в период с 2019 по 2020 год. Исследуется взаимосвязь между возникновением температурных инверсий в приземном слое атмосферы и загрязнением воздуха взвешенными твердыми частицами (PM_{2.5}). В работе используется набор метеоданных модели NCEP GFS о температуре воздуха на трех изобарических поверхностях (1000, 925 и 850 mb), порывах ветра и высоте пограничного слоя атмосферы. Данные о концентрациях PM_{2.5} и скорости ветра предоставлены системой мониторинга воздуха КНЦ СО РАН. Показана взаимосвязь между наличием температурных инверсий в атмосфере и периодами значительного загрязнения воздуха, а также зависимость изменения скорости ветра и высоты пограничного слоя атмосферы с изменением среднесуточной концентрации PM_{2.5}. Продемонстрирована возможность использования метеоданных модели NCEP GFS в задачах исследования приземного слоя атмосферы и периодов его загрязнения.

Ключевые слова: температурная инверсия, неблагоприятные метеорологические условия, GFS, PM_{2.5}, загрязнение воздуха.

Введение. В результате антропогенного фактора в атмосферу попадает большое число вредных веществ, загрязняющих воздух крупных мегаполисов [1]. Исследования показывают связь между повышенными концентрациями взвешенных в воздухе твердых частиц (PM) и ухудшением здоровья людей [2]. В периоды неблагоприятных метеоусловий происходит резкое увеличение концентрации загрязняющих веществ в нижнем слое атмосферы, к которым относят промышленные и автомобильные выбросы, печное отопление и т.д. [3]. Одним из факторов ухудшения экологической обстановки является температурная инверсия в атмосфере – слой теплого воздуха, задерживающий вертикальное рассеяние вредных примесей [4]

Возникает необходимость исследования атмосферных процессов с помощью наборов метеорологических данных для анализа периодов, приводящих к ухудшению экологической обстановки.

Целью данной работы является анализ влияния температурных инверсий в приземном слое атмосферы на формирование неблагоприятной экологической обстановки в Красноярске в период с 2019 по 2020 год по метеоданным модели Global Forecast System. Выявление взаимосвязи между периодами с повышенными концентрациями PM_{2.5} и скоростью, порывами ветра и высотой пограничного слоя атмосферы.

По данным Министерства экологии Красноярского края в Красноярске с 2019 по 2020 год было установлено 12 периодов неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) [5]. Периоды НМУ характеризуются низкой скоростью ветра и кон-

центрациями взвешенных в воздухе твердых частиц (PM), значительно превышающими среднесуточную ПДК, равную 0,035 мг/м³.

Материалы и методы. В работе используется метеоинформация из набора данных модели Global Forecast System (GFS). Это система численного прогнозирования погоды, выполняемая Национальной метеорологической службой США. Глобальный анализ данных и прогнозирование осуществляется 4 раза в сутки. Прогноз погоды доступен вплоть до 16 дней вперед [6].

Использовались фактические данные анализа о температуре воздуха на трех вертикальных уровнях, соответствующих трем изобарическим поверхностям: 1000, 925 и 850 mb; а также данные о высоте пограничного слоя атмосферы и порывах ветра для периода с 2019 по 2020 год.

Выявление слоев инверсии производилось путем получения отрицательной разности между данными о температурах на разных вертикальных уровнях. При отрицательной разности между температурами на изобарических поверхностях 1000 mb и 925 mb – инверсия считалась приземной или приподнятой, если между 925 mb и 850 mb – приподнятая или высотная (инверсия свободной атмосферы).

Также в работе использовались данные о концентрациях взвешенных в воздухе твердых частиц PM_{2.5} и скорости ветра системы мониторинга воздуха КНЦ СО РАН [<http://gis.krasn.ru/blog/>].

Результаты и обсуждение. На основе анализа данных GFS о температуре воздуха на различных вертикальных уровнях проведено сравнение количества дней с температурными инверсиями по месяцам для 2019 и 2020 года (рис. 1,а).

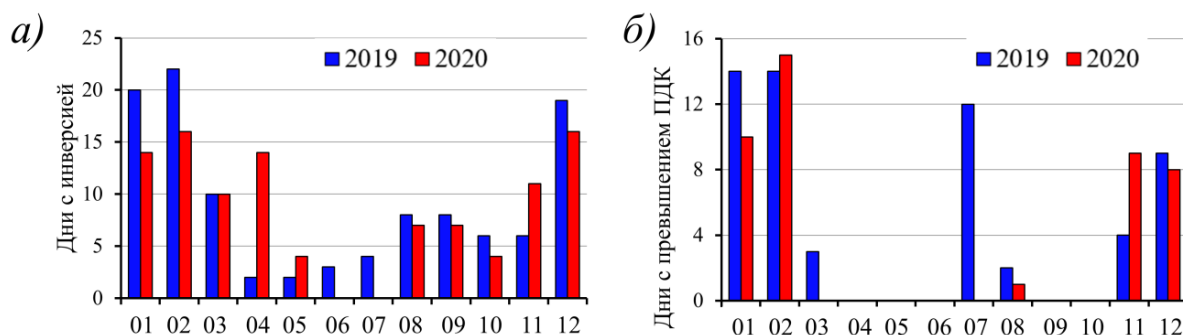


Рис. 1. Экологическая обстановка в Красноярске по месяцам в 2019 и 2020 году

В апреле, мае и ноябре количество дней с инверсиями больше в 2020 году на 19 дней, в остальные месяцы – наоборот, за исключением марта, когда и в 2019 и в 2020 году их количество составляло по 10 дней.

Сравнение количества дней, во время которых среднесуточная концентрация PM_{2.5} превышала среднесуточное ПДК, по месяцам для 2019 и 2020 года представлено на рисунке 2,б. В 2019 году дней с «загрязнением» атмосферы было больше, чем в 2020 году на 15 дней.

Общее количество дней с температурными инверсиями в 2019 году составило 110, в 2020 году – 103 дня. Наиболее часто встречающийся тип инверсии – приземная или приподнятая. Общее количество дней с «загрязнением» атмосферы в 2019 году составило 58, в 2020 году – 43 дня.

Также анализ данных показал устойчивую взаимосвязь между изменениями среднесуточной концентрации PM2.5 и порывами ветра по данным модели GFS (рис. 2).

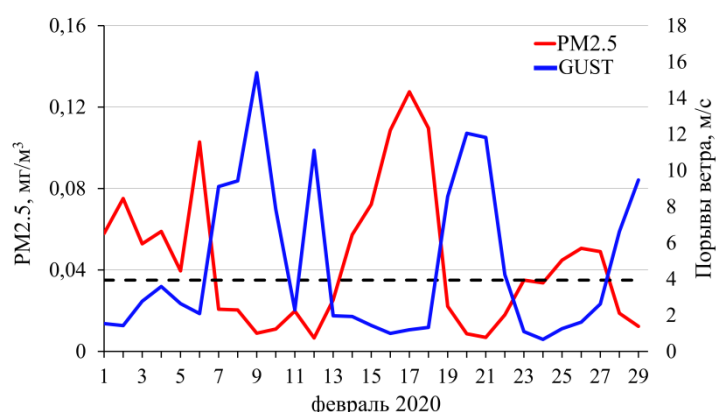


Рис. 2. Метео обстановка в Красноярске в феврале 2020 г.

Красный график обозначает изменение среднесуточной концентрации PM2.5, синий график – изменение скорости порывов ветра. Пунктиром обозначен среднесуточный ПДК, равный 0,035 мг/м³

Периоды повышенной концентрации PM2.5: 1-6, 14-18 и 25-27 февраля. Во все дни в выделенные периоды наблюдались температурные инверсии, за исключением 5 и 26 февраля. Показано, что при увеличении скорости ветра уровень загрязнения падает и наоборот.

Проведено сравнение вариации высоты планетарного пограничного слоя атмосферы со скоростью ветра, полученной по данным наземной станции мониторинга. Коэффициент корреляции составил 0,79. Это связано с тем, что при высокой скорости ветра уменьшается устойчивость атмосферы, увеличивается турбулентность, что ведет к увеличению высоты пограничного слоя [7].

Заключение. В результате проделанной работы была показана взаимосвязь между присутствием температурных инверсий и периодами значительного загрязнения воздуха частицами PM2.5 в Красноярске в 2019 и 2020 годах.

Наибольшее количество дней с температурными инверсиями и повышенным загрязнением воздуха наблюдается в холодный период года (декабрь, январь, февраль). В 2019 году инверсии регистрировались все 12 месяцев, а в 2020 году инверсии отсутствовали только в июне и июле.

Показано, что при увеличении скорости ветра и высоты пограничного слоя уменьшается среднесуточная концентрация PM2.5.

Корреляция между скоростью ветра, полученной по данным наземной станции мониторинга, и порывами ветра по данным модели GFS, составляет 0,82. Между скоростью ветра и высотой пограничного слоя – 0,79. Данные о высоте пограничного слоя могут служить дополнительным показателем при исследовании атмосферы Красноярска.

Анализ метеоданных модели GFS способствует решению задач, связанных с изучением нижнего слоя атмосферы, его загрязнения, и может сыграть важную роль в более точном выявлении периодов неблагоприятных метеорологических условий и их прогнозировании.

Список литературы

1. Зарубин Г. П., Новиков Ю. В. Гигиена города. Москва: Медицина. 1986.
2. Kaufman Y.J., Tanré D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system // Nature. 2002. Vol. 419. №. 6903. P. 215-223.
3. Еремкин А. И., Квашнин И. М., Юнкеров Ю. И. Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2001.
4. Матвеев Л. Т. Общая метеорология. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат. 1984. Т. 753.
5. Министерство экологии и рационального природопользования Красноярского края [Электронный ресурс]/ Режим доступа: <http://www.krasecology.ru/Nmu>
6. The Global Forecast System (GFS) Documentation Retrieved from: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numericalforecast_systems/gfs.php
7. Wang Y. et al. Evaluation of five planetary boundary layer schemes in WRF over China's largest semi-fixed desert // Atmospheric Research. 2021. 105567

A. V. Dergunov¹, O. E. Yakubailik²

¹ Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru, oleg@icm.krasn.ru

INFLUENCE OF TEMPERATURE INVERSIONS ON AIR POLLUTION IN KRASNOYARSK

The paper analyzes the meteorological conditions in Krasnoyarsk in the period from 2019 to 2020. The relationship between the occurrence of temperature inversions in the surface layer of the atmosphere and air pollution by suspended particulate matter (PM_{2.5}) is investigated. The work uses a set of meteorological data from the NCEP GFS model on air temperature on three isobaric surfaces (1000, 925 and 850 mb), wind gusts and the height of the atmospheric boundary layer. Data on PM_{2.5} concentrations and wind speed were provided by the air monitoring system of the KSC SB RAS. The relationship between the presence of temperature inversions in the atmosphere and periods of significant air pollution, as well as the dependence of the change in wind speed and the height of the atmospheric boundary layer with a change in the average daily PM_{2.5} concentration is shown. The possibility of using the meteorological data of the NCEP GFS model in the problems of studying the surface layer of the atmosphere and the periods of its pollution has been demonstrated..

Keywords: temperature inversions; unfavorable weather conditions; GFS; PM_{2.5}; air pollution.

Д. В. Емельянов, И. Ю. Ботвич, А. П. Шевырногов

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: dima9526@gmail.com

РАЗНОСТЬ ТЕМПЕРАТУР ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПОЧВЫ – ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ФАКТОР ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ

Исследование направлено на изучение изменений радиационной температуры (LST) почвы и растительности на сельскохозяйственных угодьях, засеянных ячменем на основании беспилотных данных LST. Одновременно с данными LST были измерены спектральные характеристики (NDVI) посевов с помощью DJI P4 Multispectral. В работе показана изменчивость вегетационных индексов и радиационной температуры в течении вегетационного периода. Выявлена значимая связь между динамикой NDVI и динамикой радиационной температуры. Показаны особенности изменчивости пространственного распределения температур в зависимости от выпадения осадков. В работе приведен пример температурной карты исследуемых участков в середине периода вегетации, на которой видны особенности пространственного распределения температур.

Ключевые слова: радиационная температура, сельскохозяйственные угодья, термокарта, ZENMUSE XT2, DJI P4 Multispectral.CSTD

Температура – одна из наиболее важных переменных окружающей среды, влияющих на физиологические процессы растений, включая транспирацию, водный потенциал листьев и фотосинтез. Незначительные изменения температуры полого, которая является функцией температуры листьев растения, можно измерить с помощью тепловизионной камеры. Формируется температурное изображение с использованием длинноволнового диапазона излучения. Тепловизионные камеры дистанционного зондирования, установленные на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), все чаще используются в точном земледелии [1] для обнаружения дефицита воды и планирования полива [2–5], а также для фенотипирования растений [6–8].

В настоящей работе особое внимание уделяется выявлению связи динамики термических полей сельскохозяйственных угодий с динамикой их отражательных спектрофотометрических характеристик.

Объектом исследований являются сельскохозяйственные угодья на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи п. Минино и учебного опытного хозяйства «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края. Данные получены в течение периода вегетации 2020 г.

На опытном поле учебного опытного хозяйства «Миндерлинское» произрастает ячмень сорт «Ача». Поле разделено на 4 тестовых участка в соответствии с четырьмя видами обработки почв: вспашка (ПН-5-35 на 20–22 см)- «а»; плоскорезная обработка (КПШК-3,8 на 20-22 см) – «b»; поверхностная обработка (дискатор БДШ-5,6 на 8-10 см) – «с»; прямой посев при нулевой обработке почвы (Агратор 4,8) – «d». Внесение удобрений производилось по северной части каждой полосы (шириной 10 м), южная оставалась без удобрений.

На опытном поле Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН произрастает ячмень сорт Оленёк, посев производился при глубинной обработке почвы.

Работа основывается на данных, полученных беспилотными летательными аппаратами DJI P4 Multispectral и DJI Matrice 210 RTK V2 с полезной нагрузкой в виде тепловизора ZENMUSE XT2. Камера ZENMUSE XT2 производит съемку в тепловом диапазоне 7.5-13.5µm с разрешением 640x512 пикселей. Пространственное разрешение полученных изображений составляет 12.6 см. DJI P4 Multispectral производит мультиспектральную съемку в 5 спектральных каналах (450±16 нм, 560±16 нм, 650±16 нм, 730±16 нм, 840±26 нм). Пространственное разрешение полученных изображений составляет 5.3 см. Обработка полученных данных выполнялась с помощью программных средств Pix4DMapper и QGIS.

В ходе тематической обработки мультиспектральной информации производился расчет значений NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Расчет разницы радиационной температуры почвы и растительности посева CSTD (Crop and Soil Temperature Difference) производился следующим образом. Для каждой даты исследования рассчитывался показатель средней радиационной температуры почвы LST_{soil} . Для этого производился отбор участков без растительности. При определении участков с отсутствием растительности использовались значения NDVI, полученные по данным DJI P4 Multispectral. Для открытой почвы они изменяются в диапазон от 0 до 0.15. Для визуального контроля использовался ортофоплан, также полученный с помощью DJI P4 Multispectral. Далее значения радиационной температуры по полученным полигонам усреднялись (их количество изменялось от 30 до 50 шт.). Таким образом, для каждой даты исследований было получено одно значение, которое использовалось при дальнейших расчетах. Также, для каждой даты исследования рассчитывались показатели средней радиационной температуры посевов LST_{crop} отдельно для каждого типа вспашки и фона удобрений. Эти значения отнимались от радиационной температуры почвы ($LST_{soil} - LST_{crop}$) для расчета CSTD.

Проведено исследование связи динамики NDVI и CSTD в течение вегетационного периода. Эта связь исследовалась для изучения взаимосвязи указанных характеристик, так как динамика температур влияет на вегетационный процесс и, в свою очередь экранирующий эффект растительности влияет на температуру почвы, на сохранение в ней влаги. В начальный период после посева микроклимат агрофитоценоза, по существу, не отличается от микроклимата черного пара, но с появлением всходов, и при дальнейшем их росте возникают значительные различия. Из-за увеличивающихся высоты, облиственности растений и сомкнутости травостоя, изменяются условия проникновения лучистой энергии к почве, меняется температурный режим, интенсивность турбулентного обмена, интенсивность испарения, влажность воздуха и почвы. При развитии на почве травостоя активной становится поверхность растений.

Расчет коэффициента корреляции средних значений NDVI и CSTD посева ячменя (учхоз «Миндерлинское») показал наличие высокой степени связи 0.85. При этом для отдельных контуров в зависимости от вида обработки и внесения удобрений данная связь различна.

Наибольшие коэффициенты корреляции имеют ряды данных включающие измерения только при сухой поверхности почвы. Максимальное значение 0.95 – при

поверхностной обработке (удобренный фон), минимальное – при плоскорезной обработке (неудобренный фон). Коэффициенты корреляции, рассчитанные по данным, включающим измерения при сухой и влажной поверхности почвы, имеют более низкие значения по всем контурам.

Таблица

Коэффициенты корреляции значений NDVI и CSTD посева ячменя учхоз «Миндерлинское» с учетом вида обработки и внесения удобрений

R _{NDVI и CSTD}	Вид обработки почвы							
	фон удобренный				фон неудобренный			
	a	b	c	d	a	b	c	d
поверхность почвы влажная и сухая	0,87	0,84	0,86	0,82	0,85	0,77	0,85	0,80
поверхность почвы сухая	0,94	0,93	0,95	0,93	0,94	0,87	0,93	0,90

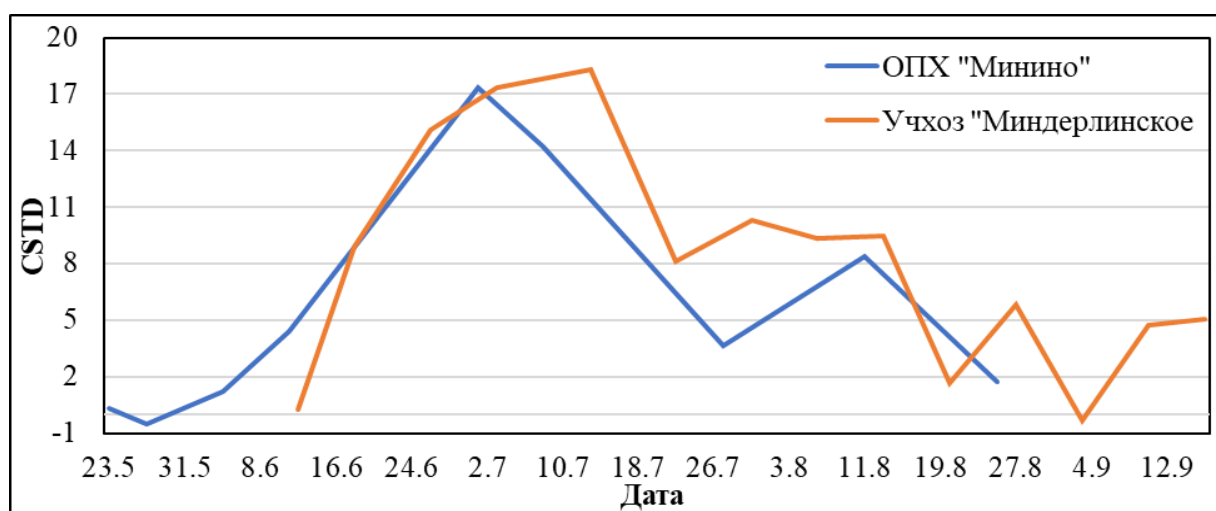


Рис. 1. Изменение средних значений CSTD посевов ячменя (учхоз «Миндерлинское») -А и ОПХ «Минино» (КрасНИИСХ) – Б в течение периода вегетации 2020 г.

Сопоставление полученных данных показало, что временные ряды CSTD посевов ячменя имеют единый характер изменений значений во времени (рис. 1).

Установлено, что смена фаз вегетации посевов приводит первоначально к увеличению CSTD, достигая максимальных значений 1 июля (ОПХ «Минино») и 13 июля (учхоз «Миндерлинское»), далее данное значение уменьшается. Смещение максимумов значений определяется разным сроком сева культур. Посев ячменя на ОПХ «Минино» произведен на 8 дней раньше, чем посев в учхозе «Миндерлинское».

Снижение значений CSTD в следующие даты (12 июня, 22 июля, 20 августа, 3 и 10 сентября) определено повышенной влажностью почвы. За сутки до проведения измерений на данных участках выпадали осадки объемом 4, 2, 7, 1, 2 мм, соответственно. Влажные почвы имеют более низкие температуры поверхности, по сравнению с сухими. В связи с этим разница значений между почвой и растительностью будет наименьшей.

Общее отличие кривых разности температур на объектах: учхоз «Миндерлинское» и ОПХ «Минино» (КрасНИИСХ) определяется также разностью микроклимата исследуемых территорий.

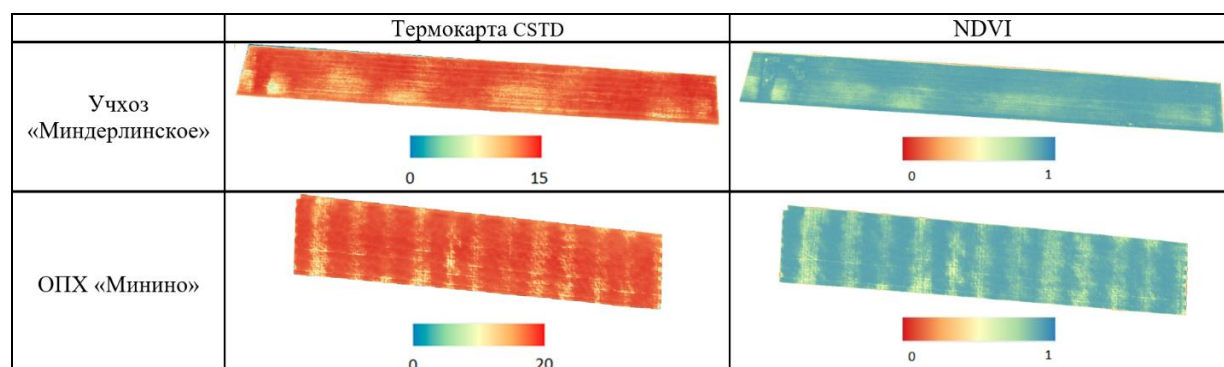


Рис. 2. Пространственное распределение CSTD и NDVI посевов ячменя, расположенных на территории учхоз «Миндерлинское» (вид обработки почвы – вспашка) и ОПХ «Минино». Значения CSTD на территории учхоз «Миндерлинское» изменяются от 0 (min) до 15(max) °С, ОПХ «Минино» от 0 до 20 °С.

Построение температурных карт исследуемых участков в течение периода вегетации, позволило определить особенности пространственного распределения температур в зависимости от типов обработки почвы и фенологических свойств растений (рис. 2). Полученные карты показывают возможность учета внутривольной динамики температур при реализации методов точного земледелия.

Исследование выполнено при поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках реализации проекта: «Разработка и внедрение метода раннего прогнозирования урожайности зерновых культур в Сибирском регионе по данным дистанционного зондирования Земли».

Список литературы

1. Mulla D.J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // Biosyst. Eng. 2013. № 114. pp. 358–371.
2. Espinoza C.Z., Khot L.R., Sankaran, S., Jacoby, P.W. High Resolution Multispectral and Thermal Remote Sensing-Based Water Stress Assessment in Subsurface Irrigated Grapevines // Remote Sens. 2017. № 9. pp. 961.
3. Bellvert J., Zarco-Tejada P.J., Marsal J., Girona J., Gonzalez-Dugo V., Fereres E. Vineyard irrigation scheduling based on airborne thermal imagery and water potential thresholds // Aust. J. Grape Wine R. 2016. № 22. pp. 307–315.
4. Gonzalez-Dugo V., Goldhamer D., Zarco-Tejada P.J., Fereres E. Improving the precision of irrigation in a pistachio farm using an unmanned airborne thermal system // Irrig. Sci. 2015. № 33. pp. 43–52.
5. Park S., Ryu D., Fuentes S., Chung H., Hernyandez-Montes E., O’Connell M. Adaptive Estimation of Crop Water Stress in Nectarine and Peach Orchards Using High-Resolution Imagery from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) // Remote Sens. 2017. № 9. pp. 828.
6. Gomez-Candon D., Virlet N., Labbe S., Jolivot A., Regnard J.L. Field phenotyping of water stress at tree scale by UAV-sensed imagery: New insights for thermal acquisition and calibration // Precis Agric. 2016. № 17. pp. 786–800.
7. Tattaris M., Reynolds M.P., Chapman S.C. A Direct Comparison of Remote Sensing Approaches for High-Throughput Phenotyping in Plant Breeding // Front. Plant Sci. 2016. № 7. pp. 1131.
8. Costa J.M., Grant O.M., Chaves M.M. Thermography to explore plant-environment interactions // J. Exp. Bot. 2013. № 64. pp. 3937–3949.

D. V. Emelyanov, I. Yu. Botvich, A. P. Shevyrnogov

Institute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: dima9526@gmail.com

CROP AND SOIL TEMPERATURE DIFFERENCE AN ADDITIONAL FACTOR FOR ANALYSIS OF THE CONDITION OF CROPS

The study aims to study changes in land surface temperature (LST) of soil and vegetation on agricultural land planted with barley based on unmanned LST data. Simultaneously with the LST data, the spectral characteristics (NDVI) of crops were measured using the DJI P4 Multispectral. The paper shows the variability of vegetation indices and radiation temperature during the growing season. A significant relationship was found between the dynamics of NDVI and the dynamics of radiation temperature. The features of the variability of the spatial distribution of temperatures depending on precipitation are shown. The paper gives an example of a temperature map of the studied areas in the middle of the growing season, which shows the features of the spatial distribution of temperatures.

Keywords: radiation temperature, crop, thermal map, ZENMUSE XT2, DJI P4 Multispectral, CSTD.

**А. Н. Забродин¹, В. Б. Кашкин¹, Т. В. Рублева¹,
К. В. Симонов², Р. В. Одинцов¹**

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: tvrubleva@mail.ru, simonovkv@icm.krasn.ru

ВАРИАЦИИ ПОЛНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

В работе изучались вариации полного электронного содержания (ПЭС), полученные по измерениям глобальной навигационной системы GPS в зоне подготовки Чилийского землетрясения 2010 г. ($M=8.8$) при спокойных фоновых условиях в минимуме 24 цикла солнечной активности (СА). Выполнен анализ геодинимической активности и ионосферных возмущений ПЭС в сейсмоактивном районе этого катастрофического землетрясения. Разработана вычислительная методика, которая может быть использована для исследования вариаций ПЭС над сейсмоактивными районами.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферные возмущения, полное электронное содержание, землетрясение, геодинимика, солнечная активность.

Введение. Исследование ионосферы над сейсмоактивными районами по спутниковым данным глобальных навигационных систем GPS/ГЛОНАСС в процессе геодинимического мониторинга является актуальной задачей. В [1, 2] подчеркивается, что подвижки по разлому земной коры в эпицентральной области землетрясения приводят к существенному воздействию на атмосферу и излучению гравитационных волн вдоль земной и океанической поверхности. В [2] отмечается, что внутренние гравитационные волны приводят к изменению полной электронной концентрации (ПЭС/ТЕС, total electron content) в ионосфере, что может быть зарегистрировано приемной аппаратурой ГЛОНАСС/GPS.

Работа посвящена изучению сейсмических данных в очаговой зоне будущего сильного Чилийского землетрясения 2010 г. с $M=8.8$ в относительно спокойных фоновых условиях. Это катастрофическое землетрясение было зарегистрировано 27 февраля 2010 г. Временной период исследований – это январь-март 2009 года.

Важно отметить, что 2009 год совпадает с началом 24-го цикла солнечной активности (СА) [3]. Из оценок, приведенных в [4] следует, что пиковая сейсмическая активность обратно пропорциональна минимальной солнечной активности, коэффициент корреляции равен $R=-0,8$. Отметим, что за последние 50 лет в Южной Америке, в феврале 2010 г., произошло одно из самых разрушительных землетрясений магнитудой $M_w=8.8$. Это землетрясение вызвало сильное цунами, высота которого достигала 3 метров в береговой зоне провинции Мауле (Чили).

Целью нашего исследования является детальный анализ сейсмических данных в очаговой зоне сильного Чилийского землетрясения 2010 г. с $M=8.8$ при спокойных фоновых геофизических условиях, а также уточнение вариаций полного электронно-

го содержания, полученных по измерениям глобальной навигационной системы GPS, в зоне подготовки Чилийского землетрясения 2010 г.

Экспериментальные геодинамические данные. По данным геодинамического каталога USGS [5] проводился анализ геофизической информации в январе-марте 2009 года в очаговой зоне будущего Чилийского землетрясения $M_w=8.8$ при спокойных фоновых условиях. Обнаружено, что в этот период в исследуемом районе наблюдались 32 сейсмических события слабой и средней силы, их магнитуды варьировались от 3.8 до 5.3. Выявлено, что глубины гипоцентров зарегистрированных сейсмических событий изменялись от 0.3 км до 148 км. Двенадцать рассматриваемых подводных землетрясений находились вблизи соединения двух тектонических плит Наски и Южно-Американской, а остальные двадцать – вблизи Чилийского побережья около переходной зоны суша-океан.

Распределение магнитуд коровых и промежуточных землетрясений представлено на рис. 1. Здесь синим цветом показаны коровые землетрясения, возникшие на глубине до 70 км, а красным – промежуточные с гипоцентром от 70 до 300 км.

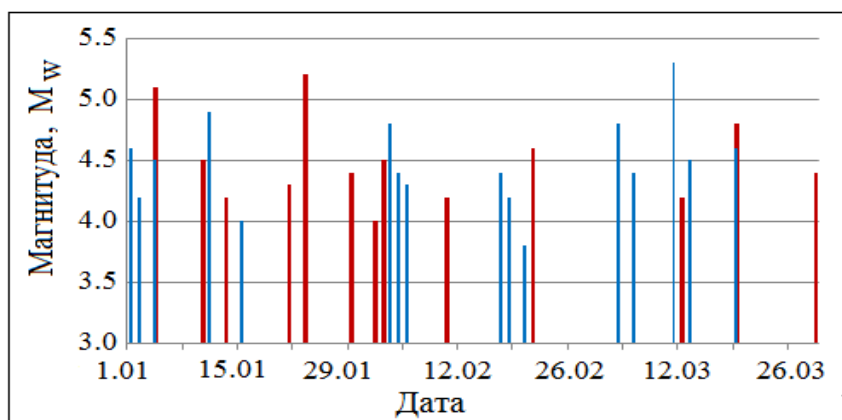


Рис. 1. Распределение коровых и промежуточных землетрясений с $M_w > 3$ с января по март 2009 г.

Как видно на рис. 1 в изучаемом сейсмоактивном районе в течение каждого месяца происходила последовательная смена двух динамических режимов в виде сейсмического затишья и геодинамической активности. Продолжительность временных промежутков этих режимов варьируется от 1 дня до 2 недель. Вероятно, такой ритм колебаний в очаговой зоне будущего Чилийского землетрясения отражает чередование различных землетрясений по магнитуде и глубине возникновения, а также связан с развитием процесса непрерывной сейсмичности.

Ионосферные предвестники землетрясений. Над очаговыми зонами сильных землетрясений во время сейсмической активности были неоднократно обнаружены аномальные возмущения (неоднородности) в ионосфере [7, 8]. Данные атмосферные объекты являются структурными элементами ионосферной плазмы и регистрируются в виде нерегулярных отклонений ее электронной концентрации и других характеристик от средних [1].

В качестве ионосферных предвестников сильных землетрясений изучают вариации полной электронной концентрации [7]. Согласно [9] ПЭС – интегральное коли-

чество электронов, содержащихся в вертикальном столбе атмосферы сечения 1 м^2 с основанием у земной поверхности и до высоты пролета спутника. Полное электронное содержание определяется, в основном, электронной концентрацией в максимуме ионосферного слоя F_2 , где преобладает ион кислорода O_+ .

Значения ПЭС, извлеченные из измерений GPS, представлены в специальном формате IONEX [10]. Нами разработана методика обработки этих данных. Сформирован архив значений полной электронной концентрации над эпицентральной областью сильного землетрясения $M_w=8.8$ для фоновых условий января-марта 2009 г. и активных сейсмических процессов в феврале 2010 г. (рис. 2).

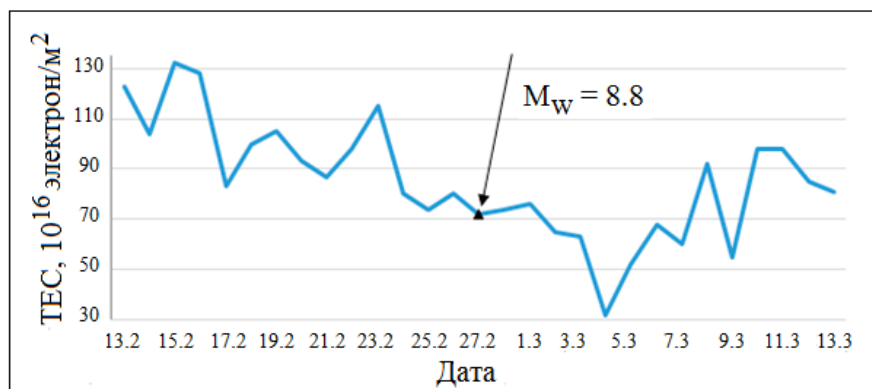


Рис. 2. Вариации ПЭС в ионосфере относительно эпицентральной области Чилийского землетрясения

На рис. 2 показаны изменения значений ПЭС в течение месяца с 13 февраля по 13 марта 2010 г. Этот период охватывает 2 недели подготовки землетрясения $M_w=8.8$ и 2 недели афтершоковой активности в его эпицентральной области. Единица ПЭС равна: $1 \text{ ПЭС} = 10^{16}$ электрон/ м^2 . Стрелкой отмечена дата 27 февраля 2010 г., когда произошло сейсмическое событие в Мауле (Чили). Обнаружено, что за 4 дня до основного сейсмического момента значения ПЭС в ионосфере над эпицентральной областью Чилийского землетрясения снизились в 2 раза, с $(115 \times 10^{16}$ электрон/ м^2) до $(72 \times 10^{16}$ электрон/ м^2).

Заключение. В ходе выполнения исследований получены следующие результаты. Подготовлена база сейсмических данных для очаговой зоны сильного Чилийского землетрясения 2010 г. с $M=8.8$ при относительно спокойных фоновых условиях в январе-марте 2009 г. в минимуме 24 цикла солнечной активности (СА). Сформирован архив данных ПЭС, полученных на основе спутниковой информации GPS, за исследуемые периоды в 2009 и 2010 годах. Разработана методика обработки и интерпретации данных ПЭС. Выполнен сравнительный анализ геофизических и ионосферных данных в очаговой зоне Чилийского землетрясения в период его подготовки в январе-марте 2009 г. Проведен детальный анализ значений ПЭС, что позволяет уточнить начало подготовки в зоне Чилийского землетрясения.

Список литературы

1. Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Ольшанская Е.В. Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // Физика Земли. 2019. № 1. С. 199-213. doi: 10.31857/S0002-333720191199-213

2. Kashkin V., Odintsov R., Rubleva T., Romanov A., Simonov K. The Lower Atmosphere Response to Seismic Events Using Satellite Data / In: Kocharyan G., Lyakhov A. (eds) Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, 2019. P. 515-521. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_54
3. Мировой Центр Данных по Солнечно-Земной Физике. URL: <http://www.wdcb.ru/stp/data.ru.html>
4. Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П. О взаимосвязях эндогенной активности земли с солнечной и геомагнитной активностью // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428. № 1. С. 1–4.
5. USGS. URL: <https://earthquake.usgs.gov/> Дата обращения: 20.03.2021
6. Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Мониторинг состояния среды зоны субдукции. Возможности краткосрочной оценки сейсмической опасности // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 2 (34). С. 77-84.
7. Liu J.Y., Le H., Chen Y.I., et al. Observations and simulations of seismoionospheric GPS total electron content anomalies before the 12 January 2010 M7 Haiti earthquake // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116. A4302. 9 pp. doi:10.1029/2010JA015704.
8. Ларюнин О.А. Наблюдения ионосферных неоднородностей с помощью U-образных треков на ионограммах // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т.10 № 3. С. 655-662. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0432>
9. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН. 2006. 480 с.
10. IONEX. URL: <ftp://cddis.nasa.gov/gnss>

A. N. Zabrodin¹, V. B. Kashkin¹, T. V. Rubleva¹,
K. V. Simonov², R. V. Odintsov¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: tvrubleva@mail.ru, simonovkv@icm.krasn.ru

VARIATIONS OF THE TOTAL ELECTRONIC CONCENTRATION IN THE IONOSPHERE IN SEISMOACTIVE REGIONS

In this work we studied the variations in electron content (TEC) obtained from measurements of the global navigation system GPS in preparation for the Chilean earthquake in 2010 (M = 8.8) under calm background conditions at a minimum of 24 solar activity (SA) cycles. The analysis of the geodynamic activity of ionospheric TEC disturbances in the seismically active region of this catastrophic earthquake is carried out. A computational technique has been developed that can be used to study TEC variations over seismically active regions.

Keywords: ionosphere, ionospheric disturbances, total electron content, earthquake, geodynamics, solar activity.

Е. Н. Кулик¹, Д. А. Байкин²

¹ Кандидат технических наук, доцент. ² Магистрант,
Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru, Baykin-DA2020@sgugit.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА СОСТОЯНИЕ ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Целью исследования является анализ влияния разлива нефтепродуктов на состояние природных комплексов по данным съемочной системы Sentinel-2, на примере аварии, которая произошла в городе Норильск, находящегося в Красноярском крае.

На сегодняшний день, данные, полученные с помощью космической съемки, имеют применение во многих областях жизни человека: экология, прогнозирование природных катаклизмов, картографирование, а также добыча, транспортировка и хранение нефтегазовых продуктов. Северная часть Российской Федерации является ценным источником добычи углеводородов. Учет климатических особенностей района очень важен при проведении строительных, нефтедобывающих и транспортировочных работ, так как экосистема при таких условиях имеет очень низкий уровень самовосстановления. В свою очередь загрязнения природных комплексов только способствуют деградации северных ландшафтов.

Ключевые слова: мониторинг, данные ДЗЗ, дешифрирование, растительный покров, водный индекс, индекс растительности, мультивременные изображения, композитные изображения.

Для выполнения исследования были использованы данные, полученные с помощью съемочной системы MSI спутников Sentinel-2. Sentinel-2 – это семейство спутников Европейского космического агентства.

Были выбраны космические снимки на дату крупнейшей аварии в арктической зоне, при которой около 21 тысячи тонн нефтепродуктов попали за пределы зоны ТЭЦ, а также 6 тысяч тонн попали в почвы и 15 тысяч тонн в реку Далдыкан. Авария произошла при разгерметизации бака с дизельным топливом 29 мая 2020 года.

Для проведения анализа были созданы синтезированные изображения, при этом использовались следующие спектральные каналы: Blue (от 0,458 до 0,522 мкм), Green (от 0,543 до 0,577 мкм), Red (от 0,650 до 0,680 мкм), NIR (от 0,784 до 0,899 мкм). Даты снимков: до аварии (21.05.2020 г.), через два дня после аварии (31.05.2020 г.), спустя 1,5 месяца (10.07.2020 г.) (рис. 1).

Далее, для проведения дешифрирования типов объектов на снимках, в частности водных и растительных, был применен индекс NDVI или нормализованный разностный вегетационный индекс, который показывает количество фотосинтетически активной биомассы. Он рассчитывается по показателям поглощения и отражения поверхностью растений красных и ближних инфракрасных лучей спектра.

Также была применена модель для классификации индексного изображения NDVI. Классификация проводилась по пороговым значениям яркости индекса NDVI.

Зеленым цветом показана растительность, оранжевым и коричневым – почвы, а синим и голубым – водные объекты. Результат классификации представлен на рис. 2.

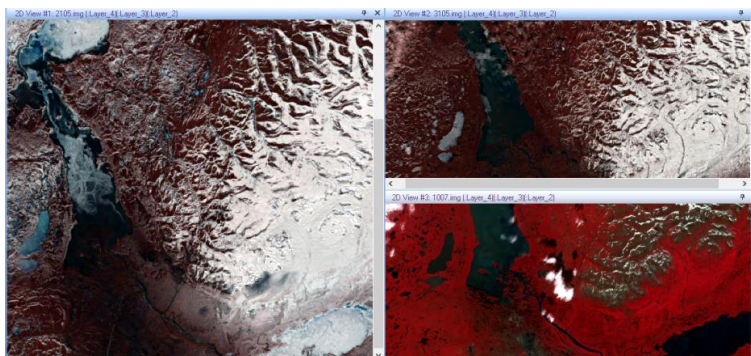


Рис. 1. Синтезированные изображения

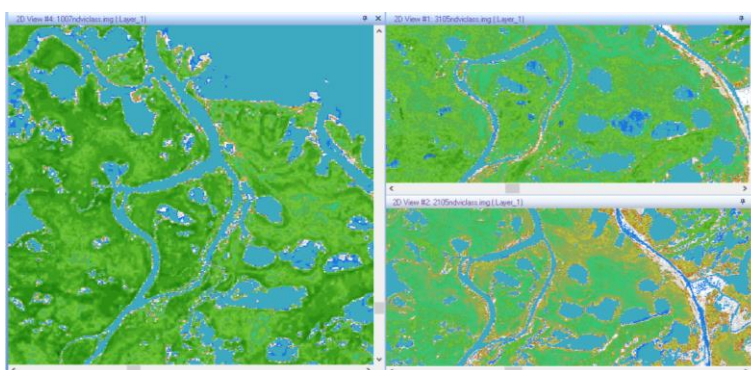


Рис. 2. Классифицированные индексные изображения NDVI

Затем к синтезированным изображениям был применен индекс NDWI. Индекс является нормализованным разностным водным индексом. Он используется при обнаружении на космических многоспектральных и мультиспектральных изображениях водных объектов. Индекс NDWI, также, как и NDVI, принимает значения от -1 до 1 . Только, при расчете индекса NDWI вместо значений отражений красной части спектра используются значения отражений зеленой зоны волн. Результат применения индекса NDWI представлен на рис. 3.

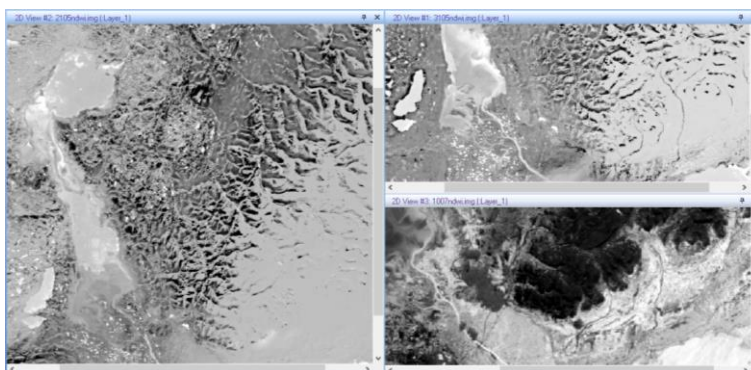


Рис. 3. Индексные изображения NDWI

Для выявления изменений, связанных с разливом нефтепродуктов, по индексным изображениям NDVI на три даты был создан мультивременной композит, где

красный канал – это индексное изображение, полученное до аварии (25.05.2020 г.), зеленый канал – индексное изображение на момент через двое суток после аварии (31.05.2020 г.), синий канал – индексное изображение через 6 недель (10.07.2020 г.). Созданное мультिवременное композитное изображение представлено на рис. 4.

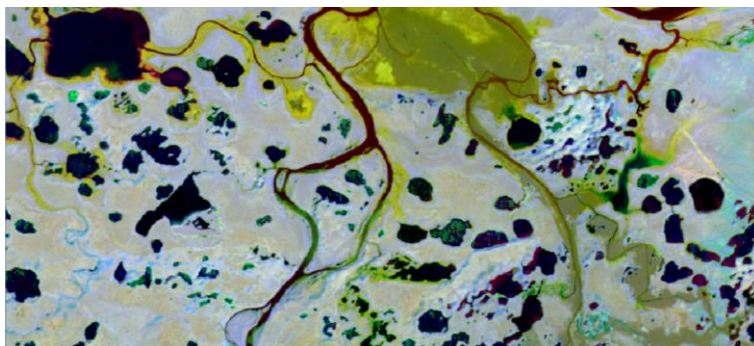


Рис. 4. Мультिवременное композитное изображение по NDVI

Подобным образом был создан мультिवременной композит по результатам расчета индекса NDWI (рис. 5).

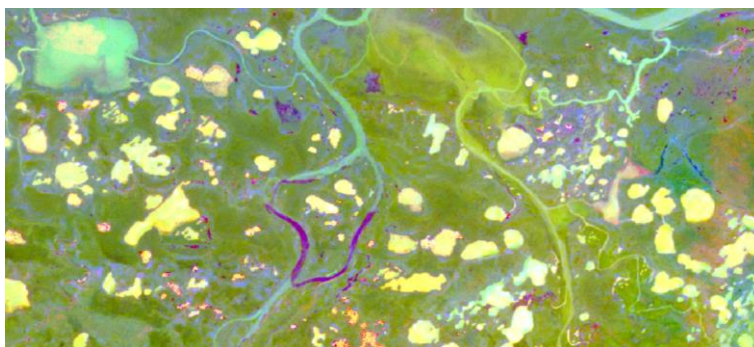


Рис. 5. Мультिवременное композитное изображение по NDWI

В результате анализа мультिवременных композитных изображений, были выявлены изменения водной и растительной поверхности в результате разлива нефтепродуктов.

При анализе изменений наиболее информативным оказался композит изображений индекса NDVI, нежели индекс NDWI, который в данном исследовании может быть пригодным только для определения влагосодержания растений.

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. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.
2. NDVI – теория и практика [Электронный ресурс]. URL: <https://gislab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения: 10.04.2021).

3. Recent trends and remaining challenges for optical remote sensing of Arctic tundra vegetation: A review and outlook / Alison Beamisha, Martha K. Reynolds, Howard Epstein, et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2020. – № 246, С. 1–12.

4. Кулик Е. Н., Байкин Д. А. Мониторинг растительности в районах добычи и транспортировки нефти методами автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. науч. конф. – Красноярск: СФУ, 2020. – С. 244–247.

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

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF OIL SPILLS ON THE STATE OF NATURAL COMPLEXES IN THE CONDITIONS OF EASTERN SIBERIA

The study aims to analyze the impact of an oil spill on the state of natural systems according to the Sentinel-2 data, using the example of an accident that occurred in the city of Norilsk, located in the Krasnoyarsk Region.

Today, the data obtained with the satellite imagery systems are used in many aspects: ecology, forecasting of natural disasters, mapping, as well as the production, transportation, and storage of oil and gas products. The northern part of the Russian Federation is a valuable source of hydrocarbon production. Keeping in mind the climatic particularity of the area is very important when providing construction, oil production, and transportation works since the ecosystem being under climate pressing has a very low level of self-recovery potential. At the same time, pollution of natural complexes only increases the degradation of northern landscapes.

Keywords: monitoring, DDZ data, decryption, vegetation cover, water index, vegetation index, multi-time images, composite images.

Е. Н. Кулик¹, А. Т. Байшуаков²

¹ Кандидат технических наук, доцент. ² Студент,
Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru; arslan.bayschuakov@mail.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ ПОЧВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Для идентификации генетических типов почв в работе используются методы цифрового анализа и автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли. Автоматизация дешифрирования данных космической съемки позволяет минимизировать объемы полевых работ, тем самым являясь экономически и управленчески выгодным и менее трудозатратным методом изучения особенностей территории, чем традиционные контактные методы. В ходе исследования определено состояние земель путем расчета и анализа индексных изображений; применение дешифровочных признаков позволило идентифицировать генетические типы почв. Методика и результаты анализа могут послужить основой при решении задач обновления почвенных карт.

Ключевые слова: почвы, растительность, дешифрирование, SAVI, данные ДЗЗ.

В задачах мониторинга природных ресурсов весьма значимым является выявление характеристик почв. Оценка почвенного плодородия считается неотъемлемой частью сельскохозяйственного мониторинга. Анализ состояния почв позволяет выявлять деградированные и нарушенные земли в целях последующей разработки мероприятий по восстановлению почв. Посредством анализа данных дистанционного зондирования Земли появляется возможность выполнять мониторинг плодородия почв, создавать и актуализировать почвенные карты, с помощью которых сельхозпроизводители могут проводить агро-производственную группировку и бонитировку почв. Применение методов автоматизации анализа аэрокосмических данных для распознавания генетических типов почв является целью данного исследования.

Для достижения поставленной цели были сформулированы задачи, направленные на углубленную географическую изученность территории, определение состояния растительности и почв с использованием почвенного индекса SAVI, и составление схемы, отображающей типы почв, выявленных по дешифровочным признакам.

В качестве исходных данных в работе используется мультиспектральный космический снимок, полученный со спутника SPOT-6. Спектральные диапазоны съемочной аппаратуры представлены каналами видимого спектра электромагнитных волн и ближним инфракрасным каналом [1]. В качестве дополнительных тематических сведений использовалась почвенная карта, составленная в 1985 году. Исследуемая территория расположена в северной части Доволенского района Новосибирской области на землях Утянского муниципального образования, используемая в сельскохозяйственном обороте значительное количество лет.

Рельеф исследуемой территории представляет собой слаборасчлененную волнистую равнину с гривами высотой до 15 м, параллельно ориентированных с юго-запада на северо-восток. Гривы заняты черноземными почвами [2]. Межгривные понижения заняты болотами и озерами, где, соответственно, распространены болотные и торфяно-болотные почвы. Большую часть исследуемой территории занимают лесостепные равнины, на которых преобладают солонцовые почвы. Почвообразующими породами служат суглинки и супеси.

Растительный состав довольно пестрый. На солонцовых почвах наблюдаются луговые степи и остепененные луга. В западинах, занятых осиново-березовыми колками, имеются солодовые почвы. В приозерных террасах встречаются солончаки, на которых растительность сильно изрежена и представлена специфическими галофитными видами.

На сравнительно небольших по площади территориях, изображенных на отдельных космических снимках высокого пространственного разрешения, возможно проведение исследования по выявлению сезонных и/или многолетних локальных изменений характеристик геосистем. Для дешифрирования типов почв желательно использовать снимки за весенний и осенний период, когда растительность более разряженная либо вовсе отсутствует. Наиболее достоверная идентификация генетических типов почв достигается при наличии возможности анализа прямых признаков дешифрирования: таких, как спектральная яркость, цвет, фон, размер, форма, структура, текстура и рисунок. Косвенными признаками дешифрирования почв являются индикаторы растительности и рельефа [4].

Для дешифрирования участков, лишенных растительности, а также участков с растительностью, использовался метод расчета индексных изображений SAVI, полученных путем арифметических операций со значениями яркости в разных спектральных зонах. В результате расчета вегетационного почвенного индекса SAVI были выявлены площади с открытыми грунтами, которые характерны для пахотных земель, расположенных на черноземных почвах. Поскольку был использован снимок за осенний период, визуальной оценкой подтвержден факт уборки сельскохозяйственных культур на посевных площадях. Анализ изображения продемонстрировал, что большую часть территории занимает разряженная растительность. Индексное изображение SAVI, представленное на рисунке 1, было получено в программном комплексе ScanEx Image Processor.

По косвенным признакам дешифрирования, используя индикаторы растительности и рельефа, а также индексное изображение и данные почвенной карты 1985 года, в программном комплексе ArcGIS была составлена схема типов почв, включающая восемь генетических типов: черноземные, луговые, болотные, лугово-черноземные, черноземно-луговые, солонцы, солончаки и солоды (рис. 2).

При создании схемы типов почв были изучены взаимосвязи между, собственно, типами почв и индикаторами для их идентификации.

Расчет разнообразных индексных изображений является весьма гибким, достаточно популярным и, зачастую, универсальным методом анализа мультиспектральных космических снимков для получения информации о характеристиках растительности и почвенного покрова [5]. В результате исследования по данной теме авторами

были изучены географические особенности территории интереса, применены методы цифрового анализа снимков: выполнены расчеты индекса SAVI и с использованием дешифровочных признаков, составлена схема типов почв. Представляемые результаты с идентифицированными генетическими типами почв по данным дистанционного зондирования позволят сельскохозяйственным предприятиям наметить рациональные приемы обработки почв.

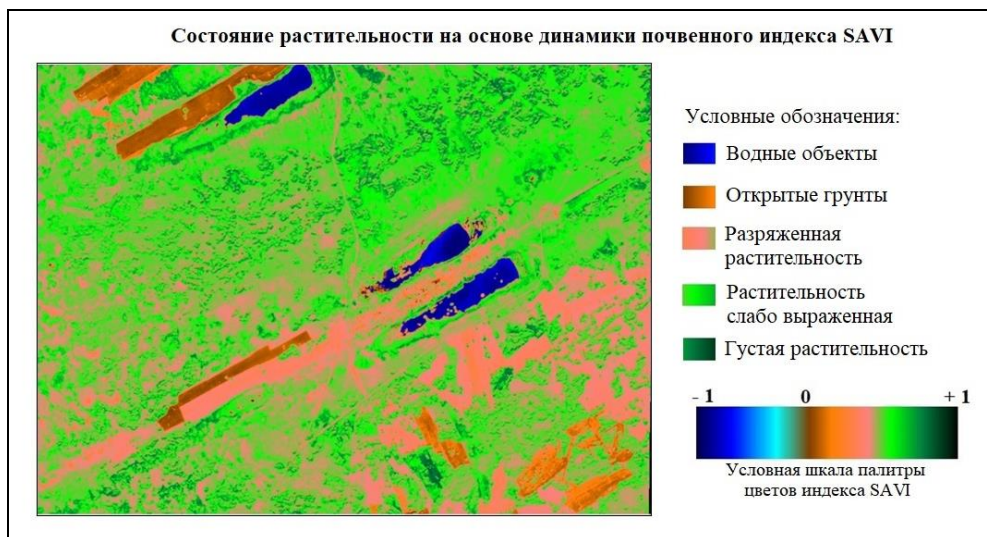


Рис. 1. Индексное изображение SAVI

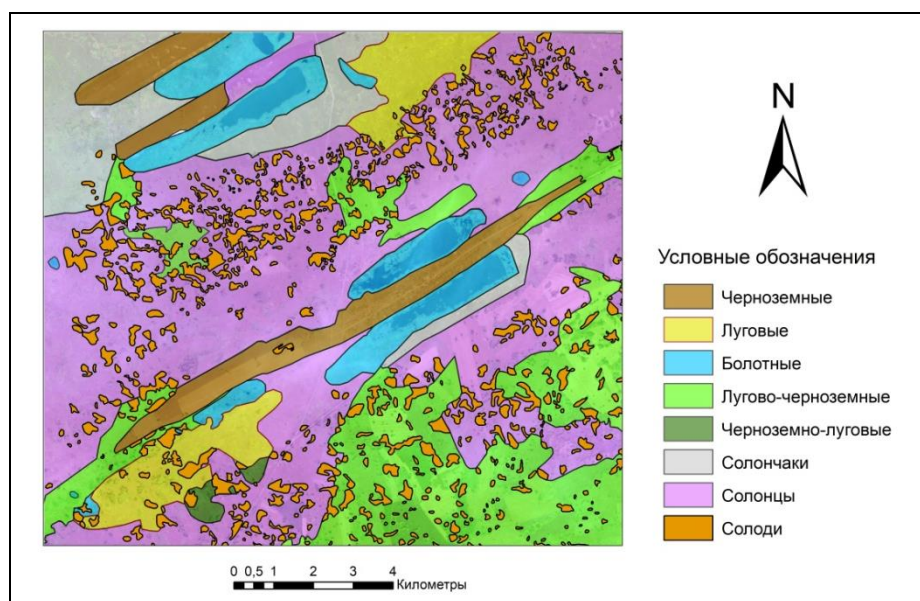


Рис. 2. Схема типов почв

Данное исследование проводилось при информационной поддержке компании ООО «СКАНЭКС» (с предоставлением космических снимков из архива) на основании права на получение информационного обеспечения и снимков призерами Всероссийской студенческой олимпиады по тематическому дешифрированию данных дистанционного зондирования Земли, проводившейся на базе Сибирского государственного

университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева в августе 2017 года.

Цифровая обработка спутниковых изображений выполнялась в программном комплексе ScanEx Image Processor. Оформление результатов выполнялось в программном комплексе ArcGIS.

Список литературы

1. Кулик Е. Н., Байшуаков А. Т. Мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур на различных стадиях развития вегетации по данным дистанционного зондирования Земли // Сб. материалов 7-й Междунар. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». 29 сент. – 2 окт. Красноярск: СФУ, 2020. С. 248–250.
2. Байшуаков А. Т. Анализ географических объектов по их изображениям на космических снимках для целей почвенного картографирования // Актуальные направления географических исследований в Кемеровской области и других регионах России. Кемерово: КемГУ, 2021. С. 84–88.
3. Дроздов С. Л., Сладкопечев С. А. Дистанционные методы оценки природных ресурсов (рельеф и почвы). М.: МИИГАиК, 2015. С. 178.
4. Гордиенко А. С. Применение индексных изображений при выявлении изменений по разновременным космическим снимкам // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. С. 67–70.

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

IDENTIFICATION OF GENETIC SOIL TYPES REMOTE DATA SENSING

Article presents the digital analysis methods and automated interpretation of remote sensing data for genetic soil types identification. Automation of satellite imagery interpretation allows to minimize the amount of field work, thus it is economically and managerially profitable and less expensive method of studying the features of the territory instead of traditional contact methods. During the study, the condition of the lands was determined by calculating and analyzing of index images; the use of interpret signs made it possible to identify genetic soil types. The methodology and results of the analysis can serve as a basis for updating soil maps.

Keywords: soils, plant cover, interpretation, SAVI, remote data sensing.

А. В. Игнатьева

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия
e-mail: anna_tomsktsu@mail.ru

МЕСТО ПОЖАРОВ В ОБЩЕЙ ДИНАМИКЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БУРЯТИЯ

В субъектах Сибирского федерального округа фиксируется возникновение разнообразного рода опасностей, среди которых особое место занимают пожары. Республика Бурятия особенно подвержена проявлению пожаров. В статье представлен анализ пожароопасной обстановки в Республике Бурятия и ее лесничествах за период с 2013 по 2019 гг. Также рассчитана уязвимость лесничеств республики от проявления пожаров и проанализирована степень их подверженности проявлению пожаров. Таким образом выявлены территории, где за исследуемый период отмечено наибольшее возникновение лесных пожаров. Проанализирована смертность и травмированность населения субъекта от воздействия лесных пожаров.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации природного характера, пожары, опасные природные явления, распространение пожаров, Республика Бурятия, уязвимость территории от пожаров.

Изучение специфики возникновения, проявления и распространения пожаров занимает ведущую роль в исследованиях чрезвычайных ситуаций различного генезиса [6, 7, 8, 9]. Республика Бурятия – занимает значительную часть байкальского региона. Леса в Бурятии занимают площадь 29,6 млн. га или 84,4 % от площади региона. Большая часть лесов (около 75%) относится к лесам наиболее пожароопасным (I–III классы), а к I классу — почти одна треть [5].

Иметхенов А.Б. [6] среди главных причин выделяет чрезвычайно высокую горимость древесных пород в составе лесов Бурятии (определяется горимость природно-климатическими особенностями региона, а также преобладанием в составе лесов светлохвойных древесных пород) [6].

Еще одной из важных причин высокой пожарной опасности на территории Бурятии является неравномерное распределение осадков. Районы Восточного Саяна и Прибайкалья (за исключением долины Баргузина) получают влагу в виде осадков 500–800 мм, в горах до 1 000–2 000 мм в год. На Витимском плоскогорье осадков выпадает относительно мало (300–450 мм) и еще меньше — в Селенгинском Забайкалье (200–400 мм) [5].

Обстановка с возникновением ЧС различного генезиса в регионе была следующей. За период с 2013 по 2019 год в Республике Бурятия была зарегистрирована 1 ЧС природного характера и среди ЧС техногенного характера 2 в 2013, 3 в 2017, 3 в 2018 и 2 в 2019 [3, 4].

На рисунке 1 представлена информация о возникновении пожаров в Республике Бурятия за период с 2013 по 2019 гг. на основании информации [3, 4, 11, 14].

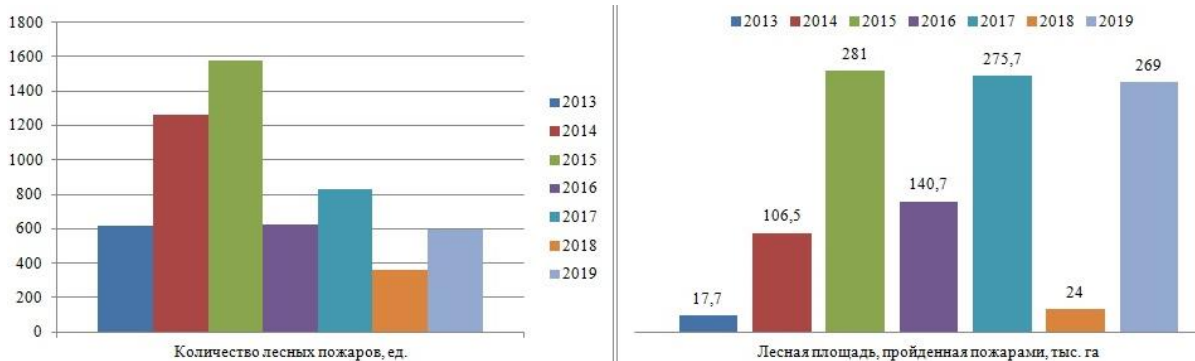


Рис. 1. Характеристика пожароопасной обстановки в Республике Бурятия за период с 2013 по 2019 гг.

За рассматриваемый период наибольшее количество пожаров было зафиксировано в 2015 году. Именно в 2015 году была отмечена наиболее сложная обстановка относительно пожаров. Этому способствовала небывалая засуха, которая отмечена впервые за 125 лет метеонаблюдений [6]. Также в 2015 году в республике отмечено больше всего погибших и пострадавших людей от воздействия лесных пожаров (рисунок 2) на основании информации [12].

Анализ причин возникновения пожаров в Республике Бурятия показал следующее. Основной причиной (61 % среди случаев возникновения) возникновения пожаров являлось местное население. 18 % пожаров возникало вследствие нарушений при лесозаготовке, 14 % случаев возникает от гроз, 5 % пожаров – по вине сельхозпалов, 1 % – по вине участников экспедиций и прочих организации [1].



Рис. 2. Характеристика случаев смертности и травмированности людей от лесных пожаров в Республике Бурятия за период с 2013 по 2019 гг.

Уязвимость территории от пожаров определяется [2]:

$$V(H) = \frac{S(H)}{S(T)}, (\text{га/га}) \quad (1)$$

где $S(H)$ – площадь поражения пожарами, $S(T)$ – общая площадь оцениваемой территории.

На основании представленной формулы был произведен расчет уязвимости Республики Бурятия и лесничеств республики от пожаров (рисунок 3).

Расчет уязвимости лесничеств Республики Бурятия и всего субъекта в целом показал следующее. Наибольшая уязвимость от проявления пожаров характерна

Буйскому, Заудинскому, Кяхтинскому, Улан-Удэнскому лесничествам. Все лесничества расположены южнее административного центра республики (Улан-Уде) и на данных территориях сконцентрировано большое количество населенных пунктов и проживает большое количество населения.



Рис. 3. Уязвимость территории от пожаров по лесничествам Республики Бурятия

На основании проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Наибольшее количество пожаров сконцентрировано в районах, где проживает большое количество населения. Согласно анализу причин возникновения пожаров, большой процент пожаров носит антропогенный характер происхождения.
2. В 2015 году было зафиксировано рекордное количество пожаров, а также большое количество пострадавших и погибших людей от воздействия пожаров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-31-51001.

Список литературы

1. Алтаев А. А. Горимость лесов Бурятии: причины, анализ, перспективы // Материалы научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки «Актуальные вопросы развития аграрного сектора байкальского региона». Улан-Удэ, изд-во: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова. 2019. С. 12-23
2. Борисова Т. А. Лесные пожары в Бурятии: причины и следствия // Вестник ВГУ, серия: география, геоэкология, 2017. № 2. С. 78-84.
3. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2016 году». – М. : МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017. – 360 с.
4. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2017 году». – М. : МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2018. – 376 с.
5. Доржиев Ц. З., Бао Ю., Бадмаева Е. Н., Ванчиндорж Б., Урбазаев Ч. Б., Юшань Ю. Лесные пожары в Республике Бурятия за 2002-2016 гг. // Природа внутренней Азии, № 3(4), 2017. С. 22-37.
6. Иметхенов А. Б. Лесные пожары Бурятии: анализ современного состояния и некоторые рекомендации по проведению профилактических работ // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы техносферной безопасности». Улан-Удэ. 2015. С. 75-79.

7. Игнатъева А. В., Кнауб Р. В., Чупина Е. А. Оценка лесных пожаров на экологическую обстановку и меры по мониторингу за чрезвычайными ситуациями в лесах Томской области // Успехи современного естествознания. – М.: Издательский Дом Академия Естествознания. – №4. – 2020. – С. 85-92.
8. Каранина С. Ю., Каранин А. В., Кочеева Н. А., Барановский Н. В., Беликова М. Ю. Анализ молниевой активности на территории Бурятии на основе данных WWLLN в период с 2010 по 2016 гг. // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН А.Н. Антипова. – Иркутск. – 2019. – С. 120-123.
9. Кнауб Р. В., Игнатъева А. В. Природно-техносферная безопасность: учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 72 с.
10. Лесной план Республики Бурятия 2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://geo.govrb.ru/ralh/activities/documents/lesnoy-plan/> (дата обращения: 10.01.2021).
11. Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации. 2018. Стат. сб. / Росстат. – М., 2018. – 751 с.
12. Регионы России. Социально-экономические показатели [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: www.gks.ru (дата обращения: 17.08.2018 г.).
13. Россия в цифрах. 2016: Крат. стат. сб. / Росстат. – М., 2016. – 543 с.
14. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] // Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. – 2018. – URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 16.07.2018 г.).

A. V. Ignateva

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
e-mail: anna_tomsktsu@mail.ru

THE PLACE OF FIRES IN THE GENERAL DYNAMICS OF THE OCCURRENCE AND DISTRIBUTION OF EMERGENCY SITUATIONS IN THE REPUBLIC OF BURYATIA

In the subjects of the SFD, the emergence of various kinds of hazards is recorded, among which fires occupy a special place. The Republic of Buryatia is especially prone to the manifestation of fires. The article presents an analysis of the fire hazardous situation in the Republic of Buryatia and its forest districts for the period from 2013 to 2019. Also, the vulnerability of the forestries of the republic from the manifestation of fires was calculated and the degree of their susceptibility to the manifestation of fires was analyzed. Thus, the territories were identified where during the study period the greatest occurrence of forest fires was noted. The mortality and injury rate of the population of the subject from the impact of forest fires has been analyzed.

Keywords: natural emergencies, fires, natural hazards, the spread of fires, the Republic of Buryatia, the vulnerability of the territory to fires.

С. П. Ильина¹, А. А. Гостева²

¹Аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Кандидат технических наук, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: Sofya.ilina.1994@mail.ru, AGosteva@sfu-kras.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

В Красноярске с каждым годом количество выбросов в атмосферный воздух возрастает, город периодически занимает лидирующие позиции в мировом рейтинге по индексу качества воздуха. Подсистема мониторинга атмосферного воздуха в Красноярске включает в себя 13 автоматизированных постов наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха. Для более целостного мониторинга воздуха на территории города необходимо расширить сеть автоматизированных постов наблюдения за состоянием атмосферного воздуха. В статье предложено выделение локальных климатических зон города Красноярска и расчет абсолютных высот для задач мониторинга атмосферного загрязнения. Приведены способы применения цифровых моделей рельефа для задач экологического мониторинга. На основе данных SRTM и Merit DEM разработана цифровая модель рельефа на территорию города и его окрестности, получены слои растровых данных для выполнения локальных операций для проведения дальнейших исследований. Разработаны тематические карты, отражающие расположение абсолютных высот на территории города Красноярска. Разработанные тематические карты также отражают расположение локальных климатических зон на территории города Красноярска. Выделены наиболее проблемные зоны города Красноярска с учетом расположения абсолютных высот и для этих зон построены профили абсолютных высот. Основными материалами исследования выступили набор данных миссии SRTM, Merit DEM и шейп-файлы проекта «Open street map». Материалы обрабатывались и анализировались в программном комплексе «ArcGIS 10.7» с помощью модуля «Spatial Analyst».

Ключевые слова: локальные климатические зоны, экологическое районирование города, SRTM, Merit DEM, абсолютная высота.

Рельеф Красноярска разнообразен, так как город и его зеленая зона расположены на стыке трех геоморфологических стран: Западно-Сибирской равнины, Средне-Сибирского плоскогорья и Алтае-Саянской горной страны [1].

Подсистема мониторинга атмосферного воздуха в Красноярске включает в себя 13 автоматизированных постов наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха. Вследствие сложного рельефа на территории города сеть автоматизированных постов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха необходимо развивать с учётом неблагоприятных районов для рассеивания загрязнения в воздухе.

Для расширения возможностей анализа рельефа и выявления неблагоприятных районов Красноярска необходимо город представить в виде цифровой модели местности с рассчитанными абсолютными высотами рельефа над уровнем моря с учетом погрешности, то есть высоту рельефа с учетом застройки города. Традиционно в качестве параметров функциональной оценки рельефа используют такой показатель, как абсолютная высота [3,4].

В наше время существуют различные данные дистанционного зондирования Земли для построения ЦМР. Оптимальными данными для построения цифровой модели на территорию города Красноярска являются данные SRTM и Merit DEM, поскольку данные WorldDEM являются коммерческими, а ASTER GDEM корректировалась по данным SRTM.

Город Красноярск активно застраивается. Для расширения сети постов наблюдения за загрязнением воздуха помимо учёта особенностей рельефа необходимо обратить внимание и на застройку города. Для этого на территории города были выделены локальные климатические зоны, позволяющие свести различные сочетания застройки и земельного покрова к ограниченному числу классов. Локальные климатические зоны – области с однородным покрытием поверхности, структурой, материалами и особым характером человеческой деятельности, которые имеют особый для них тип взаимодействия с приземным слоем атмосферы [5].

В данной статье применяется метод выделения локальных климатических зон, предложенные Стюартом И.Д. и Оке Т.Р. Метод представляет собой схему классификации локальных климатических зон, которая состоит из 17 типов зон, основанных главным образом на свойствах структуры подстилающей поверхности, высотности покрытия, этажности строений и плотности застройки. Для города Красноярска преобладающими типами застройки являются: частный сектор, крупногабаритная застройка и тяжелая промышленность, жилые кварталы. Было решено переклассифицировать локальные климатические зоны, предложенные Стюартом И.Д. и Оке Т.Р. для актуальности их применения для изучения территории города Красноярска. Типы локальных климатических зон застройки, а именно, компактная высокоэтажная застройка, компактная среднеэтажная застройка, открытая высокоэтажная застройка и открытая среднеэтажная застройка были объединены в жилые кварталы, компактная малоэтажная застройка, рассеянная и открытая малоэтажная застройка были объединены в частный сектор, крупногабаритная малоэтажная застройка и тяжелая промышленность также стали одним типом [6].

Средствами ArcGIS с помощью встроенного инструмента ArcGIS «Алгебра карт» на основе данных SRTM, Merit DEM и данных проекта OpenStreetMap построена цифровая модель рельефа на территорию города Красноярска и его окрестностей. В результате анализа цифровой модели рельефа были получены растровые слои, содержащие данные об абсолютной высоте местности города и его окрестностях.

Как можно увидеть из рисунка 1 абсолютные высоты в центральной части города почти повсеместно ниже окружающего рельефа. Карта абсолютных высот на территории города Красноярска наглядно иллюстрирует, что высота абсолютных высот на террасах с первой по четвертую редко превышает высоту окружающего рельефа города Красноярска. По данной карте можно предположить, что рельеф может задерживать загрязнения атмосферного воздуха над городом. Также по карте видно, что новая застройка города располагается на высоких террасах (Советский район), что также может ухудшать циркуляцию воздушных масс.

В центральной части города Красноярска абсолютная высота рельефа и очистных сооружений промышленных предприятий ниже, чем высота рельефа вокруг центра города.

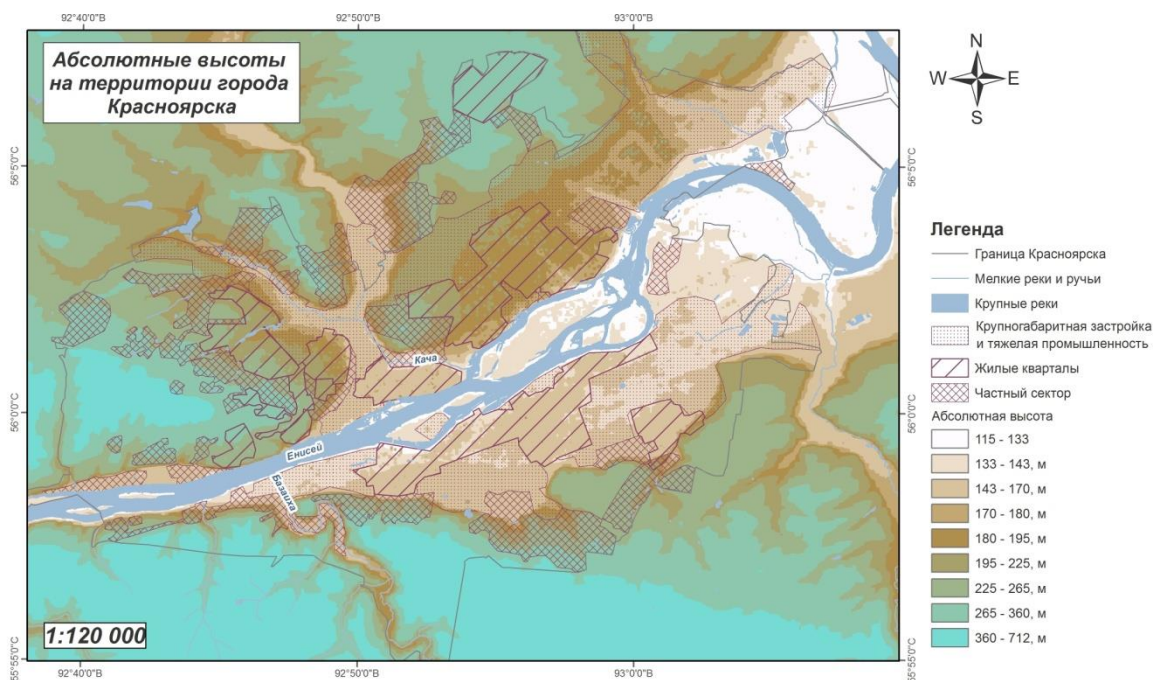


Рис. 1. Карта абсолютных высот на территории города Красноярска

На основании этого можно предположить, что рельеф задерживает рассеивание загрязнения в атмосфере. Также по результатам работы можно предположить, что центральная часть города является зоной аккумуляции загрязняющих веществ. Для более полного исследования загрязнения атмосферного воздуха возможно расширить существующую сеть автоматизированных постов наблюдения с учётом неблагоприятных районов для рассеивания загрязнений в воздухе, а именно, установить дополнительные посты наблюдения в центральной и северо-восточной части города.

Список литературы

1. Авдеева Е.В., Вагнер Е.А., Извеков А.А. Ландшафтные ресурсы – основа формирования системы озеленения городов (на примере г. Красноярска и его зеленой зоны) [Текст] // Вестник БГУ. – 2012. – №2. – С. 85-90.
2. Мокринiec К.С. Использование ГИС для оценки эстетического потенциала на основе геоморфологических данных (на примере г. Красноярска) [Текст] / К.С. Мокринiec // Всероссийский журнал научных публикаций. – 2011. – С. 73–75.
3. Трубина Л.К., Селезнев Б.В. Роль морфометрии рельефа в формировании экологических условий городской среды [Текст] / Л.К. Трубина, Б.В. Селезнев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. С. 1-5.
4. Гармс Е.О., Хромых В.В., Сухова М.Г. Использование ГИС в оценке геоморфологических ресурсов для целей рекреации (на примере трансграничного Горного Алтая) [Текст] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.
5. Самсонов Т.Е., Тригуб К.С., Картографирование локальных климатических зон Москвы по космическим снимкам [Текст] / Т.Е. Самсонов, К.С. Тригуб // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 6. – С. 14-25.
6. Local climate zones [Электронный ресурс]: – Режим доступа <http://www.wudapt.org/lcz/>.

S. P. Ilina, A. A. Gosteva

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
Sofya.ilina.1994@mail.ru, AGosteva@sfu-kras.ru

APPLICATION OF REMOTE SENSING DATA IN THE CASE OF ATMOSPHERIC POLLUTION MONITORING

The city Krasnoyarsk is one of the largest industrial cities in the Russian Federation. Every year, the amount of air emissions increases, the city occupies a leading position in world ranking by air quality index. The atmospheric air subsystem in Krasnoyarsk includes 13 automated monitoring posts for atmospheric air pollution. For a more holistic air monitoring in the city, it is necessary to expand the network of automated monitoring posts for atmospheric air. The article proposes the allocation of local climatic zones of Krasnoyarsk and calculated heights for the problems of atmospheric pollution of the city. Methods of using digital elevation models for environmental monitoring tasks are presented. Based on SRTM and Merit DEM data, a digital elevation model was developed on the territory of the city and its environs, raster data layers were obtained for performing local operations for further research. Thematic maps have been developed reflecting the location of absolute heights in the territory of the city of Krasnoyarsk. The developed thematic maps also reflect the location of local climatic zones in the territory of the city of Krasnoyarsk. The most problematic zones of the city of Krasnoyarsk were identified taking into account the location of the absolute heights and profiles of the absolute heights were built for these zones. The main research materials are the SRTM mission dataset, Merit DEM and shapefiles of the OpenStreetMap project. Materials were processed and analyzed in the «ArcGIS 10.7» software package using the «Spatial Analyst» module.

Keywords: local climatic zones, ecological microzoning of the city, SRTM, Merit DEM, absolute altitude.

А. В. Картушинский^{1,2}

¹ Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: kartalvas@rambler.ru

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

ГЛОБАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛИМАТА ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРАЗИИ

В работе обсуждается возможность применения градиентного метода обработки спутниковых данных для изучения пространственных и временных масштабов климатической и синоптической изменчивости атмосферы и океана. Применяется современное программное обеспечение для обработки и анализа спутниковых и контактных данных. При помощи компьютерной обработки долговременных рядов наблюдений метеорологических и океанологических параметров реализована информационная технология для анализа погодных и климатических условий на территории Евразии. На основе методов математической статистики определены корреляционные связи по температуре поверхности между динамически активными зонами Мирового океана. На примере динамики фронтальной зоны струйного течения Гольфстрим обсуждается проблема влияния структурных особенностей градиентного поля температуры океана на локальные изменения погодных и климатических условий суши.

Ключевые слова: градиенты температуры, фронтальные зоны, циркуляция атмосферы, траектории циклонов, кросс-корреляция.

Введение. Океан и атмосфера – это две самоорганизующиеся термодинамические системы, которые своим взаимодействием обеспечивают климатические и погодные режимы планетарной тропосферы Земли. Кратковременное (синоптическое) энергетическое взаимодействие происходит между приводным слоем атмосферы и поверхностным слоем океана, которое, в свою очередь, формирует крупномасштабную (мезомасштабную) циркуляцию в верхних слоях атмосферы и нижних слоях океана за счет вертикальных потоков тепла, влаги, соли и плотностной устойчивости. Основным механизмом ускорения (или замедления) горизонтальных потоков является совместное действие силы барического градиента, отклоняющей силы вращения Земли и силы трения на границах слоев передачи (либо поглощения) кинетической турбулентной энергии. В упрощенном виде таким образом формируются струйные течения в океане и устойчивые гидрологические фронты, в том числе с образованием мезомасштабных вихрей. Циркуляционные потоки в нижнем слое атмосферы, образуют области высокого (антициклоны) и низкого (циклоны) атмосферного давления и атмосферные фронты. Изучение взаимодействия процессов в океане и атмосфере с определением степени изменчивости климата и погоды на территории суши, является насущной проблемой современного научного знания.

Материалы и методы. В качестве исходных данных в работе используются спутниковые наблюдения по поверхностной температуре океана, полученные за различные периоды времени аппаратными средствами с высоким и низким пространственным разрешением. Также использованы стандартные метеорологические данные по постам наблюдений с различным временным периодом усреднения. Обработка и анализ данных спутниковых и контактных измерений проводится с использованием современных информационно-программных средств для расчета поверхностных градиентных характеристик океана [1, 4] и программного приложения для исследования изменчивости климатических условий в приземном слое атмосферы [2].

Результаты и обсуждение. Для определения глобального климатического режима океана проведены расчеты кросс-корреляции усредненных по времени и по пространству температурных градиентов для выделенных по динамической активности зон Мирового океана. Результаты представлены на рисунке 1 из которого видны черты глобального переноса тепла, называемого Конвейерной лентой (Conveyer Belt) [3].

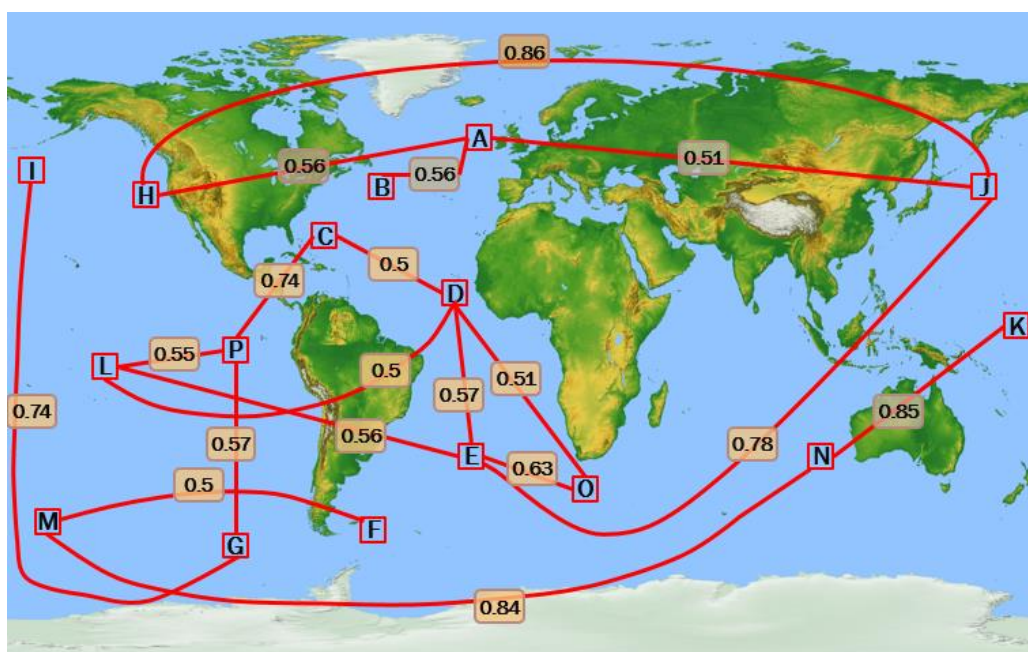


Рис. 1. Кросс-корреляции между секторами (динамически активными зонами) по среднегодовым градиентам температуры поверхности океана (1982-2000)

С целью обоснования описания влияния локальных океанических процессов, образованных струйными течениями, в качестве примера выбрана зона взаимодействия струйного течения Гольфстрим и Северо-Лабрадорского течения (Рис. 2). Структура и пространственное положение этой фронтальной зоны является спусковым механизмом для регулирования потоков тепла и влажности в атмосфере и фиксации влияния океана на погодные условия Евразии. Необходимо обратить внимание на пространственные масштабы распространения фронтальной зоны для разных сезонов, таких как лето и зима. Естественно, что пространственные масштабы переноса теплых вод из Мексиканского залива к берегам западной Европы определены суровостью зимы и состоянием ледового покрова. Однако меандрирование течения Гольфстрим может уменьшать скорость потока и размывать границы фронтальной

зоны, что будет препятствовать потоку тепла к берегам Евразии. Таким образом, необходимо отслеживать структуру градиентного температурного поля и его пространственные масштабы, чтобы определять влияние сезонных колебаний режима образования циклонов за счет испарения в районе Исландского минимума (области формирования области низкого атмосферного давления).

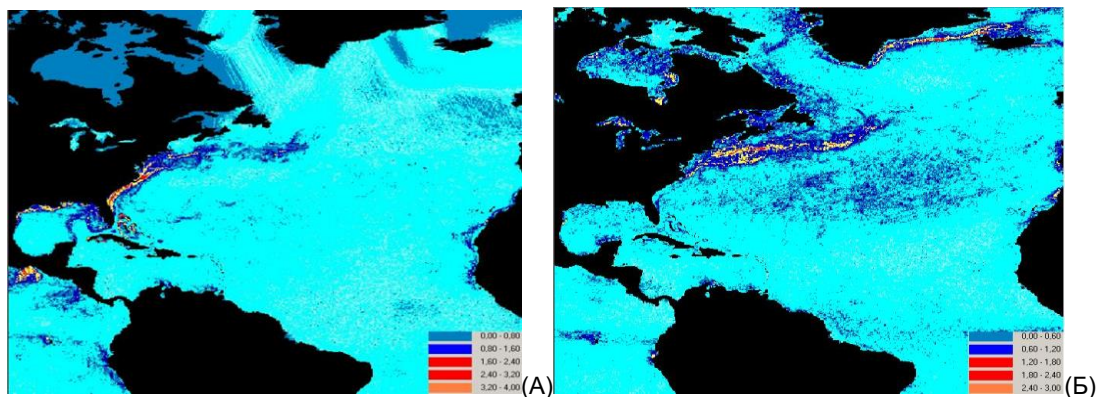


Рис. 2. Локальные среднесезонные температурные фронтальные зоны Северной Атлантики (зона Гольфстрим) (А – зима 2000; Б – лето 2000)

По метеоданным и структуре циркуляции в приземном слое атмосферы, за последние 10-15 лет отмечается нарушение устойчивого широтного (зонального) переноса и переход к меридиональной циркуляции [5]. Для примера представлены траектории меридионального смещения области низкого давления, которые принято называть «ныряющими циклонами» перемещающихся с северо-востока на юго-запад (Рис. 3). Для арктического региона такие структурные изменения потоков тепла и осадков могут значительно повлиять на понимание изменений климата и погодных условий, которые необходимо оценивать по уровню пространственно-временных масштабов динамических процессов в океане.

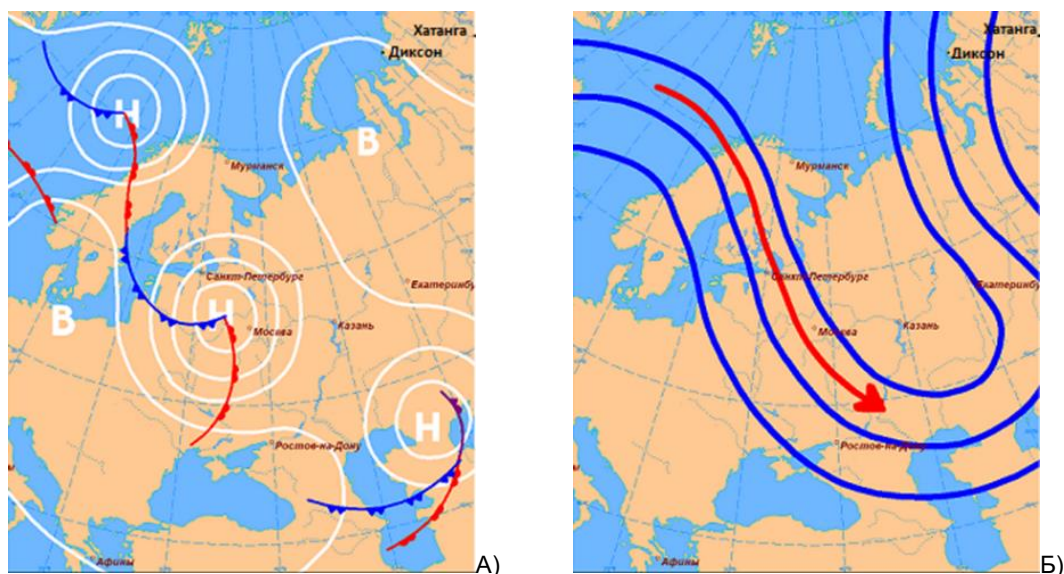


Рис. 3. Меридиональная траектория ныряющих циклонов над Евразией. Н – область низкого давления; В – область высокого давления. Красным цветом обозначен теплый фронт, синим цветом – холодный воздух

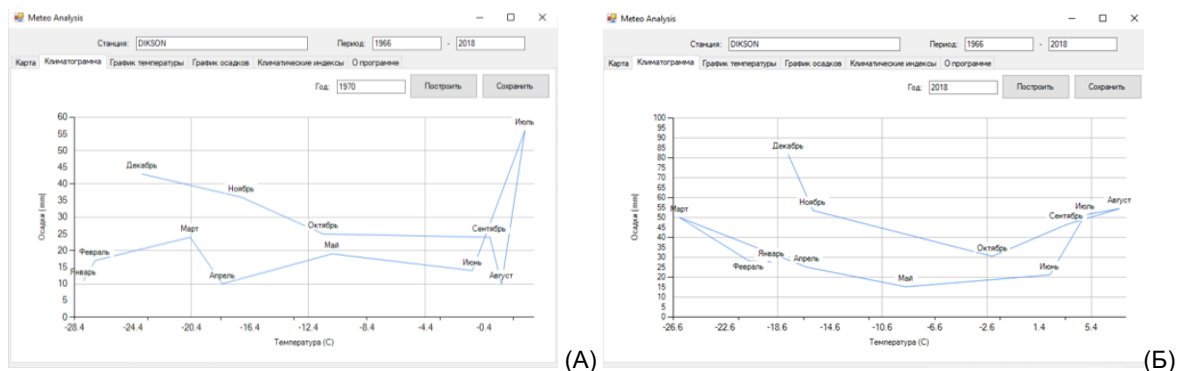


Рис. 4. Климатограммы для метеостанции Диксон – 1970 год (А) и 2018 год (Б)

Для оценки среднемесячных колебаний среднемесячных погодных условий различий представлены климатограммы для различных периодов времени метеостанции арктического региона – Диксон (Рис. 4).

Сравнение климатограмм для метеостанции Диксон дает возможность определить увеличение амплитуд колебаний количества осадков в летний и зимний периоды времени, что говорит о важности определения режима влажности и осадкообразования в арктическом регионе.

Заключение и выводы. Исходя из полученных результатов можно предположить, что характер так называемого «глобального потепления климата» лежит в фоновом внутривековом диапазоне. Основным механизмом регуляции погодных условий является взаимодействие океана и атмосферы на сезонных уровнях изменчивости. Пространственное положение климатических зон по экологическому признаку аридности и влажности необходимо оценивать по степени взаимодействия гидрологического компонента океана и обменом с атмосферой теплом и влагой. Изменения структуры и пространственные масштабы климатических зон необходимо определять с учетом устойчивости траекторий атмосферных циркуляционных структур, образованных взаимодействием океана и атмосферы.

Список литературы

1. Картушинский А.В., Кукоба Н.А. Градиентные поля поверхности Земли по спутниковым данным // Вестник СибГАУ. – 2015. № 3 (16). С. 587-596.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2018660004. Исследование изменчивости климатических условий в приземном слое атмосферы / Картушинский А.В., Сашко Л.В., Шевырногов А.П., – зарег. 15.08.2018.
3. Berardelli J. Atlantic Ocean circulation is the weakest in at least 1,600 years, study finds – here's what that means for the climate. – 2021. <https://www.cbsnews.com/news/climate-change-atlantic-ocean-gulf-stream-system-amoc-weakest-1600-years/>
4. Ogorodov N.A., Kartushinsky A.V. Information technology of satellite data processing for Global Ocean surface gradient characteristics calculation / Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes // CEUR Workshop Proceedings. 2019. – Vol. 2534 – P.434-439.
5. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Элементы общей циркуляции и распределение влагозапаса атмосферы Земли / М.: Ротапринт ИКИ РАН. – 2008. 64 с. <http://www.iki.rssi.ru/books/2008astafieva.pdf>

A. V. Kartushinsky^{1,2}

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: kartalvas@rambler.ru

² Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: kartushka@mail.ru

GLOBAL AND REGIONAL CONDITIONS OF THE OCEAN AND ATMOSPHERE CLIMATE INFLUENCE ON CHANGES IN HEAT AND MOISTURE FLOWS OVER EURASIA

The paper discusses the possibility of using the gradient method for processing satellite data to study the spatial and temporal scales of climatic and synoptic variability of the atmosphere and ocean. Modern software is used for processing and analyzing satellite and contact data. The information technology has been implemented to analyze weather and climatic conditions in Eurasia using computer processing of long-term observation series of meteorological and oceanological parameters. Based on the methods of mathematical statistics, correlations in terms of surface temperature between dynamically active zones of the World Ocean have been determined. With the dynamics of the frontal zone of the Gulf Stream as an example, the problem of the influence of the structural features of the gradient field of the ocean temperature on local changes in the weather and climatic conditions of the land is discussed.

Keywords: temperature gradients, frontal zones, atmospheric circulation, cyclone trajectories, cross-correlation.

К. В. Краснощеков¹, О. Э. Якубайлик²

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: krasko@icm.krasn.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В КРАСНОЯРСКЕ

В работе сравнивались данные по наземным концентрациям аэрозолей и малых газовых составляющих (МГС) ($PM_{2.5}$ (твердые частицы с размером менее 2,5 мкм) и NO_2 (диоксид серы)) с данными ДЗЗ, полученными над территорией Красноярска в период с июня по август 2020 года. Для определения концентрации $PM_{2.5}$ использовалась система мониторинга воздуха Красноярского научного центра. Концентрации NO_2 брались по данным краевой ведомственной информационно-аналитической системы данных о состоянии окружающей среды Красноярского края (КВИАС). Показано, что данные алгоритма MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction), имеющего пространственное разрешение в 1 км, можно использовать для определения концентрации $PM_{2.5}$ в качестве дополнения к данным полученным наземной системой мониторинга воздуха Красноярского научного центра. Получен высокий коэффициент детерминации между данными спутникового и наземного мониторинга для $PM_{2.5}$ и NO_2 . Совместная обработка данных наземных сетей мониторинга с данными дистанционного зондирования способствует улучшению оценки экологической обстановки в Красноярске.

Ключевые слова: ДЗЗ, $PM_{2.5}$, NO_2 , наземный мониторинг, Красноярск.

Введение. Вопрос оценки качества воздуха особенно остро стоит в крупных, промышленных и развивающихся городах. Низкое качество атмосферного воздуха отражается на здоровье населения и в целом на состоянии окружающей среды. РМ естественного или антропогенного происхождения оказывают существенное влияние на климат, окружающую среду и оказывают негативное влияние на здоровье человека. [1]. Существуют различные эпидемиологические исследования, связывающие повышенные концентрации РМ с увеличением количества смертей и увеличением респираторных заболеваний [2,3,4]. Следовательно, оценка качества воздуха, особенно с точки зрения PM_{10} и $PM_{2.5}$ является актуальной проблемой на данный момент.

Диоксид азота (NO_2), как и РМ, оказывает негативное влияние на организм. Основными источниками NO_2 , являются выхлопные газы автомобилей, выбросы ТЭЦ, сжигание твердых отходов, сгорание газа. При попадании в органы дыхания небольшой концентрации диоксида азота у человека наблюдаются нарушение дыхания, кашель, увеличение концентрации может привести к кислородному голоданию и другим негативным последствиям.

Район исследования. Город Красноярск является региональным центром Красноярского края с населением более 1 миллиона человек. Он активно развивается и имеет площадь около 350 км². Красноярск подвержен негативному влиянию на экологическую обстановку. Автотранспорт, частный сектор, ТЭЦ, крупные предприятия металлургической, машиностроительной и химической промышленности, всё

это вносит большое количество выбросов в атмосферу и негативно сказывается на качестве окружающего воздуха.

Спутниковые измерения. Для определения концентрации РМ, используя данные спутникового зондирования, обычно применяется параметр AOD (aerosol optical depth) [5]. AOD – интегрированное атмосферное рассеивание излучения аэрозолями в вертикальном столбе атмосферы. Этот параметр пропорционален количеству частиц в воздухе и, зависит от их массовой концентрации.

В нашей работе мы использовали данные продукта MAIAC. Он имеет пространственное разрешение 1 км. Продукт MCD19A2 (MAIAC) 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.[6].

В качестве спутниковых данных по диоксиду азота мы использовали продукт OMNO2d. Данный продукт предоставляет данные по NO₂, в вертикальном столбе атмосферы с пространственным разрешением 0,25 на 0,25 градусов. Продукт OMNO2d содержит ежедневные значения NO₂ на всю территорию Земли с 1 октября 2004 года по настоящее время [7]. **Наземные измерения.** Данные по РМ_{2.5} брались из системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра, насчитывающего 26 постов мониторинга, разработанных CityAir. Данные станции предоставляют информацию о состоянии окружающего воздуха и предоставляют данные о его температуре, давлении и влажности, а также предоставляют данные о концентрации РМ_{2.5} и РМ₁₀.

Для сопоставлений, данных по NO₂ брались наземные измерения с краевой ведомственной информационно-аналитической системы данных о состоянии окружающей среды Красноярского края (КВИАС). На территории Красноярска установлено 7 автоматизированных постов наблюдения (АПН), предоставляющих информацию о концентрациях Оксиды углерода, Диоксида серы, Диоксида азота, сероводород и многие другие загрязняющие вещества.

Оценка РМ_{2.5} по спутниковым данным. С целью оценить, насколько данные спутникового мониторинга можно использовать для оценки экологической обстановки в городе по параметру РМ_{2.5}, нами был рассчитан коэффициент корреляции между данными по РМ_{2.5}, полученными по данным наземных наблюдений и данными по параметру AOD, полученному по данным спутникового мониторинга. Так как данные по AOD доступны только при отсутствии снежного покрова, был взят период с июня по август 2019 и 2020 годов, всего 184 дня. Однако данные по AOD так же ограничены наличием облачного покрова. В результате конечное количество дней, используемое в расчётах составляло 80. Для сравнения, брались данные AOD, находящиеся над станцией наземного мониторинга, затем они усреднялись, получая среднее значение над городом. Данные наземного мониторинга брались как значение концентрации РМ_{2.5}, измеренные за 12 часов дня, далее данные между постами усреднялись, получая среднее значение РМ_{2.5} в городе.

Для сравнения данных AOD и РМ_{2.5} данные AOD приводились к единицам измерения РМ_{2.5} (мкг/м³). Мы использовали модель вида, показанного в формуле (1). В неё включены метеорологические параметры и учитываются аэрозольные характеристики. Данная формула широко используется для сопоставления данные по AOD и РМ и подробно описана в [24].

$$PM_{calc} = (AOD/PBLH)/\{K \cdot [(1-RH)/(1-RH_0)]^\gamma\} \quad (1)$$

Для получения расчётных значений по формуле (1) необходимо учитывать, кроме значений AOD такие параметры как: $PBLH$ – высота пограничного слоя атмосферы, RH – влажность воздуха, RH_0 – среднее значение влажности воздуха для выбранной территории, переменные γ и K являются аэрозольными характеристиками и получены из [8]. Результаты, полученные по формуле (2), представлены на рисунке 2.

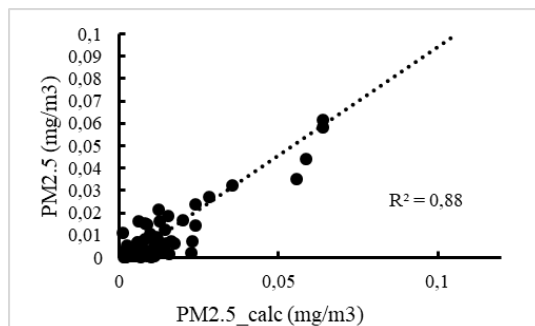


Рис. 1. Сравнение наземных данных (ось y) и расчетных значений $PM_{2.5}$, полученных по первой модели (ось x)

Приведя данные спутникового мониторинга к единицам измерения, получаемых на наземных постах мониторинга, полученные два ряда данных были сравнены и рассчитан коэффициент детерминации между ними ($R^2=0.88$). Такое высокое значение коэффициента детерминации говорит о том, что данные по PM , рассчитанные с использованием спутникового мониторинга имеют высокое соответствие данным измеренным на наземных постах мониторинга.

Оценка NO_2 по спутниковым данным. С целью оценить, насколько данные спутникового мониторинга можно использовать для оценки экологической обстановки в городе по параметру NO_2 , нами был рассчитан коэффициент корреляции между данными по NO_2 , полученными по данным наземных наблюдений и данными NO_2 , полученными по данным спутникового мониторинга. Так как данные имеют пространственное разрешение 0,25 на 0,25 градуса, территорию Красноярска покрывают два пикселя, они были усреднены между собой. Для сравнения спутниковых и наземных данных был выбран временной период с 1 июня по 31 августа 2020 года. Данные спутникового мониторинга NO_2 предоставляются в единицах измерения $moles/cm^3$ в вертикальном столбе атмосферы, данные с наземных постов мониторинга предоставляются в единицах измерения mg/m^3 . Для подсчета коэффициента корреляции между двумя рядами данных мы преобразовали ряд данных спутникового мониторинга используя формулу 2

$$NO_{2_calc} = a * NO_{2_sat} + b * R + c * T + d * P + e * PBLH \quad (2)$$

где NO_{2_sat} данные NO_2 полученные используя продукт OMNO2d, R – влажность воздуха, T – температура воздуха, P – давление воздуха, $PBLH$ – высота пограничного слоя атмосферы. Результаты, полученные используя формулу 2 показаны на рисунке 2.

Значение коэффициента детерминации на для NO_2 хуже, чем значение для $PM_{2.5}$, скорее всего это связано с более грубым пространственным разрешением спутниковых данных. Однако для задач оценки влияния городской экологической обстановки на окружающую, пригородную территорию данной точности достаточно.

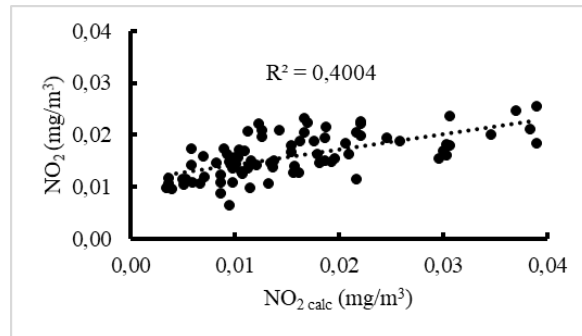


Рис. 2. Сравнение наземных данных (ось y) и значений NO₂, рассчитанных по формуле 3 (ось x)

Используя данные спутникового мониторинга, можно существенно дополнить данные полученные с наземных постов мониторинга, что позволит усилить понимание атмосферных процессов, происходящих в городе и за его пределами.

Список литературы

1. Kaufman Y. J., Tanré D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system //Nature. 2002. Vol. 419. №. 6903. P. 215-223.
2. Schwartz J., Laden F., Zanobetti A. The concentration-response relation between PM (2.5) and daily deaths //Environmental health perspectives. 2002. Vol. 110. №. 10. P. 1025-1029.9
3. Seaton A. et al. Particulate air pollution and acute health effects //The lancet. 1995. Vol. 345. №. 8943. P. 176-178.
4. Brunekreef B., Holgate S. T. Air pollution and health //The lancet. 2002. Vol. 360. №. 9341. P. 1233-1242.
5. Donaldson K, Li X Y and MacNee W. Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury //Journal of aerosol science. 1998. Vol. 29. №. 5-6. P. 553-560.
6. Donaldson K, Li X Y and MacNee W. Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury //Journal of aerosol science. 1998. Vol. 29. №. 5-6. P. 553-560.
7. Team O. M. I. N. O. A. OMNO2d file specification //2013-01-10)[2013-09-15]. http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/documents/v003/OMNO2d_FileSpec_. – Vol. 3.
8. Lin C. et al. 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 //Atmospheric Environment. 2020. Vol. 227. P. 117410

K. V. Krasnoshchekov¹, O. E. Yakubailik²

¹ FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: krasko@icm.krasn.ru

ENGINEERING EDUCATION AND STEM EDUCATION. REALITY AND PROSPECTS

The work compared data on ground concentrations of aerosols and trace gases with remote sensing data obtained over the territory of Krasnoyarsk in the period from June to August 2020. To determine the PM_{2.5} concentration, the air monitoring system of the Krasnoyarsk Scientific Center was used. NO₂ concentrations were taken from the data of the regional departmental information and analytical system of data on the state of the environment of the Krasnoyarsk Territory. It is shown that the data of the MAIAC algorithm, which has a spatial resolution of 1 km, can be used to determine the PM_{2.5} concentration as an addition to the data obtained by the ground-based air monitoring system of the Krasnoyarsk Scientific Center.

Keywords: Remote sensing, PM_{2.5}, NO₂, ground monitoring, Krasnoyarsk.

Н. В. Крук, М. А. Мерко, И. С. Мерко

Кандидат технических наук, Сибирский федеральный университет,
Красноярск, Россия

e-mail: Nkruk@sfu-kras.ru, m.merko@mail.ru, imerko@sfu-kras.ru

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В МОНИТОРИНГЕ ЗОЛОТВАЛОВ ТЭС В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СИБИРИ

Авторами предлагается ряд мероприятий, позволяющих сформировать комплексный мониторинг золоотвалов ТЭС в климатических условиях Сибири, предполагающих реализацию двух этапов. На глобальном этапе применяется технология дистанционного зондирования непосредственно с имеющихся на орбите Земли космических аппаратов, а на региональном этапе для мониторинга используется беспилотный летательный аппарат. Предлагаемый комплекс мероприятий позволит повысить эффективность мониторинга золоотвалов ТЭС в климатических условиях Сибири и своевременно принять необходимые действия по предотвращению обрушения наружного грунтового сооружения золоотвала, приводящего к вытеканию золошлаковых отходов с загрязнением прилегающей территории.

Ключевые слова: мониторинг, золоотвалы, золошлаковые отходы, дистанционное зондирование, беспилотный летательный аппарат.

В настоящее время весьма остро стоит проблема экологически безопасного складирования золы и шлака ТЭС. На ТЭС стран СНГ от сжигания твердого топлива ежегодно образовывается свыше 100 млн. тонн, а в отвалах уже накоплено свыше 1,5 млрд. тонн золошлаковых отходов. Золоотвалы ТЭС оказывают отрицательное влияние на экологию, например: загрязнение поверхностных и подземных вод при фильтрации стоков, переливы и разрушения дамб, ветровая эрозия складированных отходов, загрязнение атмосферы и почвы, разрушение природных ландшафтов, опасные криогенные процессы. В связи с этим актуальность проблемы мониторинга состояния увеличивающегося объема золоотвалов ТЭС направленного на предотвращение загрязнения окружающей среды будет постоянно возрастать [1].

Для отслеживания и оценки экологической ситуации работы золоотвалов с грунтовыми плотинами предусматриваются системы локального экологического мониторинга, включающего комплекс аналитического визуального и инструментального контроля [2, 3]. На большинстве золоотвалов и других подобных накопителях системы локального экологического мониторинга сводятся к визуальным наблюдениям, которые осуществляются путем обходов и осмотров сооружений данного типа один раз в полгода, с обязательной фиксацией полученных результатов в журнал наблюдений. Однако анализ результатов наблюдений и имеющих место загрязнений окружающей среды показывают, что такого количества визуальных наблюдений явно недостаточно, так как не позволяет своевременно выявить начальную стадию формирования общих деформаций грунтового сооружения золоотвала. Особенно это проявляется в весенний период, сопровождающийся фазовым переходом грунтового массива из мерзлого в талое состояние. Это приводит к возникновению и последую-

щему развитию всевозможных трещин на гребне, откосах и бермах, а как следствие к авариям на золоотвалах с вытеканием золошлаковых отходов на прилегающую территорию и загрязнению окружающей среды (рис. 1).



Рис. Вытекание золошлаковых отходов с загрязнением прилегающей территории

Решение данной проблемы возможно посредством применения сухого способа складирования золошлаковых отходов с образованием золоотвалов, что вследствие повышенной бюрократичности компаний управляющими ТЭС на данном периоде времени весьма затруднено. В этой ситуации на первый план выходит повышение мониторинга состояния золоотвалов за счет применения технологии дистанционного зондирования, беспилотных летательных аппаратов и современных программных средств обработки результатов наблюдений, полученных по средствам их применения. Это позволит не только увеличить количество операций контроля, но и повысить качество результатов выполняемых мероприятий, позволяющих сформировать комплексный мониторинг золоотвалов ТЭС в климатических условиях Сибири.

Предлагаемый комплексный мониторинг должен включать следующие мероприятия:

Глобальный этап. Предполагает применение технологии дистанционного зондирования непосредственно с имеющихся на орбите Земли космических аппаратов. Проводить данную операцию необходимо в соответствии с существующими нормативными актами один раз в полгода.

Используя формирователи оптических изображений, получаем снимки высокого разрешения как наружного состояния ограждающих дамб с возможностью сканирования грунтового массива вглубь по вертикали от верхнего слоя золошлаковых отложений в прудковой зоне. Это позволит определить начало развития карстовых полостей, суффозионных выносов и другие деформационные процессы, происходящие

внутри, которые не доступны при визуальном осмотре. Дополнительно получаем изображения уровня воды в прудковой зоне, изменение отметки дна отстойного пруда, мощности складываемых отходов, скорости и мощности намываемого золошлакового материала, изменение контуров сооружения в плане, поперечных и продольных сечений ограждающих дамб, грунтов тела дамб наращивания, заложение грунтовых откосов. В результате совокупность перечисленных данных создает возможность более точного построения расчетного сечения золоотвала необходимого для выполнения моделирования фильтрации промстоков и расчета устойчивости откосов ограждающей дамбы.

Данные исследования позволят выявить и в последующем оценить:

- изменения гребня дамбы, откосов, и состояние подошвы сооружения;
- неконтролируемые выходы фильтрации через тело дамбы и ее основание;
- очаги фильтрационно-суффозионных выносов грунта из сооружения и основания;
- места заболачивания территории, примыкающей к подошве сооружения в нижнем бьефе;
- развитие древесно-кустарниковой растительности на наружном грунтовом сооружении, в пределах санитарно-защитной зоны и за ней.

По результатам глобального этапа формируется программа мероприятий, реализуемых на последующем региональном этапе.

Региональный этап. Предусматриваем использование для мониторинга беспилотного летательного аппарата. Проводить данную операцию на начальном этапе накопления информации можно один раз в месяц. По результатам обработки полученной информации формируется более точная картина состояния золоотвала и прилегающей территории. Это позволит в соответствии с программой мероприятий сформированной по результатам глобального этапа более тщательно отслеживать состояние золоотвала:

- на предмет выявления всевозможных трещин на гребне, откосах и бермах;
- образование наледей на низовом откосе;
- выявление признаков морозного выветривания золошлаковых отходов;
- развитие травяного покрова и поведением землеройных животных.

Также данный этап даст возможность для мониторинга состояния окружающей среды в виде наблюдений:

- появлений замутнений воды водоемов, образовавшихся в нижнем бьефе вследствие фильтрации;
- образование размывов и подмывов сооружения и берегов со стороны нижнего бьефа.

По результатам регионального этапа выполняется уточнение программы дальнейших мероприятий. При выявлении сомнительных зон они берутся под особое внимание, т.е. количество осмотров, выполняемых с применением беспилотного летательного аппарата может быть увеличено до двух раз в месяц, а при развитии неблагоприятного сценария данные операции можно проводит еженедельно.

Предлагаемый комплексный мониторинг позволит повысить эффективность мониторинга золоотвалов ТЭС в климатических условиях Сибири и своевременно

принять необходимые действия по предотвращению обрушения ограждающих дамб золоотвала, приводящего к загрязнению прилегающей территории в следствии вытекания золошлаковых отходов.

Список литературы

1. Инженерное мерзлотоведение: учеб. пособие / Г. И. Кузнецов, Н. В. Крук. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 140 с.
2. ГОСТ Р 57793-2017 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Мониторинг и оценка технического состояния в процессе эксплуатации. Введ. 01.07.2018. – М.: Стандартинформ, 2017. – 37 с.
3. СТО 70238424.27.140.035-2009 Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. – Введ. 31.12.2009. – Москва, 2009. – 64 с.

N. V. Kruk, M. A. Merko, I. S. Merko

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: Nkruk@sfu-kras.ru, m.merko@mail.ru, imerko@sfu-kras.ru

REMOTE SENSING IN THE MONITORING ASH DUMP OF TPP IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF SIBERIA

The authors propose a number of measures to form a comprehensive monitoring of ash dumps of TPPs in the climatic conditions of Siberia, involving the implementation of two stages. At the global stage, remote sensing technology is used directly from spacecraft in Earth's orbit, and at the regional stage, an unmanned aerial vehicle is used for monitoring. The proposed integrated monitoring will increase the efficiency of monitoring ash dumps of TPPs in the climatic conditions of Siberia and take the necessary actions in a timely manner to prevent the collapse of the outer slope of the enclosing dam of the ash dump, leading to the outflow of ash and slag waste into the adjacent territory.

Keywords: monitoring, ash dumps, ash and slag waste, remote sensing, unmanned aerial vehicle.

Х. Б. Куулар

Кандидат биологических наук, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия
e-mail: k-k-188@list.ru

ОЦЕНКА ЗЕМНОГО ПОКРОВА НА КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКАХ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА ПРЕДЛОЖЕННЫМ ИНДЕКСОМ ПО ДАННЫМ LANDSAT

В данной работе представлена оценка изменений земного покрова по данным снимков Landsat с использованием предложенный (новый) спектральный индекс. Применимость этих вегетационных индексов подтверждены с помощью тестирования на исследуемых ключевых участках на территории Республики Тыва. Спектральный индекс полезен для фиксации весеннего интенсивного испарения. По летним снимкам индекс может различать лиственные, хвойные леса и гари, в том числе старые гари.

Ключевые слова: изменение климата, горные леса, предложенные (новые) спектральные индексы.

Достаточно работ посвящено отклику наземного покрова на основе космоснимков при различных климатических условиях (Shvidenko, Schepaschenko, 2013; Tong et al. 2019; и др.). Растительный покров горных территорий очень чувствителен к изменениям климата, и изучение динамики наземного покрова стала актуальной темой (Ponomarev et al., 2021 и др.). Чувствительность растительного покрова к изменению климата делает их уязвимыми (Харук и др., 2018; Куулар и др., 2021 и др.).

Хвойные леса Республики Тыва из-за изменения климата находятся в особо стрессовых условиях. Влияние изменения климата на горные леса региона проявляется ростом площади и количества лесных пожаров, что отрицательно влияют на климат региона. С другой стороны идет сдвиг границ темнохвойных лесов (Куулар, 2019).

Несмотря на большое количество вегетационных индексов по тематическому картографированию на глобальном уровне, региональные оценки земного покрова остаются недостаточно проработанными.

Цель работы – оценить предложенный индекс на ключевых участках.

Хребет Западный Танну-Ола расположен в юго-западной части региона (50°03'–52°03' с.ш., 90°02'–92°03' в.д.) между Тувинской и Убсунурской котловинами с высотой 3056 м над ур.м. Хребет Уюкский является южным отрогом Западного Саяна (51°04'–52°01' с.ш., 92°02'–92°02' в.д.) с вершиной горы 2311 м над ур.м. На исследуемых участках произрастают лиственница сибирская (*Larix sibirica Ledeb.*), кедр сибирский (*Pinus sibirica Du Tour.*), ель сибирская (*Picea obovata Ledeb.*) (Типы лесов..., 1980).

Для анализа климата привлекались данные Тувинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также сведения, имеющиеся в открытом доступе в Интернете.

Климат здесь резко континентальный, выпадение осадков неравномерное в течение года. По данным метеостанций Туран, Чадан аномалия среднегодовой температуры составила $1,1 \pm 0,9$ °C в период 1975-2019 гг. Аномалия среднегодовых осадков в тот же период составила $18,5 \pm 29,7$ (<http://meteo.ru>), что имеет существенное значение для субаридных зон.

Для составления индексных изображений отобраны безоблачные космические снимки спутников Landsat-7, 8 за 1991-2018 гг. за даты: 09.04.1996, 22.04.2018, 15.06.1991, 03.06.2016. Обработку космических снимков и их пространственный анализ при помощи геоинформационной системы NextGIS QGIS.

Апробация индекса была проведена на территории ключевых участков хребтов Западный Танну-Ола и Уюкский. Хребты обладает весьма неоднородными характеристиками рельефа, почвы, климата и растительности. Рельеф хребтов перераспределяет влагу, поэтому растительность верхней, средней и нижней частей макросклонов находится в совершенно разных условиях увлажнения.

Для выявления отклика наземного покрова на климатические изменения необходимо взаимосвязь между предложенными вегетационными индексами и климатическими параметрами. Комбинация двух индексов выполняется так, чтобы интегрировать водные характеристики и засухи в сводный вегетационный индекс. Предлагаемые спектральные индексы имеют потенциал для картирования и обнаружения изменений, вызванных изменением климата на основе индексов, связанных с влажностью и засухой. Предлагаемый индекс на основе ранее определенных индексов как *NDWI*, так и *DMCI* объединяет их информацию. Эти изменения обнаруживается новым предлагаемым индексом спектрального изменения наземного покрова *DCI* (*Difference Change Index*), который определяет степень испарения с поверхности наземного покрова. Предлагаемый индекс рассчитан на основе разницы индексов *NDWI* (*Normalized Difference Water Index* – индекс влажности растительного покрова) и *DMCI* (*Dry Matter Content Index* – индекс оценки сухости растительного покрова). Предлагаемый индекс рассчитывается по формуле:

$$DCI = NDWI - DMCI.$$

В последние десятилетия с повышением температуры воздуха идет интенсивное испарение, которое способствует быстрому таянию снега весной. Особенностью индекса заключается в том, что весной может оценить испаряемость. Результаты анализа показывают, что на территории республики из-за особенности горно-котловинного рельефа в апреле идет максимальное испарение во время интенсивного схода снега.

На рисунке 1 представлено индексное изображение *DCI* хр. Уюкский за даты 09.04.1996 и 22.04.2018. По апрельским снимкам индекс может принимать значения от -0,2 до 2. На профильном участке (красная линия вертикальная) колеблется от -0,54 до 0,94. Идет интенсивная инсоляция на участках без леса посередине хребта (старые гари). Максимальное значение индекса равно 0,94 на станции Тайга по снимку за 09.04.1996, а по снимку за 22.04.2018 — 1,66. На основе анализа обнаружили, что предлагаемый индекс также может отличить лиственные, светлохвойные и темнохвойные леса. Результаты показывают, что начало июня является лучшим временем для выделе-

ния типов леса. По летним снимкам предлагаемый индекс *DCI* может принимать значения от -0,65 до 1,95. По индексному изображению отделяются мелколиственные, хвойные леса и гари (в том числе старые). Мелколиственные леса принимают значения $0,60 \div 0,90$, светлохвойные леса — $0,54 \div 0,68$, темнохвойные леса — $0,66 \div 0,81$, степная растительность — $-0,13 \div 0,44$, сгоревшие участки — $-0,50 \div -0,24$.

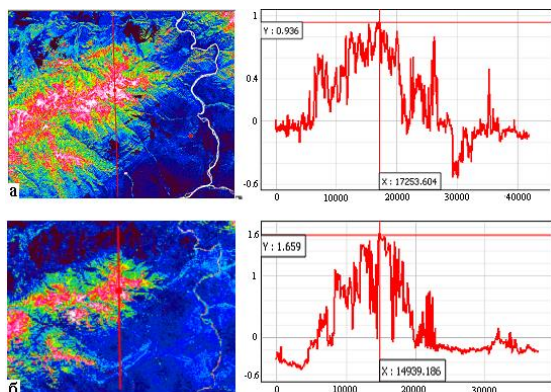


Рис. 1. Индексное изображение SEI хр. Уюкский (а – 09.04.1996, б – 22.04.2018)

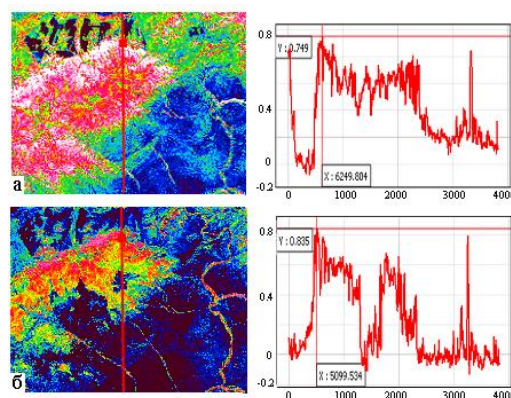


Рис. 2. Индексное изображение SEI хр. Уюкский (а – 15.06.1991, б – 03.06.2016)

Таким образом, предлагаемый индекс можно применить для регионального анализа наземного покрова. Предложенный индекс важен для получения данных интенсивной инсоляции южных бореальных лесов с потеплением климата. Также данный индекс позволяет контурное дешифрирование темнохвойных, светлохвойных и лиственных лесов по снимку в начале лета.

Список литературы

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры на станциях России. Режим доступа: [Электронный ресурс]. – <http://meteo.ru>, свободный.
2. Куулар Х.Б. Оценка воздействия потепления климата на горные леса республики с использованием снимков Landsat // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии: Доклады VII Всероссийской конференции (Москва, 22-24 апреля 2019 г.). 2019. С. 70 -71.
3. Куулар Х.Б., Чульдун А.Ф., Хертек С.Б., Намзын Ш.А. Пространственно-временное распределение весенней горимости растительного покрова Республики Тыва в 2000-2020 гг. // Природные ресурсы, среда и общество. 2021. № 2(10). С. 18-22.
4. Типы лесов гор Южной Сибири / Под ред. В.Н. Смагина, С.А. Ильинской, Д.И. Назимовой, И.Ф. Новосельцевой, Ю.С. Чередниковой. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
5. Харук В.И., Петров И.А., Двинская М.Л., Им С.Т., Шушпанов А.С. Сравнительная реакция прироста лиственницы (*Larix sibirica Ledeb.*) на изменения климата в лесостепи и высокогорьях Южной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2018. № 25 (4). С. 438-448.
6. Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T., Yakubailik O., Conard S.G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // Atmosphere. – 2021. – 12. – 559. <https://doi.org/10.3390/atmos12050559>.
7. Shvidenko, A.Z.; Schepaschenko, D.G. Climate Change and Wildfires in Russia // Contemp. Probl. Ecol. 2013. № 6. P. 50–61.
8. Tong R.Z., Song H., Sun W.C., Xu Z.X., Yao, X.L, Yu J.S Analyzing the impact of climate change on natural vegetation greenness using improved statistical vegetation index simulation model // Applied ecology and environmental research 17(2): 4677-4691. Doi: http://dx.doi.org/10.15666/aecr/1702_46774691

Kh. B. Kuular

FSBIS Tuvinian Institute for Exploration Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia
e-mail: k-k-188@list.ru

ASSESSING OF LAND COVER IN KEY AREAS IN THE TYVA REPUBLIC USING LANDSAT DATA

This paper presents an assessment of changes in the Earth's cover according to Landsat images using the proposed (new) spectral index. The applicability of these vegetation indices was confirmed by testing on the studied key sites on the territory in the Tyva Republic. The spectral index is useful for fixing the spring intensive evaporation. Based on summer images, the index can distinguish between deciduous, coniferous forests and burning, including old burning.

Key words: climate change, mountain forest, offered spectral indices.

С. Я. Кудряшова¹, А. С. Чумбаев¹, Е. А. Мамаш², И. А. Пестунов²

¹ Кандидат биологических наук, ИПА СО РАН, Россия

² Кандидат физико-математических наук, ФИЦ ИВТ, Новосибирск, Россия

e-mail: sya55@mail.ru, chumbaev@issa-siberia.ru, elenamamash@gmail.com,

pestunov@ict.sbras.ru

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА ПОЧВ ПЛОСКОГОРЬЯ УКОК (ЮГО-ВОСТОЧНЫЙ АЛТАЙ, РОССИЯ)

На основе совместного анализа количественных показателей температурного режима воздуха и почв, полученных с использованием наземных автоматизированных измерительных комплексов и данных спутника Landsat 8, построена картографическая модель температурного поля почвенного покрова плоскогорья Укок Юго-Восточного Алтая. Согласно данным регрессионного анализа средних значений (Land Surface Temperature) LST и NDVI за бесснежный период значение LST на 85% определяется наличием и типом растительного покрова. Выявлено, что влияние рельефа на разность значений спутниковых и наземных данных может достигать 20°C в бесснежный период. В целом, коэффициент корреляции спутниковых и наземных данных превышает значение 0.85, что позволяет сделать вывод о принципиальной применимости спутниковых данных для оценки термических ресурсов почв труднодоступных территорий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, температура подстилающей поверхности, совместный анализ спутниковых и наземных данных, температурные поля почв.

Введение. С внедрением дистанционных и автоматизированных методов в практику почвенно-экологических исследований развивается новое и перспективное направление использование показателей температурного режима в решении задач по созданию методологических основ выделения и типологии температурных полей почвенного покрова [1-7]. Для целей тематического картографирования используются свойства почв, которые тесно коррелируют с экологическими характеристиками окружающей среды и обусловлены действием факторов почвообразования. Температурный режим является одним из наиболее значимых экологических факторов, который совместно с гидрологическим режимом характеризует общий энергетический уровень формирования и функционирования почвенного покрова. Температурное поле почв представляет совокупность значений температуры в точках пространственной области, которое рассматривается в качестве ведущего фактора структурно-функциональной организации почвенного покрова.

Цель исследования – выявление возможности совместного анализа количественных характеристик температурного режима почв, полученных в результате наземного автоматизированного мониторинга и обработки спутниковых данных Landsat 8 для разработки методологических основ выделения и типологии температурных полей почвенного покрова.

Объекты и методы исследования. Выбор объекта исследования обусловлен особенностями орографических и биоклиматических факторов плоскогорья Укок,

определяющих формирование почвенного покрова с контрастным сочетанием тундрово-степных комплексов. Ключевые участки были выбраны с учетом принципов ландшафтного районирования, на разных гипсометрических уровнях с учетом основных факторов рельефообразования, определяющих природные и антропогенные факторы дифференциации почвенного и растительного покрова.

Из климатических параметров на формирование температурных полей структурных единиц почвенного покрова значительное влияние оказывают температура воздуха в теплый период и высота снежного покрова в холодный период года. Для выявления локальных различий температурных полей были выбраны ключевые участки (Т.1, Т.2 и Т.3) близко расположенных, но имеющих самостоятельное экологическое значение горностепных, горных лугово-степных и горно-тундровых почв.

Наземные и спутниковые данные температурных полей почв тундрового моренного слабобрасчлененного плато (Т.4) и тундровой нагорной равнины (Т.5) были использованы для оценки влияния рельефа на разность значений спутниковых и наземных данных.

Организация наземного автоматизированного мониторинга температурного режима почв. Количественные характеристики температурного режима были получены в результате анализа временных рядов температурного мониторинга, полученных с использованием наземных автоматизированных комплексов и спутниковых данных. Наземный автоматизированный мониторинг был организован с использованием специализированного регистратора температуры DS-1921 «Thermochron» с учетом показателей, отражающих генетическое единство типов климата высокогорий Алтае-Саянского региона. Для изучения температурного режима автономные регистраторы температуры были установлены на поверхности почвы и по горизонтам почвенного профиля. Для фиксации температуры воздуха был установлен автономный регистратор на высоте 2 м от поверхности почвы в условиях, исключающих солнечную радиацию. В результате проведенных наблюдений был получен большой объем фактических данных, который использовался в качестве базовой основы для расчета количественных характеристик температурного режима воздуха и почв тундрово-степных комплексов [8].

Обсуждение результатов совместного анализа наземных и спутниковых данных температурного мониторинга почв. Опыт совместного использования наземных и спутниковых измерений для исследования показателей температурного режима труднодоступных территорий, можно найти, например, в работах [9, 10]. В статье [9] изучена применимость датчиков типа «Thermochron» и данных MODIS/Terra LST для исследования поверхности Арктики (Гренландия), где делается вывод о сильной зависимости величины корреляции наземных и спутниковых измерений от сезонных климатических условий и облачности. Выборка из данных MODIS LST содержала 654 измерения. Учитывая объем выборки, можно предположить, что использовались автоматизированные приемы работы с архивом ДДЗ.

В работе [10] при исследовании температурного поля Тункинской котловины был также применен метод совместного использования датчиков термохрон, установленных на уровне 2 м от земной поверхности и данных спутников Landsat 5 и Landsat 7. Показано, что разность значений наземных и спутниковых измерений мо-

жет составлять от 0 до 12°C и зависит от типа ландшафта и сезона съемки. В статье указывается, что температура поверхности, восстановленная по данным LST Landsat 5 и Landsat 8, вычислялась «без учета излучательной способности ландшафтов» [10] с использованием стандартных пакетов (пакет ENVI), в режиме выгрузки данных на стационарный компьютер.

В настоящей работе предпринята попытка оценить возможность применения данных Landsat 8 для изучения температурного режима высокогорий Алтае-Саянского региона с использованием системы Google Earth Enging (GEE). 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>). В коллекции GEE эти данные представлены в пересчете на разрешение в 30 м, что удобно для изучения объектов со сложным рельефом.

Ранее валидация спутниковых данных Landsat 8 для городских территорий проводилась авторами на основе данных шести метеостанций, расположенных в черте г. Новосибирска [11]. Было показано, что корреляция наземных данных и данных космического мониторинга составляет более 90% во всех исследуемых случаях. Для определения LST по данным Landsat 8 использовался наиболее распространенный метод, описание которого можно найти в работах [12, 13]. Оценка коэффициента эмиссии выполнялась на основе вегетационного индекса NDVI [14]. Кроме того, при извлечении данных накладывались маски, исключаяющие облачность и тень от облаков.

В нашей работе проведен сравнительный анализ результатов наземных измерений в спутниковых данных в 16 точках, расположенных на территории плоскогорья Укок, в период 2013-2015 гг. На рисунке 1 приведено распределение средних температур за бесснежный период (май-октябрь 2013-2015 гг.) на территории плоскогорья, а также обозначены точки отбора проб. Некоторые из них расположены достаточно близко, поэтому на карте приведенного масштаба мы можем видеть число точек меньше 16. Ранее, в работе [8], были построены картографические модели температурных полей тундрово-степных комплексов плоскогорья Укок, созданные на основе анализа спутниковых данных MODIS LST. Применение данных более высокого разрешения Landsat 8 позволило увеличить объем спутниковой информации, удалось получить более четкую картину температурного поля исследуемой территории, а соответствующая гистограмма, имеет вид нормального распределения (рис. 1).

Для количественной оценки влияния подстилающей поверхности на ее температуру для слоев LST и NDVI в границах плоскогорья Укок был проведен регрессионный анализ, который показал, что значение LST на 85% определяется наличием и типом растительного покрова (коэффициент детерминации $R^2 = 0.85$), что в целом соответствует закономерностям в распределении температурного поля для природных экосистем.

На основе алгоритма восстановления температуры, реализованного в GEE для точки с заданными координатами для всех 16 точек, построены графики сравнения наземных и спутниковых данных за соответствующий временной период. Можно выделить три типа графиков в зависимости от степени близости их значений в соот-

ветствующих точках. На рисунке 2 (а) приведен пример точки (Т.1), для которой совпадение наземных и спутниковых данных является максимальным, коэффициент корреляции равен 0.99. Близость графиков в снежный период позволяет сделать предположение об отсутствии значимого снежного покрова на данном ключевом участке. На рис. 2 (б) приведены графики температуры для точек 2 и 3 (Т.1 и Т.2), особенность этих точек заключается в том, что они близко расположены и их координаты совпадают.

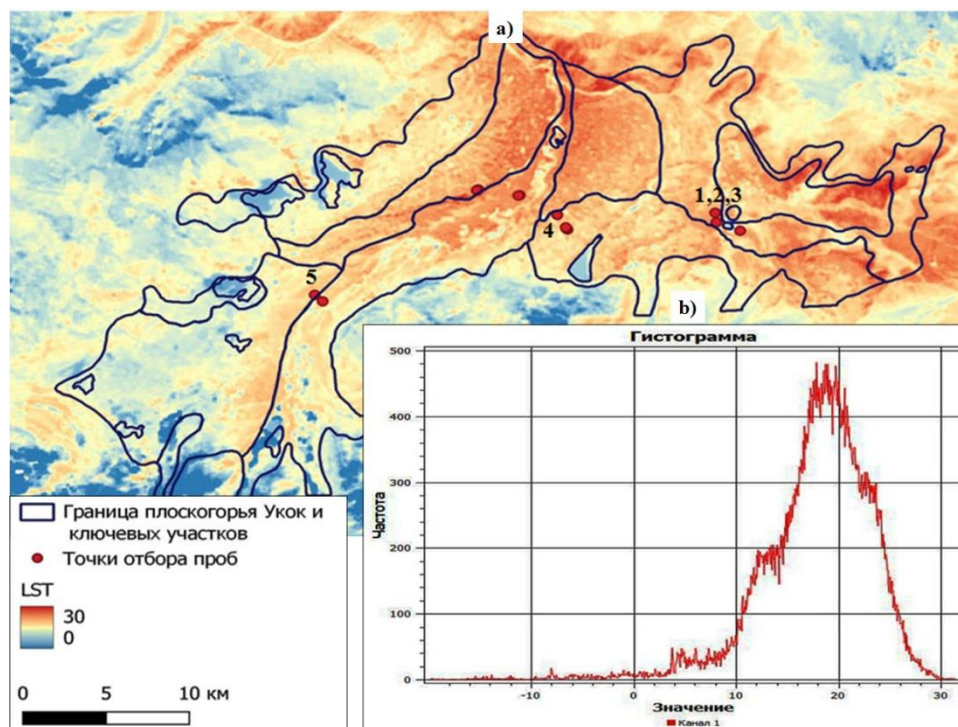


Рис. 1. Картографическая модель температурных полей структурных единиц почвенного покрова плоскогорья Укок, построенная по данным Landsat 8 за май-октябрь 2013-2015 г. (а) и гистограмма средних значений в пределах приведенных границ (б).

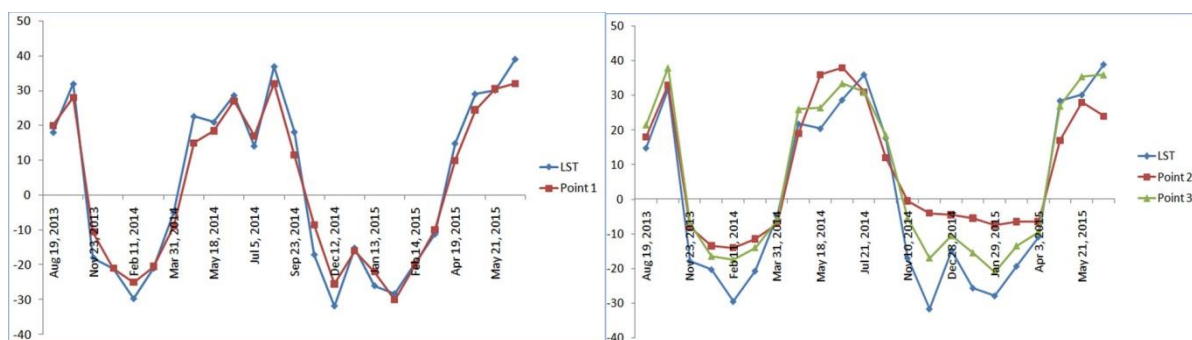


Рис. 2. Динамика температуры за период 2013-2015 гг.: (а) на поверхности горностепной почвы (Т.1), (б) на поверхности горной лугово-степной (Т.2) и горно-тундровой почв (Т.3) на основе наземных и спутниковых данных

Однако, как мы видим по представленным графикам, их значения сильно различаются, в представленной выборке максимальная разность достигает 13.5°C. Это объясняется тем, что, несмотря на близость их расположения, измерения проводились на различных типах подстилающей поверхности. Что касается данных LST, спутник усредня-

ет значения в пределах пикселя, поэтому на участках со смешанным типом подстилающей поверхности данные температуры, восстановленные на основе ДДЗ, могут сильно отличаться от непосредственно измеренных в точке. Также следует отметить, что в большинстве случаев в зимний период из-за наличия внушительного снежного покрова данные LST, во-первых, сильно отличаются от данных наземных датчиков, во-вторых, во всех исследуемых случаях значения LST ниже измеренных наземными датчиками, так как снег обладает хорошими теплоизоляционными свойствами. Поэтому в зимнее время для оценки приземной температуры спутниковые данные могут быть использованы только в районах, где снежный покров практически отсутствует.

Если к разнообразию типов подстилающей поверхности добавляется еще и сложность рельефа (Т.5), то разность значений спутниковых и наземных данных может достигать 20°C в бесснежный период (рис. 3.).

Таким образом, при исследовании температурных полей почв труднодоступных территорий с использованием ДДЗ необходимо учитывать влияние рельефа, наличие и тип растительного покрова в теплый период, вероятность и мощность снежного покрова в холодный период. В целом, коэффициент корреляции спутниковых и наземных данных превышает значение 0.85, что позволяет сделать вывод о принципиальной применимости спутниковых данных для оценки температурного режима почв и возможности их использования для исследования динамики температуры как на больших территориях, так и в отдельно выбранных точках.

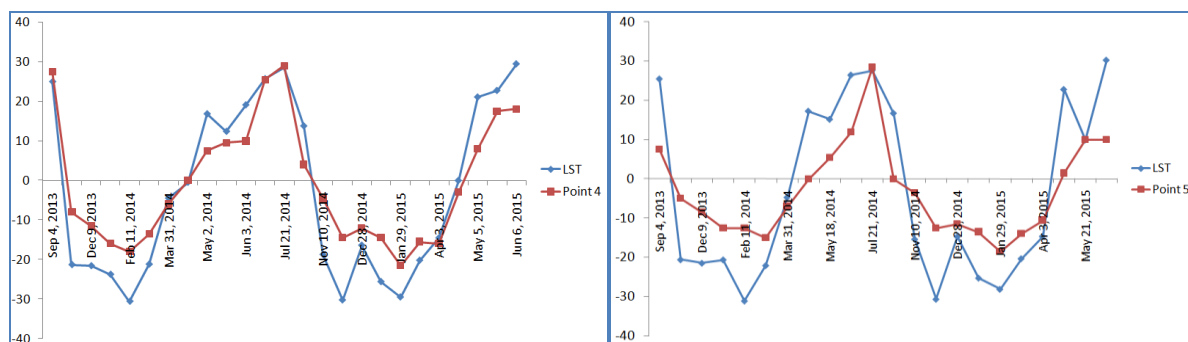


Рис. 3. Динамика температуры за период 2013-2015 гг. (а) на поверхности горной темноцветной (Т.4) и (б) горно-тундровой почв (Т.5) на основе наземных и спутниковых данных

Список литературы

1. Carre F., McBratney A.B., Montanarella L. Digital soil assessments: beyond DSM // *Geoderma*. 2007. Vol. 142 (1/2). P. 69-79.
2. Paradian J., Morris J., Minasny B., McBratney A.B. Pedotransfer Function and Soil Inference System // *Pedometrics*. 2018. P. 195-220.
3. Hartemink A.E., Krasilnikov P., Bockheim J.G. Soil maps of the world // *Geoderma*. 2013. Vol. 207. P. 256-267.
4. Van De Kerchove R., Lhermitte S., Veraverbeke S., Goossens R. Spatio-temporal variability in remotely sensed land surface temperature and its relationship with physiographic variables in the Russian Altay Mountains // *International Journal of Applied Earth Observation*. 2013. Vol. 20. P. 4-19.
5. Minasny B., McBratney A.B. Digital Soil Mapping: A brief history and some lessons // *Geoderma*. 2015. Vol. 264. Pt. B. P. 301-311.
6. Arrouays D., Lagacherie P., Hartemink A. Digital soil mapping across the globe // *Geoderma Regional*. 2017. Vol. 9. P. 1-4.

7. Arrouays D., McBratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A., Morgan L., Roudier P., Poggio L., Mulder V. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better // *Geoderma Regional*. 2020. Vol. 20. P. 1-7.
8. Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S., Pestunov I.A., Sinyavskiy Y.N., Chubarov D.L., Bezborodova A.N. and Ermakov N.B. Cartographic Modeling of Soil Temperature Fields for Middle Siberia Transect Based on Conjoint Analysis of Automated Ground-based and Satellite Temperature Data // *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2534. P. 124-131.
9. Koenig L.S., Hall D.K. Comparison of satellite, thermochron and air temperatures at Summit, Greenland, during the winter of 2008/09 // *Journal of Glaciology*. 2010. Vol. 56. No. 198. P. 735-741.
10. Istomina E.A., Vasilenko O.V. Analysis of the temperature field of the landscapes of the Tunkinskaya depression using Landsat satellite and terrestrial data // *Geography and natural resources*. 2015. No. 4. P. 162-170. (in Russia).
11. Mamash E.A., Pestunov I.A., Chubarov D.L. Spatiotemporal analysis of the land surface temperature distribution over the territory of Novosibirsk city based on Landsat data // *E3S Web of Conferences*. Ser. "Regional Problems of Earth Remote Sensing, RPEERS 2020". 2020.
12. Jimenez-Munoz J.C., Sobrino, J.A., Skokovic D., Mattar C., Cristobal J., Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2014. V.11. P. 1840-1843.
13. Parastatidis, D., Mitraka, Z.; Chrysoulakis, N.; Abrams, M. Online global land surface temperature estimation from Landsat // *Remote Sens*. 2017. V. 9. P. 1208.
14. Sekertekin A., Bonafoni S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation // *Remote Sens*. 2020. V. 12 (2). P. 294.

S. Ya. Kudryashova¹, A. S. Chumbaev¹, E. A Mamash², I. A. Pestunov²

¹ PhD in Biology, SSA SB RAS, Russia

² PhD in Physics and Mathematics, FRCICT, Novosibirsk, Russia

e-mail: nya55@mail.ru, chumbaev@issa-siberia.ru, elenamamash@gmail.com,
pestunov@ict.sbras.ru

Based on the conjoint analysis of quantitative indicators of the air and soils temperature regime, obtained using terrestrial automated measuring systems and Landsat 8 data, a cartographic model of the soil cover temperature field of the Ukok plateau (Southeastern Altai) is built. According to the regression analysis of the average LST and NDVI values for the snowless period, the LST value is 85% determined by the presence and type of vegetation cover (determination coefficient $R^2 = 0.85$). It was found that the relief influence on the difference between the values of satellite and terrestrial data can reach 20°C during the snowless period. In general, the correlation coefficient of satellite and terrestrial data can exceed 0.85, which allows us to conclude that satellite data are fundamentally applicable for assessing the thermal resources of soils and hard-to-reach territories.

Keywords: remote sensing, land surface temperature, conjoint analysis of satellite and terrestrial data, soil temperature fields, cartographic modeling

**В. Ф. Попов¹, Я. Б. Легостаева²,
А. Г. Гололобова³, И. В. Козлова⁴, Д. С. Ноев¹**

¹ Геологоразведочный факультет, Северо-Восточный федеральный университет
им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

² Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия,

³ Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера
им. проф. Д. Д. Саввинова, Северо-Восточный федеральный университет
им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

e-mail: ylego@mail.ru, nuta0687@mail.ru, ingrid_k@mail.ru, pvf_grf@rambler.ru

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ТЕРРИТОРИИ ДАЛДЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Представлены результаты комплексной оценки экологического состояния нарушенных земель в результате открытой разработки территории Далдынского кимберлитового поля в северо-западной Якутии. Исследования проведены с использованием результатов дистанционного мониторинга. Объектами дистанционного исследования являются ландшафты, поверхностные воды, почвы, растительность. В ходе проведенных работ установлено, что методы дистанционного зондирования позволяют достаточно определенно отслеживать разномасштабные аварийные ситуации, в том числе попадание высокоминерализованных вод в поверхностные водотоки.

Ключевые слова: кимберлитовое поле, дистанционное зондирование, микроэлементы, космические снимки.

История добычи алмазов в Сибири совпала с началом освоения человеком Космоса. Первый спутник Земли в СССР был запущен в 1957 году, в этот же год началась добыча алмазов с кимберлитовой трубки «Мир» в среднем течении реки Ирелях, а освоение Далдынского кимберлитового поля в 1958 году. Рядом с месторождениями появились крупные для районов Крайнего Севера города Мирный и Удачный, они соединены автомобильной дорогой протяженностью 524 км, построена современная городская инфраструктура, функционируют аэропорты.

Промышленная открытая разработка коренного кимберлитового тела месторождения «Удачного» началась в 1971 году и завершилась в 2014 году на глубине 640 м, и в этот же год заработал подземный рудник, запасы для которого разведаны почти на полуторокилометровую глубину. С 1979 года действует Удачинский горнообогатительный комбинат (ГОК). Также на Далдынском кимберлитовом поле открытым способом разрабатывается месторождение алмазов кимберлитовой трубки «Зарница».

Методы дистанционного зондирования для различных целей в бассейне реки Далдын проводятся с 1951 года, когда была проведена первая аэрофотосъемка, а с 1969 года стали появляться фотографии с космических аппаратов. Их дешифрирование широко использовалось и используется для геологической разведки, физико-

географического районирования, дистанционного экологического мониторинга [1], оценки экологического состояния горнопромышленных ландшафтов в пространственно-временном разрезе [2, 3, 4]. Прежде всего, следует отметить, что на космоснимках по прямым дешифровочным признакам хорошо фиксируются линейные и площадные объекты техногенной деятельности: дороги, просеки, профили проведения геофизических съемок, площадки бурения скважин, карьеры, отвалы, хвостохранилища, водохранилища, промышленные объекты, инфраструктура населенных пунктов и т.д. [5, 6].

Объектами дистанционного мониторинга и исследования традиционно являются ландшафты, поверхностные воды, почвы, растительность в качестве основных индикаторов благополучия природной среды. Однако строение рудного тела в виде вертикальной трубки застывшей кимберлитовой магмы, прорвавшейся сквозь земную кору через километровые толщи осадочных отложений, обуславливает специфику добычи алмазов и характер техногенеза: глубокие карьеры, отвалы, обширные хвостохранилища. С 1985 года в карьер Удачный начали поступать высокоминерализованные агрессивные и экологически опасные подземные воды с минерализацией от 350 до 410 г/л. На сегодня в пределах промышленной площадки Удачинского ГОКа сформировано три полигона захоронения дренажных вод в многолетнемерзлые породы: «Октябрьский», «Киенгский», «Левобережный».

Сопряжения горно-геологических и физико-географических условий с различными аспектами освоения алмазных ресурсов обуславливают геохимические риски [7]. Для Далдынского кимберлитового поля геоэкологическая обстановка определяется повышенными концентрациями Cr, Ni, Co, Ti, Cu, Y, Nb, Li, Be, Sr в микроэлементном составе почв, донных отложений и поверхностных вод, среди них Sr и Li являются маркерами высокоминерализованных подземных вод. Из них наибольшую обеспокоенность вызывает риск попадания высокоминерализованных вод в поверхностные водотоки, прежде всего, реку Далдын, которая является притоком Мархи и далее соответственно рек Виллой и Лена.

В настоящее время выявлен один случай попадания высокоминерализованных дренажных вод в реку Далдын, связанный с повышением уровня закачиваемых вод выше местного базиса эрозии на полигоне Киенг, вследствие чего в 2012 году произошла их разгрузка, а после разрушения бульдозером выхода подземных вод на поверхность на данном участке образовались мочажины. На космоснимке территории исследования отчетливо дешифрируется склоновый делювиально-солифлюкционный тип местности с листовничным кустарничково-лишайниково-моховым ерниковым редколесьем. В районе концентрации рассолов фиксируется гибель растительного покрова. 3D модель местности (google.earth) [5] отображает данный участок наблюдения (рис. 1, а), что подтверждается также натурными исследованиями [8, 9] (рис. 1, б).

Также в 2021 году остро обсуждался случай, связанный с повреждением трубопровода под действием ураганного ветра 10 апреля в районе его перехода через реку Далдын, по которой дренажные воды переправлялись на полигон Левобережный. Однако по заявлению представителей компании АЛРОСА в этот момент работал резервный трубопровод и загрязнения реки не произошло. И действительно, в случае попадания дренажных вод на поверхность льда реки Далдын возможны несколько

вариантов развития событий. В первом, более вероятном случае, рассол в температурных условиях апреля растапливает лед и образует промоину или хотя бы каверны на поверхности льда. Если воды текут по льду, то они должны протаивать снег, лежащий на поверхности льда, а замерзая, воды образуют наледь. Такое возможно в случае, если воды, изливающиеся на лед, пресные. Этот случай также хорошо идентифицируется на космоснимках [6]. А космические снимки высокого разрешения дают в 3D модели практически реальное изображение объекта (рис.2) [5].

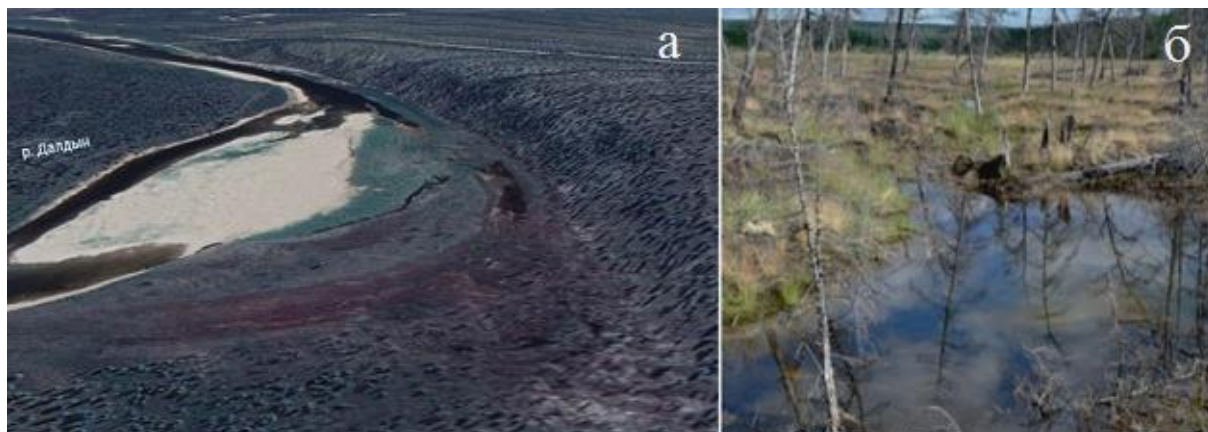


Рис. 1. Космоснимок (а) и фотография (б) участка разгрузки подземных вод



Рис. 2. Трубопровод через р. Далдын

Исследование экологической обстановки территории Далдынского кимберлитового поля, включая фиксацию сброса рассолов в реку Далдын, на основе дистанционного зондирования позволяет достаточно определенно отслеживать возможные попадания высокоминерализованных вод в поверхностные водотоки.

Список литературы

1. Серокуров Ю.Н., Люхин А.М., Калмыков И.В. Дистанционный экологический мониторинг района Удачинского ГОКа (Якутия) // Записки Горного института. 2001. Том 149. С.174-176.
2. Зеньков И.В., Жукова В.В., Лукьянова А.А. и др. Карьеры по добыче алмазов в России из космоса. Горные работы и экология нарушенных земель. Красноярск. Изд-во СФУ, 2019. 232 с.

3. Зеньков И.В., Кондрашов П.М., Морин А.С., Вокин В.Н., Кирюшина Е.В., Миронова Ж.В., Федоров А.Б., Веретенова Т.А. // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 1. С. 34–39.

4. Зеньков И.В., Морин А.С., Вокин В.Н., Кирюшина Е.В., Миронова Ж.В., Кондрашов П.М., Федоров А.Б., Веретенова Т.А. Результаты дистанционного мониторинга экологии горно-промышленных ландшафтов на территории Удачинского и Мирнинского горно-обогатительных комбинатов // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 1. С. 40–45.

5. <https://www.google.com/earth/>. [Электронный ресурс] (дата обращения 3.6.2021).

6. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [Электронный ресурс] (дата обращения 3.6.2021).

7. Legostaeva Ya., Gololobova A., Popov V. Geochemical Risks of Diamond Mining in Siberia // Environmental sciences proceedings. 2021. Volume 5. Issue 1, 4. <https://doi.org/10.3390/IECG2020-08907>

8. Легостаева Я.Б., Попов В.Ф., Ксенофонтова М.И. Гидрогеологические условия и геоэкологическая ситуация на территории подземных техногенных хранилищ при утилизации дренажных рассолов Удачинского горно-обогатительного комбината // Отечественная геология. 2018. №3. С.93-101.

9. Легостаева Я.Б., Ксенофонтова М.И., Попов В.Ф. Геоэкологический мониторинг на территории подземных полигонов утилизации высокоминерализованных вод в Западной Якутии // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 4. С. 58–63.

V. F. Popov¹, Ya. B. Legostaeva²,
A. G. Gololobova³, I. V. Kozlova⁴, D. S. Noev¹

^{1 4} Geological Prospecting Faculty, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

² Diamond and Precious Metal Geology Institute, Yakutsk, Russia

³ D. D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

⁴ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

e-mail: ylego@mail.ru, nuta0687@mail.ru, ingrid_k@mail.ru, pvf_grf@rambler.ru

STUDY OF THE DALDIN KIMBERLITE FIELD TERRITORY GEOECOLOGICAL SITUATION ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

The results of a comprehensive assessment of the ecological state of disturbed lands as a result of opencast mining of the territory of the Daldyn kimberlite field in northwestern Yakutia are presented. The research was carried out using the results of remote monitoring. The objects of remote sensing are landscapes, surface waters, soils, vegetation. In the course of the work carried out, it was established that the methods of remote sensing make it possible to quite definitely track the possible ingress of highly mineralized waters into surface watercourses.

Keywords: kimberlite field, remote sensing, trace elements, space images.

**А. В. Мальканова¹, В. Б. Кашкин¹, Т. В. Рублева¹,
К. В. Симонов², А. А. Кабанов¹**

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: tvrubleva@mail.ru, simonovkv@icm.krasn.ru

УТОЧНЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ ПО ДАННЫМ КС GRACE, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОЦЕССАМИ В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В рамках исследования геодинамики сильнейших подводных землетрясений изучены особенности распределения параметра EWN в этих районах на основе измерений КС GRACE. Разработана вычислительная методика, которая позволяет уточнять размеры гравитационных аномалий, обусловленных процессами в очаговых зонах сильнейших подводных землетрясений с $M > 8$. Суть методики – построение и сравнительный анализ цифровых карт распределения параметра EWN в условиях возмущенной геосреды и в фоновых сейсмических условиях.

Ключевые слова: космическая система GRACE, спутниковые данные, эквивалентная высота воды, гравитационное поле, гравитационные аномалии, сильные землетрясения.

Введение. В последние годы в районах повышенной сейсмичности для анализа геодинамической активности и гравитационных изменений активно используются спутниковые данные. Для изучения пространственно-временных вариаций гравитационного поля Земли с периодом 30 суток задействованы космические системы (КС) GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, NASA (США) – DLR (Германия)) и GRACE-FO (GRACE-follow on, в той же спутниковой конфигурации) [1]. Погрешность измерений на GRACE не превышает 10 мкм, а на GRACE-FO – не более 1 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$).

Целью настоящего исследования является уточнение параметров гравитационных аномалий, возникших в очаговых областях сильных землетрясений с магнитудой $M > 8$, которые произошли в зоне субдукции Тихого океана, по спутниковым данным GRACE. Для примера рассмотрим очаговую область Японского землетрясения 2011 г.

1. Сводная обработка комплекса данных наблюдений. В работе, на основе каталога USGS [2], изучены геодинамические особенности сейсмоактивных районов сильных подводных землетрясений с $M > 8$. В частности, рассмотрены основные характеристики очаговых зон: катастрофического Японского землетрясения 11.03.2011 г. ($M_w = 9.1$), Охотского землетрясения 24.05.2013 г. ($M_w = 8.3$) и трех сильнейших Чилийских землетрясений: 28.02.2010 г. ($M_w = 8.8$), 01.04.2014 г. ($M_w = 8.2$) и 16.09.2015 г. ($M_w = 8.3$).

Отметим, что ранее в исследуемых регионах проводился мониторинг гравитационных аномалий, образовавшихся после основных сейсмических событий с использованием данных GRACE [3-5]. Анализ пространственной структуры наблюдае-

мых аномалий подтвердил теоретические предположения о перераспределении внутренней массы твердой Земли во время сейсмической активности.

На этапе сводной обработки спутниковых данных использовалось программное обеспечение (ПО) Surfer 13 [6]. В полученных из [1] данных имеются пропущенные значения, которые необходимо интерполировать. Оптимальным методом интерполяции считается метод Kriging (Кригинг) [7]. Данный геостатистический метод основывается на статистических моделях и анализе автокорреляции. Он отличается быстродействием и корректным приближением интерполированных в узлы значений параметра к его исходным величинам. В результате применения метода Kriging создаются поверхности прогнозируемых пространственных переменных и проводится оценка их достоверности.

2. Картирование очаговой области землетрясения по данным распределения параметра EWH. В качестве примера результата совместной обработки данных наблюдений приведем картирование очаговой области Японского землетрясения 2011 г. по данным EWH (Equivalent Water Height [8]) – эквивалентной высоты воды над контуром геоида (в см), измеренными КС GRACE. Его значения над сейсмоактивным районом, где произошло Японское землетрясение с $M_w = 9.1$, получены с [1].

Для картирования и дальнейшего исследования были выбраны границы изучаемого района, которые составили по широте $25^\circ - 55^\circ$ N и по долготе $120^\circ - 170^\circ$ E. Размеры пиковой области исследуемого землетрясения, определенные по шкале интенсивности MMI, составили 300×100 км [2]. На основе разработанной методики данные параметра EWH были визуализированы.

На рис. 1 показана цифровая карта расположения значений эквивалентной высоты воды над контуром геоида в возмущенной геосреде Тихого океана, включая побережье Японии. Анализ пространственного распределения EWH показал, что пиковая область рассматриваемого землетрясения с $M_w = 9.1$ расположена на северной границе положительной аномалии, которая ориентирована в меридиональном направлении (юг–север). Местоположение его гипоцентра находится в зоне сгущения изолиний положительной аномальной области.

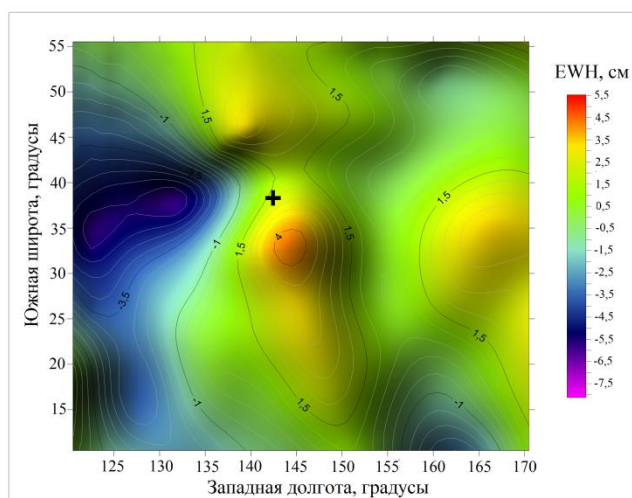


Рис. 1. Пространственное распределение EWH для возмущенных геодинамических условий относительно пиковой области Японского землетрясения, «крестиком» отмечен гипоцентр землетрясения

3. Уточнение области гравитационных аномалий методом RST. Для уточнения геометрии гравитационных аномалий на основе данных о распределении параметра EWH над сейсмоактивными районами использовался метод RST (Robust Satellite Technique) [9]. Ранее в [10] данный метод использовался нами для построения изображения тепловых аномалий по спутниковым данным.

В данном исследовании в рамках разработанной методики предлагается применять введенный индекс аномальности δEWH для уточнения области, характеризующей гравитационную аномалию. Далее, для изучаемых очаговых зон с помощью разработанной методики были построены цифровые карты аномалий по индексу δEWH .

На рис. 2 приведен пример образовавшейся аномалии, наблюдаемой относительно очаговой области Японского землетрясения 2011 г. «Крестиком» обозначен гипоцентр данного землетрясения.

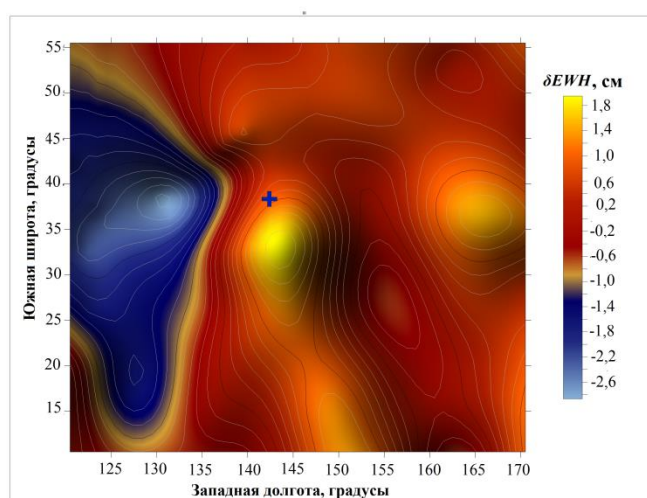


Рис. 2. Выделенная аномальная область по индексу δEWH для Японского землетрясения 2011 г.

Заключение. В работе исследованы очаговые области в районе сильных землетрясений с $M > 8$ по данным каталога USGS (США) в Тихом океане за период 2010 – 2015 гг. По данным GRACE построены пространственные модели распределения EWH для возмущенных условий геосреды.

С помощью метода RST рассчитаны индексы аномальности δEWH и построены уточненные цифровые карты гравитационных аномалий относительно исследуемых очаговых зон. Выявленная аномалия с положительными значениями δEWH характеризует поднятие океанского дна во время геодинамической активности в регионе.

Полагаем, что образование аномальной области связано с геодинамическими процессами в регионе. Планируется в дальнейших исследованиях изучить представительный класс сильнейших землетрясений Тихоокеанского региона для детального анализа особенностей изменчивости параметра EWH и его связи с глобальными геодинамическими и геофизическими процессами.

Список литературы

1. NASA. GRACE. URL: <https://grace.jpl.nasa.gov/>
2. USGS. URL: <https://www.usgs.gov>

3. Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А., и др. Проблемы совместной интерпретации временных вариаций гравитационного поля с данными о смещениях земной поверхности и дна океана на примере землетрясения Тохоку-Оки (11 марта 2011 г.) // Физика Земли. 2019. № 5. С. 53–60. doi: 10.31857/S0002-33372019553-60
4. Qu W., Han Y. Lu Z., An D., Zhang Q., Gao Y. Co-Seismic and Post-Seismic Temporal and Spatial Gravity Changes of the 2010 Mw 8.8 Maule Chile Earthquake Observed by GRACE and GRACE Follow-on // Remote Sensing. 2020. V. 12. 2768. 21 p. doi:10.3390/rs12172768
5. Simonov K. V.; Kashkin V. B.; Rubleva T. V.; Krasnoshekov K. V. Analysis of GRACE satellite measurements over seismically active areas of the strongest earthquakes // E3S Web of Conferences: Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2018). 2019. Т. 75. С. 1–5.
6. Surfer. URL: <https://www.goldensoftware.com>
7. Cressie N.A. The Origins of Kriging // Mathematical Geology. 1990. V. 22. P. 239–252.
8. Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 1998. V. 103. № B 12. P. 30205–30229.
9. Tramutoli V., Cuomo V., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C. Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas. The case of Kocaeli (özmit) earthquake, August 17th, 1999 // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 96. № 3–4. P. 409–426.
10. Кашкин В.Б., Одинцов Р.В., Рублева Т.В., Романов А.А., Симонов К.В. Геофизические явления в атмосфере над сейсмофокальными зонами коровых землетрясений в приграничных районах Ирана–Ирака // Сб. Триггерные эффекты в геосистемах. Институт динамики геосфер РАН. 2019. С. 374–382.

A. V. Malkanova¹, V. B. Kashkin¹, T. V. Rubleva¹,
K. V. Simonov², A. A. Kabanov¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: tvrubleva@mail.ru, simonovkv@icm.krasn.ru

CLARIFICATION OF THE DOMAINS OF GRAVITATIONAL ANOMALIES ACCORDING TO THE DATA OF THE GRACE CS DUE TO PROCESSES IN THE FOCAL ZONES OF CATASTROPHIC EARTHQUAKES

Within the framework of the study of the geodynamics of the strongest underwater earthquakes the features of the distribution of the EWH parameter in these regions were studied based on the measurements of the GRACE CS. A computational technique has been developed that makes it possible to specify the sizes of gravity anomalies caused by processes in the source zones of the strongest underwater earthquakes with $M > 8$. The essence of the technique is the construction and comparative analysis of digital maps of the distribution of the EWH parameter in a disturbed geoenvironment and in background seismic conditions.

Keywords: space system GRACE, satellite data, geoid, equivalent water height, gravitational potential, gravitational anomalies, geodynamic activity, strong earthquakes.

**В. Г. Маргарян¹, Л. В. Азизян², А. Э. Мисакян², Е. В. Гайдукова³,
Г. М. Цибульский⁴, К. В. Раевич⁵**

¹ Кандидат географических наук, доцент, Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

² Кандидат технических наук, «Центр гидрометеорологии и мониторинга» ГНУ, Министерство окружающей среды Республики Армения, Ереван, Армения

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Доктор технических наук, профессор, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

⁵ Кандидат технических наук, доцент, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: vmargaryan@ysu.am, levon_azizyan@yahoo.com, miamalya@yandex.ru, oderiut@mail.ru, GTsybulsky@sfu-kras.ru, KShatrova@sfu-kras.ru

**ОСОБЕННОСТИ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ
РЕКИ АРПА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

В работе рассматриваются основные закономерности распределения максимального расхода весеннего половодья в современных условиях, с использованием фактических данных «Центра гидрометеорологии и мониторинга» ГНКО Республики Армения максимальных расходов воды реки Арпа.

Ключевые слова: максимальный сток, распределения, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии ряда, р. Арпа – п. Джермук, Республика Армения.

При водохозяйственном планировании, оценке водных ресурсов, строительном проектировании гидротехнических сооружений необходим учет особенностей формирования водного режима рек, водоносности, максимального и минимального стока, что способствует актуальности решения альтернативных методических подходов к оценке экстремальных характеристик стока, в частности максимального стока половодья неизученных рек [4]. Для строительства всех водохозяйственных систем, мостовых переходов, переходов трубопроводов и ряда других сооружений определение максимальных расходов речных вод является обязательным этапом инженерных изысканий [5]. То есть, велика роль знания максимальных расходов, в особенности с точки зрения проектирования гидротехнических сооружений и их эксплуатации, осуществления мероприятий по предотвращению причиняемого ущерба. Максимальные расходы являются одной из важнейших характеристик фазы половодья водного режима.

В статье поставлена цель анализа и оценки особенностей распределения максимальных расходов в современных условиях реки Арпа.

Теоретической и информационной основами явились результаты исследований, представленные в работе [1; 2; 3; 6]. В качестве исходного материала использованы

фактические наблюдения «Центра гидрометеорологии и мониторинга» ГНКО Министерства окружающей среды Республики Армения за 1957–2020 годы. Максимальные расходы изучены в тех створах рек, которые расположены непосредственно на реке Арпа. В створах Ехегнадзор (около 1075 м) и Арени (около 999 м), находящихся в нижнем течении реки Арпа, фактические наблюдения максимального расхода проводились с начала 30-х годов 20-ого века, а в створе Джермук, который находится в верхнем течении (около 2034 м) – с 1957 года. Поэтому в работе с целью сравнения и сопоставления, исследования особенностей максимальных расходов воды реки Арпа в современных условиях проводились за период с 1957–2020 годы. Однако, в 1981 году началась эксплуатация водохранилища Кечут, построенное на реке Арпа, которое находится ниже створа Джермук. И, следовательно, для оценки влияния водохранилища на максимальные расходы в створе Ехегнадзор и Арени р. Арпа выделены два периода: до эксплуатации водохранилища (1957–1980 гг.) и после эксплуатации (1981–2020 гг.).

В данном исследовании применены метод математико-статистического анализа, метод сопоставления и сравнения, экстраполяции и корреляции, комплексный географо-гидрометеорологический анализ.

На изучаемой территории абсолютные максимальные расходы воды в основном проходят во время весеннего половодья. За период с 1957 г. по 2020 г. в створе Джермук р. Арпа абсолютные максимальные расходы воды наблюдались в период весеннего половодья во все годы, а в створе Ехегнадзор и Арени р. Арпа – в 1,6 % случаев.

На реке Арпа вниз по течению увеличиваются значения абсолютных максимальных расходов и достигают больших значений в замыкающем речном створе (табл. 1). Наибольший максимальный расход, наблюдавшийся 18 апреля 1988 г. в створе п. Арени, составил $199 \text{ м}^3/\text{с}$, а до строительства Кечутского водохранилища, 1 апреля 1969 г., по реке прошло $340 \text{ м}^3/\text{с}$ воды. После строительства водохранилища сток реки урегулировался. В результате по сравнению с периодом 1957–1980 гг. за период 1981–2020 гг. наблюдается уменьшение основных характеристик максимальных расходов весеннего половодья.

Из данных табл. 1 видно, что коэффициент вариации (C_v) абсолютных максимальных расходов рек Арпа не превышает 0,50 и за весь обсуждаемый период и изменяется в небольшом диапазоне – от 0,46 до 0,40. Для абсолютных максимальных расходов такие значения вариации довольно небольшие. То есть, можно предположить, что абсолютные максимальные расходы рек Арпа довольно стабильные и имеют сравнительно небольшие значения рискованности. А коэффициент асимметрии ряда (C_s) в отличие от коэффициента вариации, имеет большие значения – варьируют от 1,05 до 1,72 за период 1957–1980 гг. и от 0,04 до 0,56. Коэффициент асимметрии показывает распределенность членов ряда по отношению к центральному члену ряда, если ряд представлен в убывающем или возрастающем порядке.

Отмечается корреляционная связь между величинами абсолютных максимальных расходов за период половодья (IV–VI) на рек Арпа в створах п. Арени и Ехегнадзор. Зависимость такого рода можно использовать для расчетов и прогнозов максимумов стока весеннего половодья (рис. 1).

Основные многолетние характеристики максимальных расходов воды весеннего половодья реки Арпа за периоды до и после эксплуатации водохранилища

Река – пост	Период наблюдений		Многолетние характеристики стока						
			наибольшие за период наблюдений и год			За многолетний период			
	годы	Число лет	расход воды, м ³ /с	модуль стока, л/с · км ²	день, месяц, год	средний расход воды, м ³ /с	коэффициент вариации, C _v	коэффициентов асимметрии, C _s	C _s /C _v
р. Арпа – п. Джермук	1957–2020	64	91,0	457	17/05/1983	46,0	0,40	–0,30	–0,75
р. Арпа – п. Ехегнадзор	1957–1980	24	244	200	29/04/1969	106	0,38	1,72	4,53
	1981–2020	40	131	107	29/04/1997	64,6	0,40	0,56	1,40
	разность		113	93		41,4			
р. Арпа – п. Арени	1957–1980	24	340	181	01/04/1969	168	0,43	1,05	2,44
	1981–2020	40	199	106	18/04/1988	115	0,40	0,04	0,10
	разность		141	75		53			

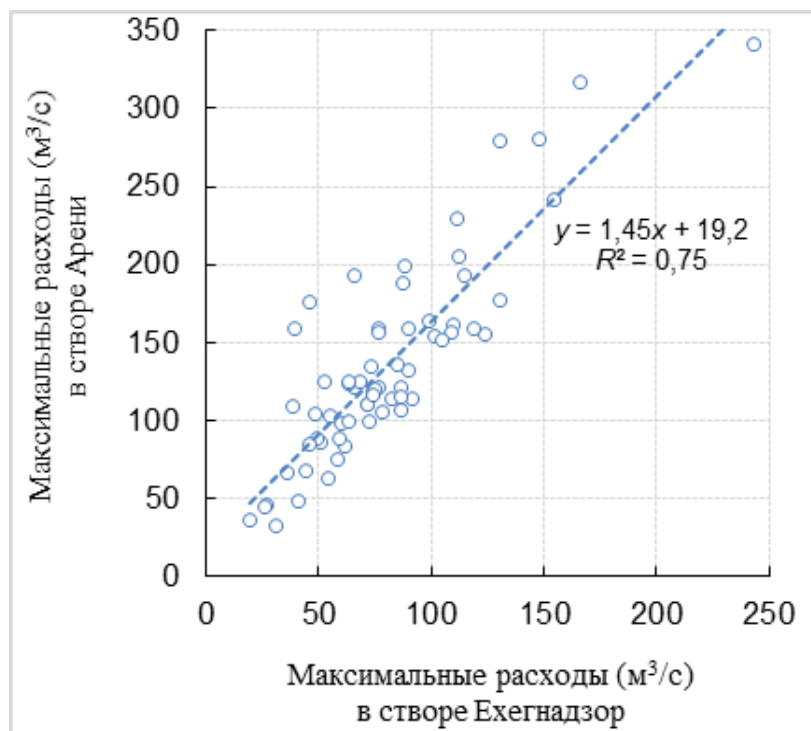


Рис. Корреляционная связь между абсолютными максимальными расходами на р. Арпа – п. Ехегнадзор и на р. Арпа – п. Арени

Таким образом, абсолютные максимальные расходы воды проходят в период весеннего половодья: в створе Джермук р. Арпа. Абсолютные максимальные расходы воды наблюдались в период весеннего половодья во все годы за период с 1957 г. по 2020 г., а в створе Ехегнадзор и Арени – в 1,6 % случаев.

На реке Арпа вниз по течению увеличиваются значения абсолютных максимальных расходов, достигающие больших значений в замыкающем речном створе Арени.

По сравнению с периодом 1957–1980 гг. за период 1981–2020 гг. наблюдается уменьшение основных характеристик максимальных расходов весеннего половодья.

Значения коэффициента вариации ряда абсолютных максимальных расходов изменяются в небольшом диапазоне – от 0,46 до 0,40, а коэффициент асимметрии в относительно большом диапазоне – 1,05 до 1,72 за период 1957–1980 гг. для створа Ехегнадзор и Арени р. Арпа.

Выявлена корреляционная связь между величинами абсолютных максимальных расходов за период половодья на реке Арпа в створах п. Арени и Ехегнадзор, которую можно использовать для расчетов и прогнозов максимумов стока весеннего половодья.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке КН РА (Комитет науки Республики Армения) и РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований) в рамках совместной научной программы 20RF-039 «Краткосрочный вероятностный прогноз стока рек в период весеннего половодья» и № 20-55-05006\20 соответственно.

Список литературы

1. Гайдукова Е.В., Маргарян В.Г., Мякишева Н.В., Павлов М.Р. Обзор методов эффективного прогнозирования характеристик речного стока в горных и полугорных районах. Gaidukova E. V., Margaryan V. G., Myakisheva N. V., Pavlov M. R., Khaustov V. A. Review of methods for effective forecasting of river runoff characteristics in mountain and semi-mountain areas // IV International Symposium "Engineering and Geosciences: Applied and Basic Research", Complex Research Institute named N.I. Ibragimova, Grozny, 2021.
2. Комлев А.М., Мельникова Т.Н. Водный режим рек Северо-Западного Кавказа. Закономерности формирования и методы расчета. Пермь: ПГУ, 2008. 112 с.
3. Кузьмин В.А., Гаврилов И.С., Соколова Т.А., Тимофеев А.Ю. Расчет максимальных расходов весеннего половодья методом оптимизации интегрального поправочного коэффициента // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2010. № 14. С. 5–13.
4. Мельникова Т.Н. Максимальный сток весеннего половодья рек Северо-Западного Кавказа // Вестник АГУ, 2014. Вып. 3 (142). С. 158–164.
5. Савичев О.Г. Методика расчета максимальных расходов речных вод в таёжной зоне Западной Сибири // Известия ТПУ, 2011. Т. 318, № 1. С. 140–144.
6. Шутов А.М. Расчет максимальных расходов воды весеннего половодья на малых реках Республики Мордовия // Вестник Мордовского университета, 2003. № 3–4. С. 106–112.

V. G. Margaryan¹, L. V. Azizyan², A. E. Misakyan², E. V. Gaidukova³,
G. M. Tsibul'skii⁴, K. V. Raevich⁵

¹ Cand. of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of physical geography and hydrometeorology of the Geographical and Geological Faculty, Yerevan State University, Armenia

² Cand. of Technical Sciences, «Hydrometeorology and Monitoring Center» SNCO Ministry of Environment, Yerevan, Republic of Armenia

³ Cand. of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, Department of Engineering Hydrology. St. Petersburg, Russia

⁴ Doctor of Technical Sciences, professor, Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Chair of Systems of Artificial Intelligence, Krasnoyarsk, Russia

⁵ Cand. tech. sciences, Associate Professor, Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Chair of Systems of Artificial Intelligence, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: vmargaryan@ysu.am, levon_azizyan@yahoo.com, miamalya@yandex.ru, oderiut@mail.ru, GTsybulsky@sfu-kras.ru, KShatrova@sfu-kras.ru

FEATURES OF THE MAXIMUM WATER FLOWS OF THE ARPA RIVER UNDER MODERN CONDITIONS

The paper discusses the main regularities distribution of the maximum runoff rate of spring floods in modern conditions, using actual data of the «Hydrometeorology and Monitoring Center» SNCO Ministry of Environment SNCO of the Republic of Armenia of the maximum flow rates of the river Arpa.

Keywords: maximum runoff, distributions, coefficient of variation and row asymmetry coefficient, r. Arpa – p. Jermuk, Republic of Armenia.

Financing: this work was supported by the RA Science Committee and Russian Foundation for Basic Research (RF) in the frames of the joint research project SCS 20RF-039 Short-term probabilistic forecast of river flow during the spring flood and RFBR № 20-55-05006\20 accordingly.

А. К. Матузко

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

СООТНОШЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И МНОГОЛЕТНИХ ГОРОДСКИХ ОСТРОВОВ ТЕПЛА

Расположение городских островов тепла совпадает с местоположением промышленных объектов. Городская территория условно может быть разделена на промышленную застройку, жилую и частный сектор. Цель работы выявить взаимосвязь промышленных объектов и городских островов тепла. Городские острова тепла сформированы на основании многолетних спутниковых снимков Landsat-8. С 2013 по 2020 год были отобраны безоблачные сцены в бесснежный период, что составляет 30 сцен на территорию города Красноярска. Территориальное совпадение городских островов тепла и промышленных объектов, может характеризоваться как значительное влияние на повышение температуры земной поверхности.

Ключевые слова: тепловые космические снимки, Landsat, острова тепла, температура поверхности земли.

Введение. Деятельность человека в XXI веке явилась определяющим фактором воздействия на природу не только в позитивном, но и в негативном плане. Влияние на природу с каждым годом становится более масштабным и нередко приводит к экологическому кризису. Впервые серьезный экологический кризис наблюдался в 1960-70-е годы. Экологический кризис обусловлен такими факторами, как заметное снижение самоочищения биосферы, которая уже не может справляться с отходами, выбрасываемыми в нее предприятиями и людьми. Такое подавление природы вынуждает промышленные предприятия делать различные шаги по ее сохранению.

На рассеивание примесей в условиях города существенно влияют высота зданий, планировка улиц, их ширина и направление. В крупных городах при длительной облачной погоде с прояснениями формируется городской остров тепла со своей структурой циркуляции атмосферы, когда образуется устойчивый поток воздуха к центру такого острова, и все вредные примеси сосредотачиваются в области острова тепла [1]. Исследование направлено на рассмотрение экологической ситуации города Красноярска, изучение многолетних островов тепла и их взаимосвязь с городской промышленностью. Формирование островов тепла осуществлялось по спутниковым данным Landsat-8.

Материалы и методы. Уровень загрязнения атмосферы при постоянных параметрах выбросов зависит от распределения температуры с высотой, скорости и направления ветра, интенсивности солнечной радиации, влажности воздуха, количества и продолжительности атмосферных осадков. При низких и холодных выбросах (дымовые и вентиляционные трубы) вблизи источника концентрация примеси мала, она увеличивается на подветренной стороне и достигает максимума на некотором расстоянии от трубы в зависимости от скорости ветра. При высоких и горячих выбросах (трубы предприятий черной и цветной металлургии, некоторых химических

производств, электростанций и т.д.) распределение примесей в атмосфере зависит как от скорости и направления ветра, так и от вертикального распределения температуры воздуха. При слабом ветре концентрации примесей у земли уменьшаются, а при сильном ветре происходит возрастание скорости переноса примесей в горизонтальном направлении.

Если температура с высотой падает, то летом в дневное время создаются условия для интенсивного турбулентного обмена, что приводит к возникновению в нижнем приземном слое воздуха значительных концентраций примесей, поступающих от высотных источников, и к заметным колебаниям концентраций со временем. Если в приземном слое воздуха температура с высотой растет (условия инверсии температуры), то рассеивание примесей ослабевает. В случае мощных и длительных инверсий при низких неорганизованных выбросах концентрации примесей могут существенно возрастать [2].

При туманах концентрации примесей могут сильно увеличиться за счет приземной инверсии и повышенной влажности воздуха. С туманами часто связаны зимние смоги, при которых в течение длительного времени высокие концентрации вредных примесей удерживаются в приземном слое воздуха [3].

Формирование многолетних городских островов тепла. Материалы для изучения городского острова тепла были собраны из архива космических снимков Landsat-8 с 2013 по 2020 год. Всего было собрано более 30 сцен в бесснежный период. Для каждой сцены был сформирован свой остров тепла, используя методику, состоящую из следующих шагов:

1. Рассчитать температуру поверхности земли по данным Landsat-8 [4].
2. Для каждого расчета определить min, max, среднее значение.
3. Определить диапазон максимальных значений.
4. Преобразовать растровые ячейки в векторный формат данных.
5. Удалить полигоны площадью меньше 2500 м².

Формирование многолетнего городского острова тепла проводилась по трем сезонам: весна, лето, осень. Так как было замечено, что сезонность влияет на распространение городского острова тепла.

Результаты. На рис. 1 показан результат сравнения местоположения многолетнего летнего городского острова тепла и объектов промышленности. Объекты промышленности представлены как промышленные кварталы, так и точно обозначены трубы, расположенные на предприятиях.

На рисунке 2а показано совпадение городского острова на примере территории железнодорожного вокзала и Красноярского электровагоноремонтного завода. На рисунке 3б Цементный завод, Красноярская ТЭЦ-2 и ещё несколько небольших промышленных объектов, которые объединены в один промышленный квартал и имеют совпадение с городским островом тепла, рассчитанным по серии снимков температуры земной поверхности. На рисунке 2в показана самая большая по территории промышленная зона, которая включает: Красноярский машиностроительный завод, Красноярский завод цветных металлов, КрасТЭЦ-1, Шинный завод. На рисунке 3г промышленная зона Красноярского алюминиевого завода и соответствующие ей городские острова тепла.

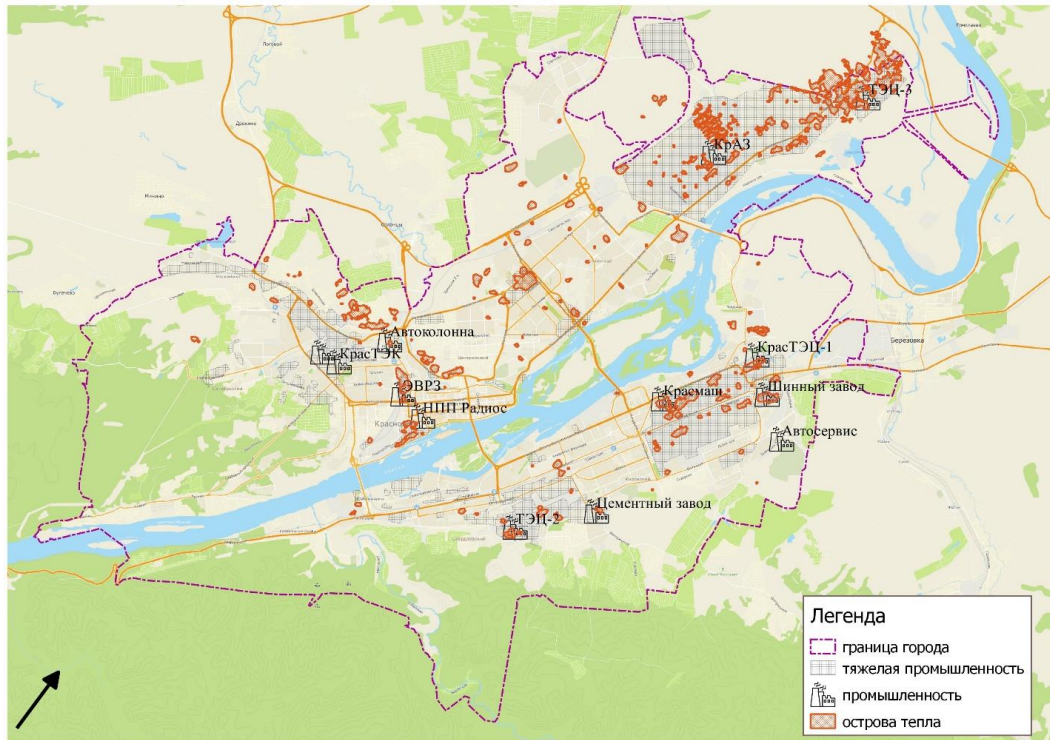
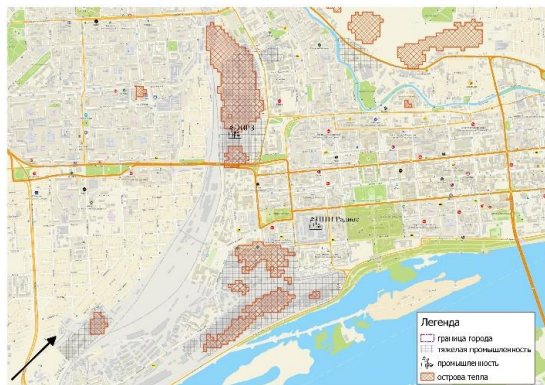
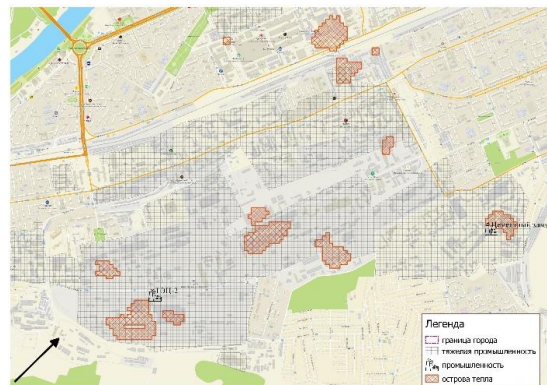


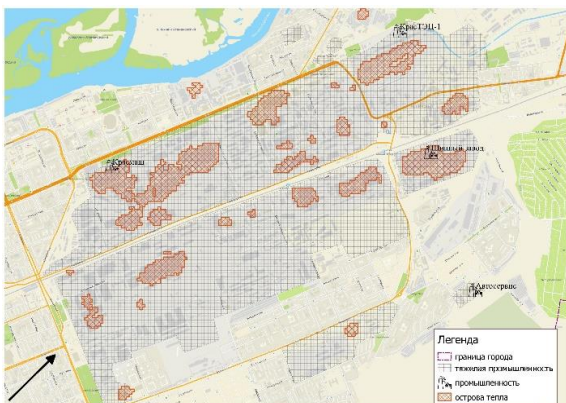
Рис. 1. Сеть наземных наблюдений ФИЦ КНЦ СО РАН



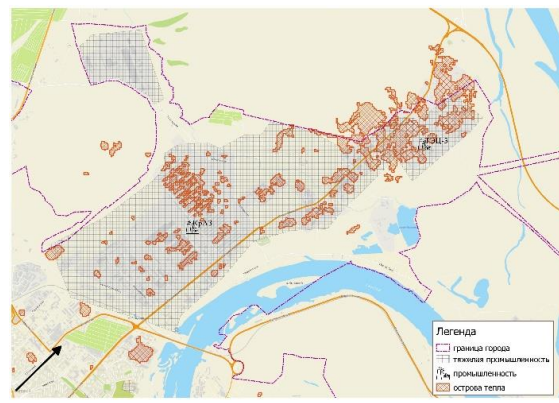
а



б



в



г

Рис. 2. Совпадение городских островов тепла и промышленных объектов

Выводы. Городской остров тепла во многих работах характеризуется как негативное последствие развития крупных городов и промышленности. По результатам работы можно сказать, что взаимосвязь между промышленными объектами и распространением городских островов тепла очень высокая. Учитывая такие особенности влияния промышленных объектов на городские территории, для безопасного проживания необходимо планировать районирование территории по природным условиям, принимать защитные архитектурно-плановые решения.

Список литературы

1. Хомич В.А. Экология городской среды: Учеб. пособие для вузов. – Омск: Изд-во СиБАДИ, 2002. – 267 с.
2. Хлебопрос Р.Г., Тасейко О.В., Иванова Ю.Д., Михайлюта С.В. Красноярск. Экологические очерки. Сибирский федеральный университет. 2012. 130 с.
3. Морозов, А. Е. Метеорологические условия и загрязнение атмосферы/ Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. – 128 с.
4. Matuzko A.K., Yakubailik O.E., Urban heat island effects over Krasnoyarsk obtained on the basis of Landsat 8 remote sensing data, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, Volume 211, Number 1, 012010

A. K. Matuzko

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

INTERRELATION OF INDUSTRIAL FACILITIES AND A TIME SERIES OF URBAN HEAT ISLAND

The location of urban heat islands coincides with the location of industrial facilities. The urban area can be conditionally divided into industrial buildings, residential and private sectors. The purpose of the work is to identify the relationship between industrial facilities and urban heat islands. Urban heat islands are formed on the basis of a time series satellite images of Landsat-8. From 2013 to 2020, cloudless scenes in the snowless period were selected, which is 30 scenes in the territory of Krasnoyarsk city. The territorial coincidence of urban heat islands and industrial facilities can be characterized as a significant impact on an increase in the temperature of the earth's surface.

Keywords: thermal space images, Landsat, heat island, land surface temperature.

Е. В. Павлова

Кандидат географических наук, Хакасский государственный
университет им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия
e-mail: eve21@yandex.ru

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСТАГРОГЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ

В статье приведены результаты многолетних полевых исследований постагроденных земель модельных территорий Республики Хакасии (Московского, Кирбинского, Вершино-Биджинского сельсоветов и Алтайского района). На основе полученных данных была сформирована информационно-аналитическая система постагроденных земель которая позволит выявить реальные территории и состояние залежных земель Республики Хакасии. Наша работа нацелена на формирование базы данных площадей постагроденных земель и анализ их степени зарастания. На основе геоботанических исследований, анализа картографических материалов, визуального дешифрирования космоснимков видимого диапазона из открытых источников был создан ГИС-проект модельных территорий, включающий набор растровых данных и тематических векторных слоёв. Полученные данные могут быть включены в Единую федеральную информационную систему о землях сельскохозяйственного назначения.

Ключевые слова: Республика Хакасия, постагроденные земли, ГИС-проект, сельскохозяйственные угодья.

В настоящее время назрела проблема рационального использования сельскохозяйственных угодий, которая решается на всех уровнях власти. В специальном докладе МГЭИК «Изменение климата и земли», одной из главных мыслей стало использование земли, которая является основой для жизнеобеспечения и благополучия людей. По данным национальной статистики, доступной в FAOSTA, с 1961 г. происходил рост мирового населения и изменения в потреблении продуктов питания который привёл к высоким темпам использования земли и пресной воды [1].

На территории Российской Федерации в настоящее время большие площади пахотных земель не используются в сельском хозяйстве. В связи с этим с 2016 года были приняты законодательные акты, предусматривающие порядок изъятия земельных участков из земель сельскохозяйственного назначения при их неиспользовании по нецелевому назначению или использовании с нарушением законодательства [2].

Вопрос учёта и рационального использования постагроденных земель имеет огромное значение для Республики Хакасии, так как сельскохозяйственное использование земель на этой территории было известно с афанасьевской культуры (середины III тыс. до н.э) [3]. Максимальные площади пашни в Хакасии были зафиксированы в 1974 г. и составили 743 тыс. га [4]. Эта площадь, сохранялась до 1990 г., после которого начала снижаться в силу экономических причин и к 2000 году достигла уровня 557 тыс. га, а в 2005 году площадь пашни составила всего 477 тыс. га [5,6]. Площадь земельного фонда Республики Хакасия на 1 января 2020 года составляет 6156,9 тыс. га., из них площадь сельскохозяйственных угодий – 1912,4 тыс. га (31%),

из них пашней – 684,9 тыс. га, сенокосов – 160,4 тыс. га, пастбищ – 1019,8 тыс. га и залежей – 40 тыс. га [7].

Достаточно большая доля сельскохозяйственных угодий в регионе после приватизации оказалась брошенной, и собственники не выполняют требования законодательства по рациональному использованию земель. Однако, постагроденные территории являются ценным и приоритетным ресурсом для развития мясного животноводства и овцеводства в Республики Хакасия [8]. За счёт включения таких неиспользуемых территорий в сельскохозяйственный оборот возможно расширить кормовую базу и вовлечь их в сельскохозяйственный оборот.

На постагроденных территориях Республики Хакасия сложилась не однозначная ситуация в степной и лесостепной природных зонах, так как большинство земли зарастают вязом приземистым (*Ulmus pumila L.*), который является не типичной для создания защитных лесополос на всей территории Российской Федерации. Эта древесная порода является малоценной и довольно устойчивой к различным воздействиям.

Целью нашей работы было создание информационно-аналитическая система постагроденных земель которая позволит выявить реальные площади и состояние залежных земель Республики Хакасии по данным космических снимков и полевых исследований (Рис.1.).

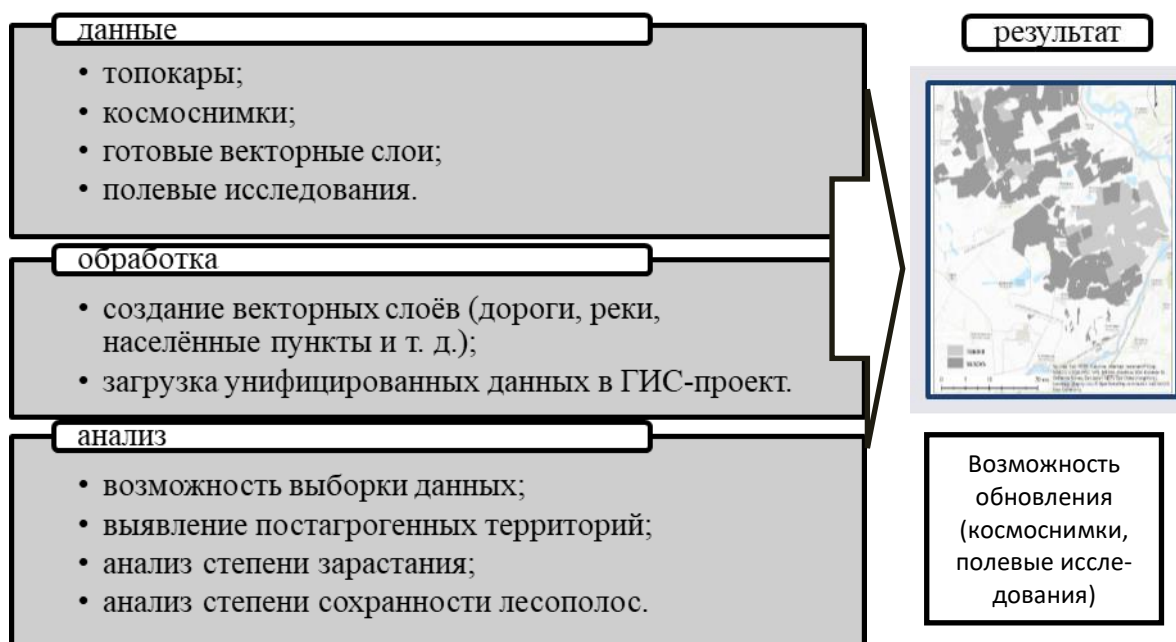
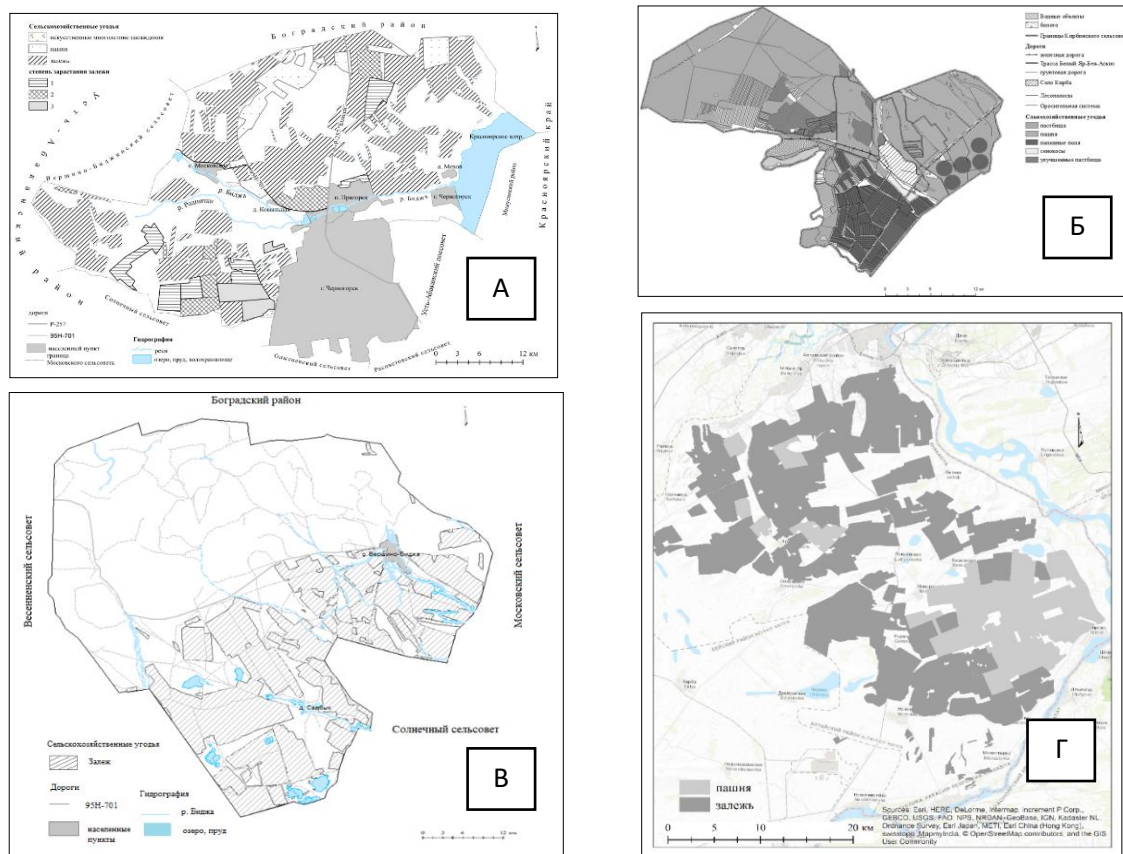


Рис. 1. Структура информационно-аналитической системы

Основным материалом для работы послужили: анализ картографических данных (сельскохозяйственные карты Усть-Абаканского, Бейского и Алтайского районов, серия тематических карт для планирования сельского хозяйства Юга Красноярского Края и др.), результаты собственных подспутниковых наблюдений (состав и структура растительности постагроденных земель), данные публичной кадастровой карты и разновременные данные дистанционного зондирования.

Для создания информационно-аналитической системы по зарастанию постагрогенных территорий на основе ГИС-проекта использовалась программа ArcMap 10.1. В ГИС проекте были оцифрованы контуры сельскохозяйственных территорий. Для выделения различных типов площадей использовался базовый слой World Imagery, для уточнения площадей и степени их зарастания были дешифрированы космические снимки Landsat и Sentinel (2019-2020 гг.) (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov>). Настройки рабочего проекта: система координат WGS 1984 UTM Zone 46N, проекция Mercator / WGS84 (рис. 2).



А – Московский сельсовет, Б – Кирбинский сельсовет,
 В – Вершино-Биджинский сельсовет, Г – Алтайский район
 Рис. 2. Результаты информационно-аналитической системы на модельных участках

С учётом региональных особенностей для территории Хакасии была разработана авторская методика бальной оценки текущего состояния сельскохозяйственных угодий, подверженных процессам зарастания [9].

Для оценки степени сохранности структуры лесополос они были разделены на четыре категории сохранности [10].

Проанализировав модельные территории Республики Хакасия, было выявлено, что наибольшая доля сельскохозяйственных земель принадлежит Кирбинскому сельсовету Бейского района (95,4%), в связи с ландшафтными особенностями территории Вершино-Биджинского сельсовета Усть-Абаканского района площадь сельскохозяйственных земель оказалась наименьшей (39,7%). Однако Вершино-Биджинский сельсовет оказался в лидерах по доле залежных земель от общей площади района (42,1%), при среднем значении 30,5% на других участках. Таким образом, были вы-

явлены значительные площади постагрогенных территорий, которые находятся в ухудшающихся условиях и терюют вовлечения в сельскохозяйственный оборот.

Созданная информационно-аналитическая система способна компилировать данные из различных источников, анализировать и получать результат в виде картографического, текстового и графического материала. Обновление системы возможно проводить с помощью загрузки данных полевых исследований и космических снимков. В настоящее время с ХГУ им. Н.Ф. Катанова налажена система поставки данных космических снимков от Роскосмос, что позволит анализировать данные в автоматическом режиме. Возможностью реализации полученной информационно-аналитической системы является ее внедрение в Единую федеральную информационную систему о землях сельскохозяйственного назначения, которая предназначена для обеспечения актуальной и достоверной информацией о землях сельскохозяйственного назначения и землях, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий, включая информацию о местоположении, состоянии и фактическом использовании таких земель и состоянии сельскохозяйственной растительности на них.

Список литературы

1. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Páan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekzi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. – 2019. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf/
2. Об обороте земель сельскохозяйственного назначения. Федеральный закон от 24.07.2002 г. № 101-ФЗ. Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 28.06.2021, N 0001202106280039. URL: <https://docs.cntd.ru/document/603983603>.
3. История Хакасии с древнейших времен до 1917 года / под ред. Л. Р. Кызласов. – М.: Наука: Издательская фирма «Восточная литература», 1993.
4. Никольская Л. А. Хакасия: экономико-географический очерк. – Красноярск: Кн. изд-во, 1968.
5. Всероссийская сельскохозяйственная перепись 2006 года по Республике Хакасия. Основные итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи по хозяйствам всех категорий. Статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Хакасия. Т. 1. Абакан, 2008.
6. Донская О. Л. Запасы и потоки углерода в агроценозах Минусинской впадины: автореферат дис. ... кандидата биологических наук: 03.00.27 / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2004.
7. Доклад Управления Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Республике Хакасия «О состоянии и использовании земель в Республики Хакасия в 2019 году». – Абакан, 2020.
8. Об утверждении схемы территориального планирования Республики Хакасия (с изменениями на 26 мая 2021 года). Постановление Правительства Республики Хакасия № 763 от 14.11.2011. 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/428540365>.
9. Pavlova E.V., Volkova A.I., Demina E.A. Geoeological agricultural lands of the Altai region of the Republic of Khakassia // E3S Web of Conferences, Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020), 2020, 223, 03012. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303012>.
10. Pavlova E.V., Volkova A.I., Demina E.A. Geoeological assessment of the state of postagrogenic lands of the Moscow village soviet council of the Republic of Khakassia on the basis of remote sensing data // E3S Web of Conferences. Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2019), 2020. 149. 03006. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202014903006.

E. V. Pavlova

Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

e-mail: eve21@yandex.ru

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF POST-AGROGENIC LANDS OF THE REPUBLIC OF KHAKASSIA

Annotation. The article presents the results of long-term field studies of postagrogenic lands of the model territories of the Republic of Khakassia (Moscow, Kirbinsky, Vershino-Bijinsky village councils and the Altai district). On the basis of the obtained data, an information and analytical system of postagrogenic lands was formed, which will allow identifying the real territories and the state of the fallow lands of the Republic of Khakassia according to satellite images. Our work is aimed at forming a database of post-agrogenic land areas and analyzing their degree of overgrowth. Based on geobotanical studies, analysis of cartographic materials, visual decoding of visible-range satellite images from open sources, a GIS project of model territories was created, including a set of raster data and thematic vector layers. It made it possible to visualize information about the state and use of agricultural land in the form of maps of various topics. As a result of the work done on processing field materials, decoding satellite images in model territories, it was possible to identify the area of post-agrogenic lands and the degree of their overgrowth. The obtained data can be included in the Unified Federal Information System on Agricultural Lands.

Keywords: Republic of Khakassia, post-agrogenic lands, GIS project, agricultural lands.

Д. А. Перфильев¹, Т. В. Авдюкова²

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

² Директор станции агрохимической службы «Солянская», с. Новая Солянка, Красноярский край, Россия
e-mail: perfilyev7775@yandex.ru, agrohim_24_3@mail.ru

СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КИСЛОТНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

В статье предлагается математическая модель сегментации динамики кислотности сельскохозяйственных земель Восточной Сибири. Правило сегментации основано на анализе частотной характеристики изображения, что позволяет прогнозировать изменение кислотности сегментированных областей.

Ключевые слова: сегментация изображения, правило сегментации, сегментация динамики агрохимических показателей.

Решение национальной проблемы обеспечения продовольственной безопасности не может быть выполнено без глубокой цифровой трансформации технологий контроля и прогнозирования динамики основных агрохимических показателей плодородия почв. Новые технологии должны быть направлены на оптимальное использование и сохранение естественно природного энергетического ресурса сельскохозяйственных земель.

Трансформация технологии контроля и управления качеством естественного энергетического ресурса территорий, предполагает широкое использование высокоавтоматизированных (интеллектуальных) технологий управления качеством плодородия на основе математического анализа и прогнозирования динамики ключевых агрофизических показателей почв.

Технологически, трансформация отражается в задачи математической сегментации изображения (непрерывной и дифференцируемой функции $f(z)$), проблемно-предметной области и интерпретации характеристики признаков сегментированных участков изображения [1-13].

Изображение проблемно-предметной области формируется на основе заданных физических признаков исследуемого процесса (объекта):

Пусть задано $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ – множество признаков объекта, которые представлены комплексом изображений $f(z_i)$, а также правила $Lp(S_i^{Sem})$, определяющие радиус однородности r_i^{Sem} значения i -го признака.

Решением задачи сегментации является разбиение функции $f(z_i)$, на N областей (классов), для которых $Lp(S_i^{Sem})$ принимает истинные значения, удовлетворяющие цели.

В этом случае сегментация рассматривается как непрерывный процесс анализа динамики изображения $f(z_i)$:

$$\text{Seg: } f(z_i) \xleftrightarrow{Lp(S_i^{Sem})/r_i^{Sem}} n_i^{(Sem.)}, \quad (1)$$

где $n_i^{(Sem.)} \in N$ – семантическое отношение (имя класса), определенное при анализе однородности области текущего состояния $f(z_i)$, ограниченной радиусом $r_i^{(Sem.)}$.

Сложность сегментации определяется рядом концептуальных аспектов:

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

В общем случае сегментация функции $f(z)$ удовлетворяет интерпретатора, когда любая пара элементов $[z_i - z_{i-1}]$ из любого подмножества $z_i \in f(z)$ составляет описание контура.

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

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

Математическая модель «соседства» для любой области функции $f(z)$, замкнутого контура описывается интегральной формулой Коши.

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

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.

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

Выражение (2) позволяет сегментировать контур области S_i изображения $f(z)$, а (3) характеризовать свойства контура.

С небольшим усложнением выполняется сегментация и описание контура в случае многосвязности. Т.е., при обходе дополнения в отрицательном направлении.

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

Соответственно вычисление осуществляется по формуле:

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

Известно, что особая точка дифференцирования z_0 служит началом радиуса $r_i^{(Sem.)}$. Обычно значение особой точки задается эмпирически на основании экспертных знаний. Например, в области растениеводства особые точки представляют центры четырех групп культурных растений с соответствующими значениями кислотности.

Концептуально значение особой точки определяется на отрезке границы сегментированной области и фона, где интеграл равен нулю, при любом размере и расположении общей границы.

По этой причине, положение особой точки, предлагается привязать к динамике частотной характеристики изображения. При этом, ограничение $r_i^{(Sem.)}$ обеспечит однородность частотной характеристики сегментированной области изображения.

Ключевыми показателями определяющими энергетическое состояние плодородия сельскохозяйственных земель Восточных территорий Красноярского края, следует признать; кислотность, влажность, содержание гумуса, подвижных форм фосфора, калия, на слабокислых и нейтральных почвах в условиях резко континентального климата Сибири [14-17].

Как пример, сегментации изображений средневзвешенных показателей кислотности, подвижного фосфора и свободного калия для групп растений, участков сельскохозяйственных земель в зоне п. Степняки, Браженского сельсовета Канского района Красноярского края, представлен на Рис. 1.

Обычно интерпретация феноменологии объекта выполняется на основе анализа характеристики частоты, амплитуды, фазы сегментированных участков изображения $f(z_i)$.

Сегментация начинается с вычисления средней линии графика изображения $f(z_i)$:

$$\mu_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k \mu_i}{k},$$

где k – число выборок. Границы однородности вычисляются по правилу Lp следующим образом:

$$Lp_U = \mu_{cp} + \frac{r_i^{(Sem)} \sigma}{\sqrt{n}},$$

где n – количество измерений.

Значение отклонения σ – вычисляется следующим образом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [\mu_{i,j} - \mu_{cp}]^2}{nk}}.$$

Аналогично выполняется сегментация и описание контура в случае многосвязности, т.е., с интегрированием по верхнему и нижнему значению границы области изображения.

$$Lp_{UL} = \mu_{cp} \pm \frac{r_i^{(Sem)} \sigma}{\sqrt{n}}.$$

Очевидно, что сегментированные области (см. рис.1 слева) правилом Lp_{UL} следует считать относительно однородными. Так, как сегментация выполняется на основе достаточно абстрактного показателя, как средневзвешенная величина.

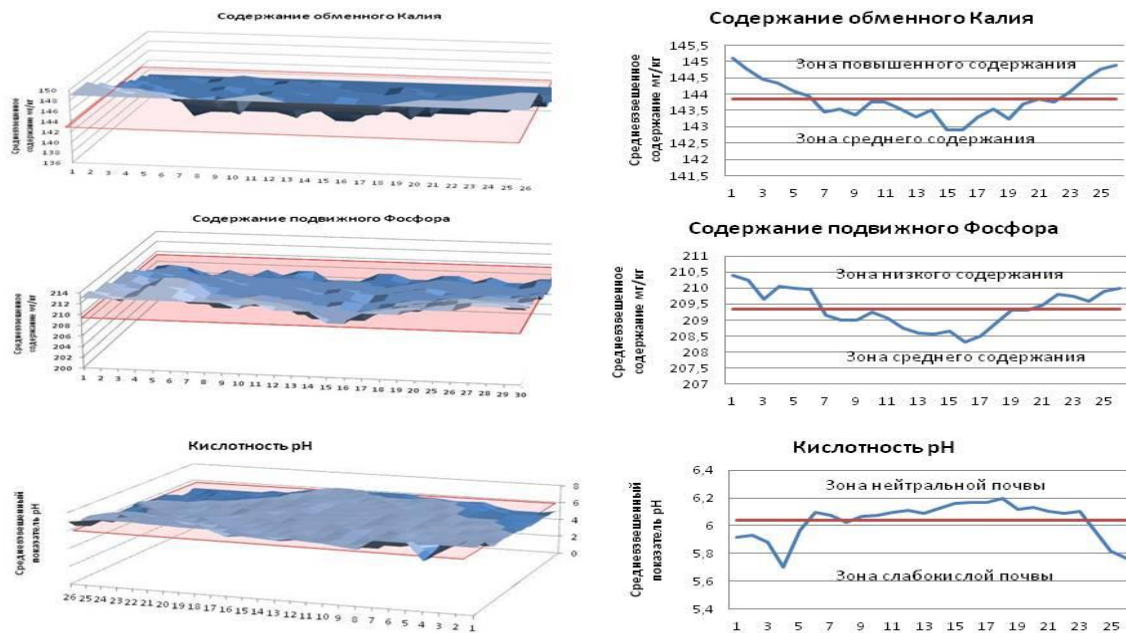


Рис. 1. Сегментация изображения средневзвешенных показателей обменного калия, подвижного фосфора и кислотности

Повысить качество сегментации областей и соответственно получить более точное решение задачи, удобно на основе анализ их частотной характеристики [18-21]. В этом случае, сегментация на основании анализа динамики частоты сегментированного участка изображения $f(\omega_r)$, описывается интегральной формулой вида [20,21].

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

где: ω_r – частотная оценка на интервале $[\omega_i - \omega_{i-1}]$ характерная для близко к нейтральной среде, радиусом r_i^{Sem} ; ω_0 – особая точка дифференцирования.

Вычисление интеграла, характеризующего изменение частоты сегментированной области, осуществляется по формуле.

$$f(\omega_r) d\omega = \oint_{\beta\alpha} f(\omega_r(t)) \omega_r'(t) dt = \int_{\alpha}^{\beta} \text{Re}[f(\omega_r(t)) \omega_r'(t) dt + i \int_{\alpha}^{\beta} \text{Im}[f(\omega_r(t)) \omega_r'(t) dt \quad (3a)$$

Выражение (3a) позволяет сегментировать область изображения с заданной частотной характеристикой. Анализ динамики частоты в комплексе с анализом динамики показателей амплитуды, фазы, областей изображения, позволяет прогнозировать изменения качественной однородности физических показателей в известных условиях сезонности и учетом качества входных данных.

Предположительно, области с относительно высоким показателем частоты тяготеют к переходу в класс более активных почв и наоборот.

Данные распределения агрофизических показателей на основе многолетних исследований, проводимых сотрудниками ФГУП САС Саянская, позволяют получить

общую картину динамики состояния плодородия сельскохозяйственных земель Канского района Красноярского края, в частности сельскохозяйственных земель п. Степняки, Браженского сельсовета Канского района Красноярского края.

На Рис. 2., представлена картограмма с основными показателями опытного участка сельскохозяйственных земель п. Степняки.

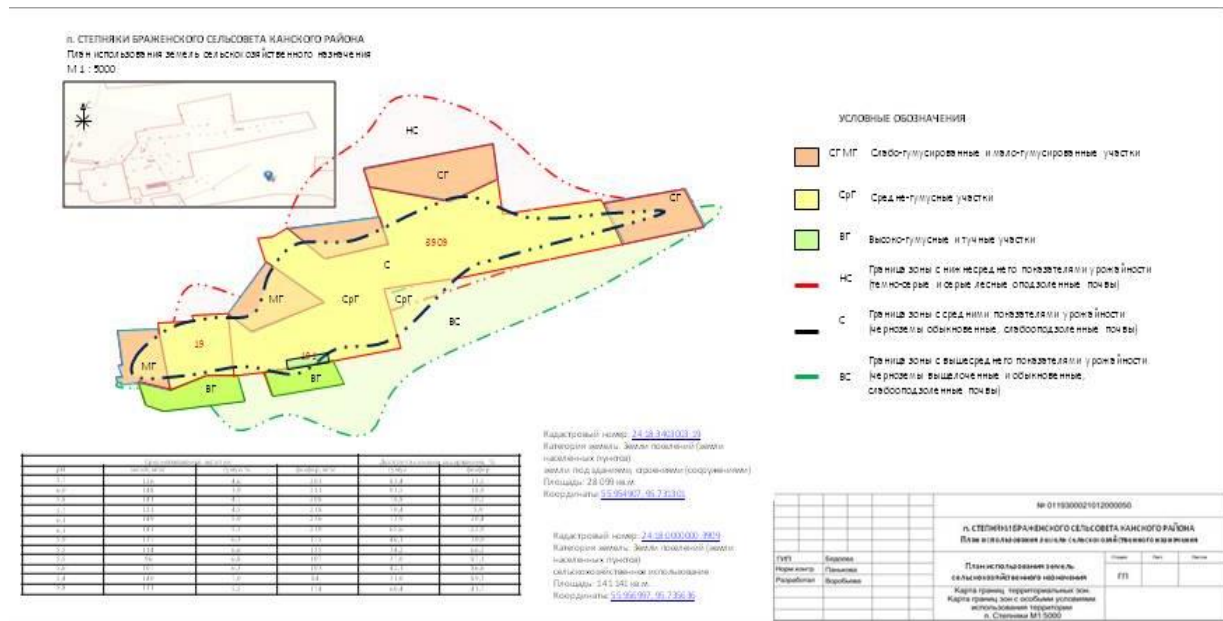


Рис. 2. Картограмма сельскохозяйственных земель п. Степняки

Вычисление радиуса r_i^{Sem} однородности для i -того класса выполняется от особой точки ω_0 следующим образом:

$$\omega_{0i} = \mu_{cp} \pm \frac{r_i^{(Sem)} \sigma}{\sqrt{n}}.$$

Следует отметить, что значение «радиуса» r_i^{Sem} описывается графиком $f(\omega_r)$. В результате характеристика $f(\omega_r)$, позволяет сформировать классы областей изображения радиусом r_i^{Sem} , отражающими однородные свойства объекта (2а).

Вычисление площади контуров сегментированных областей выполняется по (3а).

Вычисление частоты контуров:

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

где: $P(\omega) = \text{Re } f(j\omega)$;

$Q(\omega) = \text{Im } f(j\omega) = f(\omega) \sin \varphi(\omega)$;

$\varphi(\omega) = \arctg \frac{P(\omega)}{Q(\omega)}$.

На Рис. 3 представлен результат сегментации области изображения, позволяющей анализировать динамику по классам кислотности слабокислой, близко к нейтральной и нейтральной почвенной среды участка сельскохозяйственных земель п. Степняки.

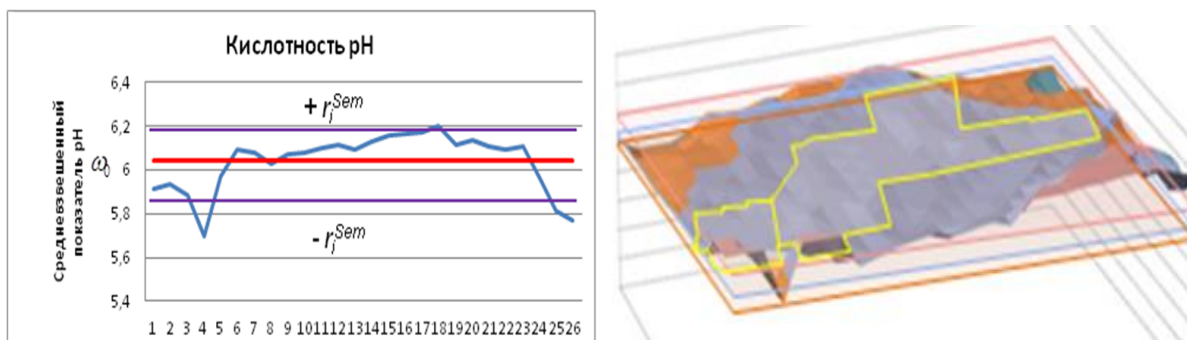


Рис. 3. Сегментация частотных свойств изображения и оценка однородности классов сегментированных участков

Центральная, сегментированная область, покрывает весь исследуемый район земель сельскохозяйственного назначения п. Степняки. Эта область относится к классу «близко к нейтральной» почвенной среде (5,9 рН), относительно севернее расположенных более кислых и южнее нейтральных почв.

Дальнейший анализ центрального участка относительно плотности частотной характеристики изображения $f(\omega_r)$, позволяет прогнозировать, что северная часть участка с относительно высоким показателем частоты тяготеет к понижению кислотности среды до слабокислой почвы 5,6 рН, а соответственно южная часть к повышению кислотности до нейтральной среды 6,2 рН (как показано на рис.3 справа). Это также подтверждает оценка плотности частотного показателя изображения $f(\omega_r)$, центрального участка (рис.3 слева). В целом прогноз на основе анализа динамики частоты изображения показывает относительно высокую качественную однородность центрального участка, устойчивость участка к сохранению «близко к нейтральной» реакции среды служит хорошим дополнением к стандартизированным методикам анализа состояния почв, земель сельскохозяйственного назначения.

Заключение. Предлагаемая математическая модель гармонизирована с принятыми методами анализа основных агрохимических показателей [22-26] и значительно расширяет возможности для более точного анализа, интерпретации и прогнозирования агрофизической характеристики состояния почв.

Математическая модель сегментации, основанная на более сложных отношениях «соседства» определяемая радиусом однородности r_i^{Sem} частотной характеристики области изображения $f(\omega_r)$, позволяет в детерминированных условиях выполнить разбиение характеристики, на N классов, для которых $Lp(S_i^{Sem})$ принимает истинные значения, удовлетворяющие цели.

В этом случае сегментация объекта является комбинированной стратегией:

$$\text{Seg: } f(\omega_r) \xleftrightarrow{\frac{Lp(S_i^{Sem})}{r_i^{Sem}}} n_i^{(Sem.)},$$

где $r_i^{(Sem.)} \in N$ – семантическое отношение (имя объекта), определенное при анализе частотной однородности границ сегментированной области.

Математический подход к сегментации динамики изменения агрофизических показателей почв сельскохозяйственного назначения, показал свою эффективность в

управлении качеством состояния естественного энергетического состояния на контрольных участках. Предполагается, что опыт будет применен на всей площади зоны ответственности «САС «Солянская» (912,4 тыс. га).

В перспективе ожидается создание «Цифрового атласа» отражающего динамику изменения основных агрохимических показателей почв, в рамках Проекта «Стратегии развития агропромышленного комплекса Красноярского края (5 млн. га), на период до 2030 года (<http://www.krskstate.ru/2030/plan>).

Внедрение и распространение инновационных практик и технологий, позволит использовать новые возможности контроля и управления качеством естественного энергетического потенциала Восточно-Сибирской территории (23 млн. га).

Список литературы

1. D.A. Denisov. Computer methods of video information analysis: monograph. Krasnoyarsk State Technical University, Krasnoyarsk, 192 p. 1993.
2. P.A. Chochia. Pyramid algorithm of image segmentation. In Information Processes. 1 (10), pages 23-35. Bauman MSTU Publishing House. 2010.
3. S.V. Belim, S.B. Larionov. Segmentation of images on the basis of algorithm of communities separation on the graph // Mathematical structures and modeling 2016. № 3(39). P. 74–85
4. G. Khanykov Classification of image segmentation algorithms // The news universities. Instrumentation. 2018. Т. 61, № 11. P. 978—987.
5. Avdyushkina L S., Two-stage method nature texture classification // Процессы управления и устойчивость. 2016 3(1): P. 332-336
6. D.N. Gonçalves, V.A. de Moares Weber, J.G. Bragato Pistori, R.d. Costa Gomes, A.V. de Araujo, M.F. Pereira, W.N. Gonçalves, H. Pistori, Carcass image segmentation using CNN-based methods, Information Processing in Agriculture (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.11.004>
7. R. Srikanth and K. Bikshalu, Multilevel thresholding image segmentation based on energy curve with harmony Search Algorithm, Ain Shams Engineering Journal, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.003>
8. Essam H. Houssein, Bahaa El-dinHelmy, Diego Oliva, Ahmed A.Elngar, Hassan Shaban «A novel Black Widow Optimization algorithm for multilevel thresholding image segmentation» Expert Systems with Applications Available online 4 November 2020, 114159
9. Prakash Purswani, Zuleima T. Karpyn, Khaled Enab, YuanXue, XiaoleiHuang «Evaluation of image segmentation techniques for image-based rock property estimation» Journal of Petroleum Science and Engineering Volume 195, December 2020, 107890
10. TaoWang. ZexuanJi JianYang QuansenSun XiaoboShen ZhenwenRen QiGe «Label Group Diffusion for Image and Image Pair Segmentation» Pattern Recognition Available online 17 December 2020, 107789, 107789
11. Brian L. DeCost, Elizabeth A. Holm A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data // Computational Materials Science 110. 2015. P. 126 –133.
12. Khodaskar, S. Ladhake Semantic Image Analysis for Intelligent Image Retrieval International Conference on Intelligent // Computing, Communication & Convergence (ICCC-2014) Institute of Management and Technology, India 2014, P. 193 – 197.
13. S. Banerjee, S. K. Ghosh, S. Datta, S. K. Saha Segmentation of dual phase steel micrograph: An automated approach // Measurement 2013. P. 2435 – 2440.
14. T.V. Avdyukova, S.A. Hrutsky. Fertility State of Arable Lands in the East Zone of Krasnoyarsk Krai // Agriculture. 2017. № 1. С. 25-29.
15. Миловских Т. А., Вяткина Т. А., Смирнова Т. Н. Плодородие сельскохозяйственных угодий в условиях Сахалинской области // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 4. С. 53–56. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10413.
16. V.V. Chuprova, A.A. Belousov, E.N. Belousova, Yu.V. Gorbunova Evaluation of agroecological condition of the soils involved in the development of sand and gravel quarries of Kansk district of Krasnoyarsk region // Journal of Siberian Federal University. Agronomic 2019. № 3, 16-21.

17. Танделов, Ю.П. Плодородие кислых почв земледельческой территории Красноярского края / Ю.П.Танделов. – Красноярск, 2012. – 161 с.
18. Dmitry A. Perfil'ev Segmentation Object Strategy on Digital Image // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2018, 11(2), 213-220.
19. D.A. Perfilyev. Segmentation of the object in digital image. In Regional problems of remote sensing of the Earth. Materials of the International Scientific Conference. Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 366 pages, ISBN 978-5-7638-3109-2. 2018.
20. D.A. Perfilyev. Strategy segmentation of the object in digital image. In Regional problems of remote sensing of the Earth. Materials of the International Scientific Conference. Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 368 pages, ISBN 978-5-7638-4176-3. 2019.
21. D.A. Perfilyev. Segmentation frequency of heterogeneity image. In Regional problems of remote sensing of the Earth. Materials of the International Scientific Conference. Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 328 pages, ISBN 978-5-7638-4389-7. 2020.
22. ГОСТ 26269-91, Soils. General requirements for the fulfilment of analyses Изд. М.: Standards publishing house, 1992.
23. ГОСТ 26204-91, Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by Chiricov method modified by CINAО. Изд. М.: Standards publishing house, 1992.
24. ГОСТ 26205-91, Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by Machigin method modified by CINAО М.: Standards publishing house, 1992.
25. ГОСТ 26207-91, Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by Kirsanov method modified by CINAО М.: Standards publishing house, 1992.
26. ГОСТ 26483-85, Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH by CINAО method М.: Standards publishing house, 1985.

D. A. Perfilyev¹, T. V. Avdyukova²

¹ Siberian Federal University, Institute of space information technology,
660074, Krasnoyarsk, Kirenskogo St. 26, KLF e-mail: perfilyev7775@yandex.ru

² Director Station of Agrochemical Service “Solyanskaya”, ul. Pervomaiskaya, 19, s. Novaya
Solyanka, Krasnoyarskii krai, 663953, Russian Federation e-mail: agrohim_24_3@mail.ru

IMAGE SEGMENTATION OF ACIDITY OF AGRICULTURAL LANDS IN EASTERN SIBERIA

The paper proposes a mathematical model for segmentation of the acidity dynamics of agricultural lands in Eastern Siberia. The segmentation rule is based on the analysis of the image frequency characteristic, which makes it possible to predict the change in the acidity of the segmented areas.

Keywords: image segmentation, segmentation rule, segmentation of the dynamics of agrochemical parameters.

О. В. Перфильева¹, А. С. Рыбкин², С. М. Сидоренков³

¹ Кандидат технических наук, Акционерное общество «Российские космические системы», Москва, Россия, e-mail: contact@spacecorp.ru

² Акционерное общество «Российские космические системы», Москва, Россия, e-mail: contact@spacecorp.ru

³ Кандидат сельскохозяйственных наук, Федеральное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», Пушкино, Россия, e-mail: lesvn@yandex.ru

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ
ПО КОМПЛЕКСНОЙ ДОСТУПНОСТИ ЛЕСОВ
(НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ)**

В работе отражен инновационный подход в области пространственного изучения территорий по доступности лесов, который определен на основе анализа результатов значительного количества проведенных исследований и обобщения экспериментального материала.

Ключевые слова: лесное хозяйство; дистанционное зондирование Земли; ГИС; использование лесов; Канопус-В; Ресурс-П; Sentinel-2.

Доступность лесов определяется как комплексный показатель, который включает транспортную, экономическую и лесоводственную доступности [1-5].

Учитывая современные тенденции транспортной инфраструктуры на территории Тверской области, основными способами транспортировки лесной продукции является автомобильный транспорт: им осуществляется значительная доля перевозок лесной продукции по лесным дорогам. В историческом аспекте понятие "лесные дороги" включает в себя транспортные пути, находящиеся на лесной территории, являющиеся частью транспортной инфраструктуры предприятий по переработки древесины и другой лесной продукции.

Результаты проведенных исследований по анализу данных спутниковой съемки показывают, что, несмотря на четко установленные в законодательном плане требования к различным категориям лесных дорог, большая часть заготовки древесины осуществляется с использованием лежневок (дорог из настланных бревен) и зимников, что приводит к заготовке древесины, в основном, в зимнее время года. Из-за сложившейся ситуации оценить объемы использования лесов без учета плотности дорожной сети сезонного действия, представленной зимниками и лежневками, невозможно. В этой связи, использование данных ДЗЗ является оптимальным способом её актуализации.

При проведении исследований задача актуализации сети дорог была решена с использованием данных оптической съемки с отечественных космических аппаратов типа «Канопус-В», «Ресурс-П». В случае отсутствия российских данных ДЗЗ на отдельные территории использовались данные ДЗЗ из открытых источников («Landsat-8», «Sentinel-2») (рис. 1).

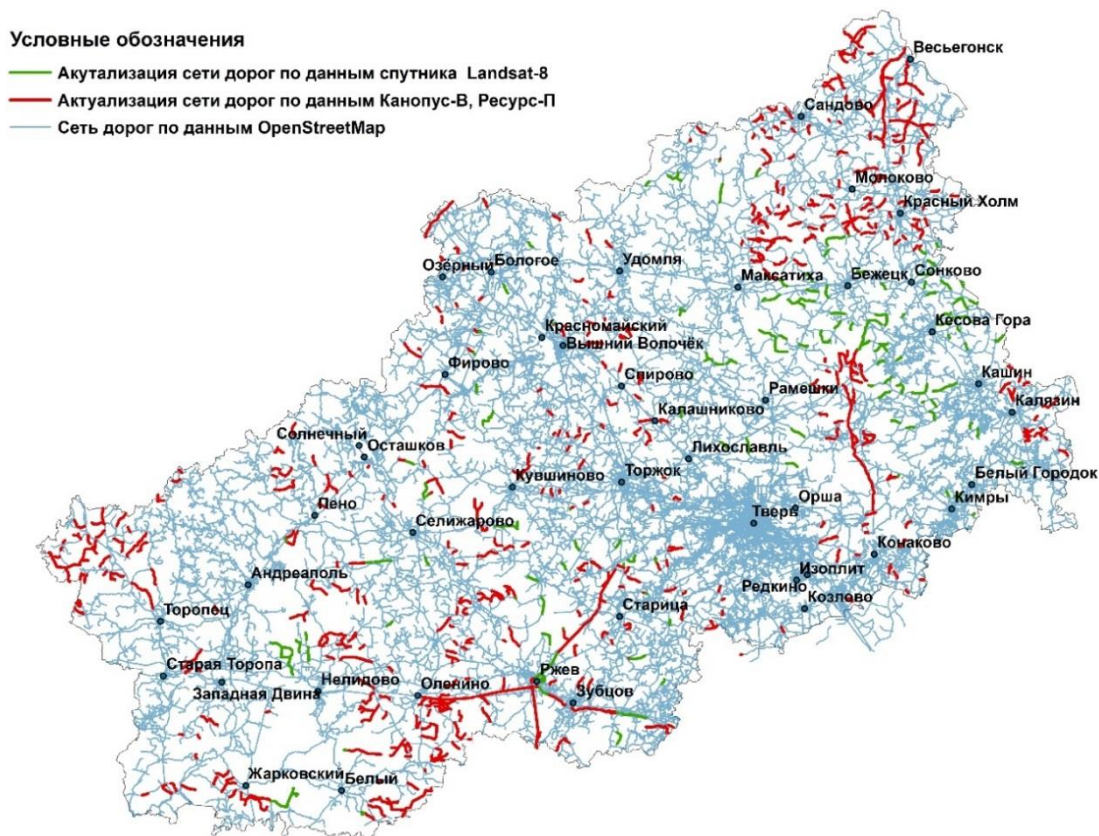


Рис. 1. Актуализация сети дорог по данным спутников Канопус-В, Ресурс-П, Landsat-8

Оценка доступности лесов осуществлялась с учетом анализа комплекса факторов: плотности дорожной сети, продуктивности лесов, породного разнообразия насаждений, продуктивности почв, проходимости дорог в зависимости от типа почвогрунтов, рельефа местности, гидрологической ситуации, планового развития транспортной инфраструктуры.

Исследования показали, что большая часть территории Тверской области характеризуется высокой продуктивностью лесов. Уровень залегания грунтовых вод позволяет использовать сеть грунтовых дорог для заготовки древесины и выполнения всего спектра лесохозяйственных мероприятий. Исключение составляют дороги на суглинистых почвах, где их пропускная способность зависит от погодных условий.

Результаты исследований комплексной доступности лесов позволили осуществить зонирование пилотной территории Тверской области по режимам ведения лесного хозяйства, в том числе с учетом сезонной доступности лесов (рис.2).

На участках высшего уровня доступности возможно установление режима высокоинтенсивного использования лесов на основе применения многоцелевых систем лесоводственных мероприятий. При незначительной доступности лесов и наличии большого количества грунтовых дорог, возможно, применение только традиционных систем лесоводственных мероприятий умеренной интенсивности. При низкой доступности лесов возможность ведения лесного хозяйства ограничена, преобладает консервационно-восстановительный режим сохранения и восстановления нарушенных лесов с применением мероприятий по охране, защите лесов и мониторинга их состояния.

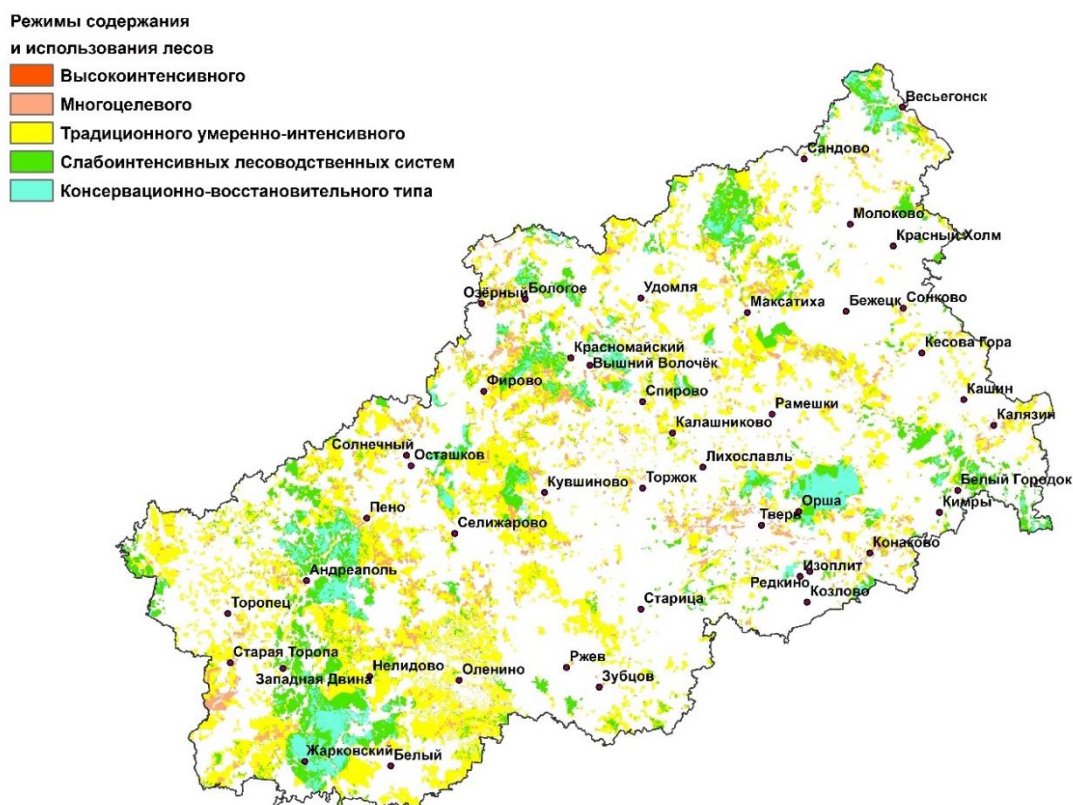


Рис. 2. Зонирование территории Тверской области по режимам использования и содержания лесов в зависимости от комплексной доступности

Анализ результатов исследований по режимам использования лесов показывает, что недостаточно развитая сеть дорог не позволяет на значительной части территории реализовать системы высокоинтенсивного и интенсивного ведения лесного хозяйства. Преобладает традиционная система ведения хозяйства, ориентированная на применение различных типов рубок в спелых и перестойных насаждениях с проведением, в последующем, мероприятий, направленных на естественное восстановление лесов.

Как представляется, использование рассмотренного в статье подхода позволяет выявлять проблемные районы, актуализировать информацию о доступности территорий и на ее основе осуществлять планирование лесохозяйственных и лесовосстановительных работ.

Список литературы

1. Мартынюк А.А., Сидоренков В.М., Дороженкова Э.В., Сидоренкова Е.М., Захаров Ю. Г., Зонирование территории российской федерации по интенсивности лесного хозяйства и лесопользования, Сибирский лесной журнал, №1, 2016 г., с. 3-12
2. Мохирев А.П., Позднякова М.О. Максимум запасов – минимум эффекта? Доступность лесных ресурсов России с точки зрения факторного анализа / Современные научные исследования и разработки №6(6) / 2016 г.
3. Мохирев А.П., Позднякова М.О. Теоретические и методические основы доступности древесных ресурсов / Фундаментальные исследования №11-1 / 2018 г.
4. Мохирев А.П., Позднякова М.О. Куницкая О.А., Григорьев И.В., Факторы доступности древесных ресурсов: анализ влияния на ключевые критерии / Системы. Методы. Технологии №1 (37) / 2018 г.

5. Ефремов М.А. Транспортная доступность лесов как основной фактор уровня использования лесных ресурсов / Вестник МАРГТУ. №1, 2009 г.

O. V. Perfil'eva¹, A. S. Rybkin², S. M. Sidorenkov³

¹ Candidate of Technical Sciences, Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russia, e-mail: contact@spacecorp.ru

² Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russia, e-mail: contact@spacecorp.ru

³ Candidate of Agricultural Sciences, Federal Budgetary Institution All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization *, Pushkino, Russia, e-mail: lesvn@yandex.ru

METHODOLOGICAL ASPECTS OF TERRITORY ZONING BY INTEGRATED FOREST ACCESSIBILITY (ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORY OF TVER REGION)

The paper reflects an innovative approach in the field of spatial study of territories according to the availability of forests, which is determined on the basis of an analysis of the results of a significant number of studies and generalization of experimental material.

Keywords: forestry; remote sensing of the Earth; GIS; use of forests; Kanopus-B; Resource-P; Sentinel-2.

Л. Г. Свердлик, С. А. Имашев

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ КОГЕРЕНТНЫХ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ

Представлены результаты анализа ретроспективных данных спутниковых измерений температуры в верхней тропосфере / нижней стратосфере над эпицентральной областью разрушительного землетрясения магнитудой $M=6.7$, произошедшего на территории Тянь-Шаня. Установлена хорошо выраженная временная и пространственная согласованность возмущений температуры и сейсмической активности. Использование вейвлет-анализа позволило выявить особенности временной и спектральной когерентности вариаций температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы перед сейсмическим событием $M=6.7$.

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

Данные спутникового дистанционного зондирования играют важную роль в исследованиях динамических процессов, протекающих в различных слоях атмосферы, и возмущений, являющихся результатом взаимодействия между слоями атмосферы и литосферой в периоды сейсмической активности [1, 2]. В качестве параметра, изменения которого являлись признаком происходящих в атмосфере возмущений, использовалась температура, что связано с ее ключевой ролью в формировании условий протекания большинства процессов и вертикальной структуры атмосферы. При том, что изменения температуры носят сложный характер, наиболее чувствительными к воздействию различного рода возмущающих факторов и активности атмосферных волн являются области, в которых происходит смена знака вертикального градиента температуры [2]. Наше исследование построено на анализе изменения во времени температуры на изобарических уровнях в верхней тропосфере / нижней стратосфере (*UTLS*). Характерные особенности изменения температуры в этих разделенных тропопаузой областях атмосферы позволяют исследовать эффекты временной, пространственной и частотной когерентности, предшествующие крупным землетрясениям. Одним из таких событий является разрушительное Нуринское землетрясение с магнитудой $M=6.7$ (39.53°N ; 73.82°E), зарегистрированное 05 октября 2008 г. в 15:52:50 (UTC) на глубине ~ 27 км [3]. Всего в течение суток произошло 50 афтершоков с магнитудами от 3.0 до 5.9 (рис. 1).

Температурные данные системы реанализа *MERRA-2* [4], основанные на спутниковых наблюдениях, прошедших обработку в глобальной модели, были восстановлены над эпицентральной зоной землетрясения на стандартных изобарических уровнях от 450 до 70 hPa с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ и дискретизацией по времени $\Delta t=3\text{h}$.

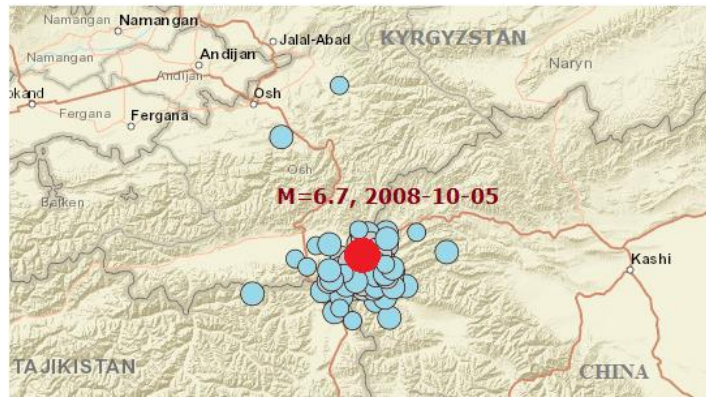


Рис. 1. Афтершоковое поле землетрясения $M=6.7$ (05.10.2008 г.)

На рис. 2а показаны изменения температуры $T(t)$ на уровнях 200 и 100 hPa в сентябре – октябре 2008 г. Результаты диагностирования аномалий температуры с применением алгоритма, описанного в [2, 5, 6], показали хорошо выраженный всплеск в значениях параметра $D_{\delta T} = 2.2$ за 2 суток до сейсмического события $M=6.7$ (рис. 2с), что позволяет предполагать связь с периодом подготовки землетрясения (рис. 2д).

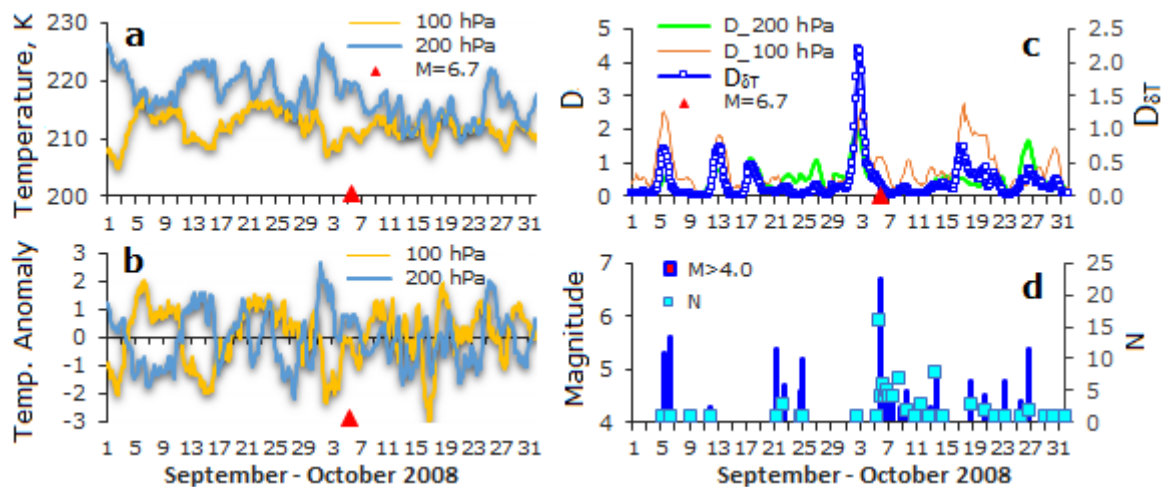


Рис. 2. Вариации температуры (а) и нормированных аномалий на уровнях 200 и 100 hPa (б), изменения интегрального параметра $D_{\delta T}$ (с) и последовательность магнитуд и количества землетрясений $M \geq 4.0$ (д) в сентябре-октябре 2008 г.

Вейвлет-спектрограммы временных рядов температуры на уровнях 200 и 100 hPa (рис. 3), построенные для диапазона периодов от 0.125 до 32 суток, демонстрируют изменение их частотных свойств в период с 15 августа по 15 ноября 2008 г. Особенностью представленных спектрограмм являются хорошо выраженные интенсивные колебания в диапазоне периодов 8–12 суток в начале сентября (100 hPa) и конце октября (200 hPa). При том, что перед сейсмическим событием в динамике спектра вариаций отмечались ~ 4 –5 суточные периодичности, одновременно проявляющиеся на обоих изобарических уровнях.

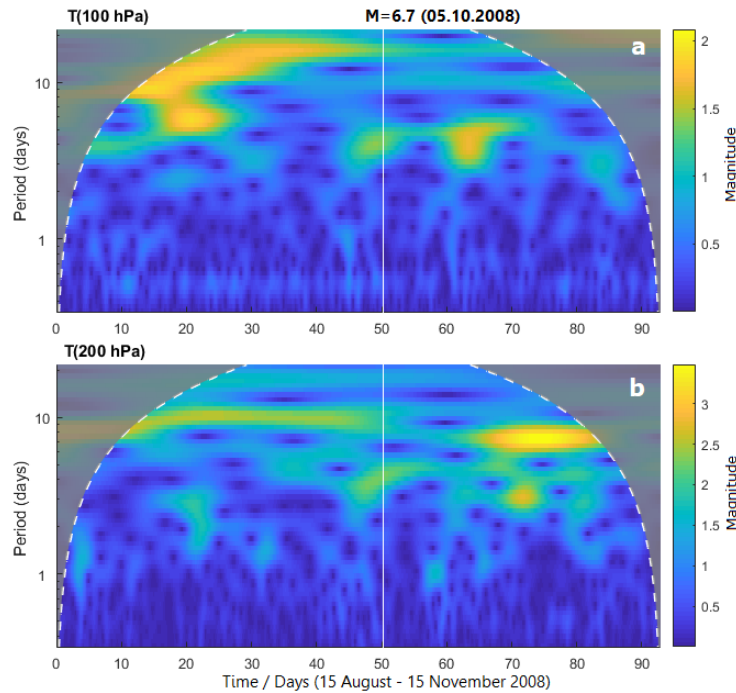


Рис. 3. Динамика спектров вариаций температуры на уровнях 100 hPa (a) и 200 hPa (b) (с 15 августа по 15 ноября 2008 г.). Вертикальная линия – момент землетрясения M=6.7

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).

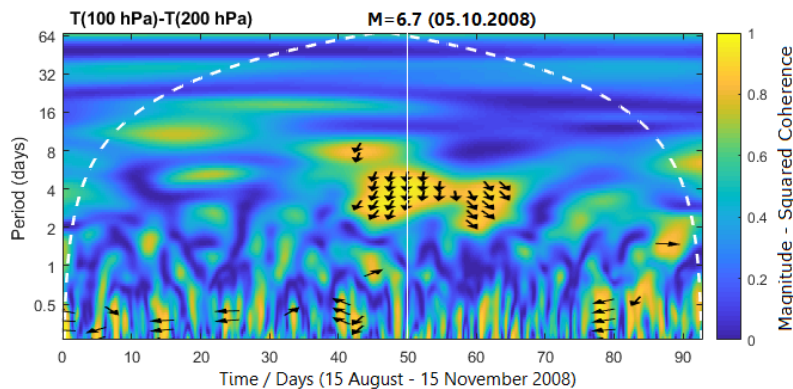


Рис. 4. Эволюция квадрата когерентности между коэффициентами вейвлет-преобразования спектров вариаций температуры временных рядов на изобарических уровнях 200 и 100 hPa (с 15 августа по 15 ноября 2008 г.)

Представленная диаграмма изменения во времени квадрата когерентности между коэффициентами вейвлет-преобразования спектров вариаций температуры двух временных рядов на изобарических уровнях 200 и 100 hPa характеризует корреляции, которые существуют между отдельными спектральными компонентами. Как видно, эффект сильной когерентности вариаций проявлялся в диапазоне периодов 3–6 суток, начиная с 01 октября 2008 г. Направление стрелок указывает на наличие фазового сдвига между колебаниями. Выделенная частотно-временная аномалия

совпадает с полученными экспериментальными оценками, используемым в расчетах интегральных показателей [5, 6].

Таким образом, результаты анализа данных спутникового дистанционного зондирования показали, что над эпицентральной областью сильного землетрясения с магнитудой $M=6.7$ наблюдались аномальные изменения температуры в области тропопаузы. Исследование динамики периодичностей выявило эффекты когерентного поведения температуры в *UTLS* в интервале периодов от 3 до 6 суток, предваряющие активизацию сейсмического режима на территории Тянь-Шаня.

Авторы выражают благодарность сотрудникам NASA GES-DISC за свободный доступ к данным.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции РАН в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9).

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. V. 18. № 4. P. 1013–1036.
2. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 19–26.
3. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
4. URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>
5. Sverdlik L., Imashev S. Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan // MAUSAM. 2020. 71. 3. 481–490.
6. Sverdlik L., Imashev S. Atmospheric temperature coherent variations effects, preceding strong earthquakes // E3S Web of Conferences. 2020. 223. 03015. RPERS 2020.

L. G. Sverdlik, S. A. Imashev

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

STUDY OF PRE-SEISMIC EFFECTS OF ATMOSPHERIC TEMPERATURE COHERENT VARIATIONS

The paper presents results of analysis of retrospective data of satellite measurements in the upper troposphere / lower stratosphere above the epicentral area of the destructive earthquake of $M=6.7$ occurred in the territory of Tien-Shan. We **established** a well-defined temporal and spatial coherence between temperature perturbations and seismic activities. Use of wavelet-analysis allowed to identify specifics of temporal and spectral coherence of temperature variations in the zone of troposphere and stratosphere separation before the seismic event of $M=6.7$.

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

Л. Г. Свердлик

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО КРИТЕРИЯ STA/LTA ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ

Представлен новый подход к анализу пространственно-временных вариаций температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS), основанный на использовании модифицированного критерия STA/LTA и предназначенный для выделения и идентификации возмущений. Приведены результаты ретроспективного анализа спутниковых временных рядов температуры над эпицентральной областью разрушительного Нуринского землетрясения магнитудой $M=6.7$, произошедшего 05 октября 2008 г. в сейсмически активном регионе Тянь-Шаня. Установлено, что мезомасштабная аномалия температуры в UTLS наблюдалась с 01 по 03 октября 2008 г. Пространственные и временные распределения возмущения температуры дают основание предполагать вероятную связь с подготовкой к сейсмическому событию.

Ключевые слова: землетрясение, спутниковые данные, температура, верхняя тропосфера, нижняя стратосфера, аномалии, STA, LTA, дисперсия.

Одним из перспективных способов идентификации аномалий в данных дистанционного зондирования может являться представленный в настоящей статье алгоритм, основанный на использовании известного критерия STA/LTA (*Short Time Averaging / Long Time Averaging*), который получил широкое распространение для выделения импульсных колебаний, главным образом, для распознавания прихода сейсмической волны и регистрации микросейсмических событий [1]. Данный критерий в несколько измененном виде может быть применен к спутниковым измерениям температуры. Присутствующие в изменениях температуры атмосферы возмущения различного природного происхождения (атмосферные процессы, солнечная активность, землетрясения и пр.), характеризующиеся различным спектральным составом с наличием нескольких периодичностей, интенсивность которых изменяется со временем, предоставляют возможность идентифицировать аномальные вариации, связанные с подготовкой сильных сейсмических событий [2, 3].

В настоящем исследовании представлены результаты выделения и идентификации аномальных возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS), основанные на вычислении критерия STA/LTA и связанные с сейсмической активностью.

Тестирования алгоритма проведено на примере разрушительного Нуринского землетрясения с магнитудой $M=6.7$ (39.52° с.ш.; 73.77° в.д.), которое произошло в южной части Кыргызстана 05 октября 2008 года (15:52:49 UT) на глубине примерно 27.5 км [4]. Сотрясениями была охвачена обширная территория, включающая приграничные районы Кыргызстана, Таджикистана и Китая.

Анализируемый набор вариаций температуры атмосферы на 10 стандартных изобарических уровнях (p_k) от 500 до 70 гПа (MERRA-2) охватывал высотный диапазон от верхней тропосферы до нижней стратосферы (UTLS). Данные спутниковых наблюдений [5] были восстановлены над участком, ограниченным координатами 35–50° с.ш. и 60–90° в.д. для временного периода с января по декабрь 2008 г. Дискретизация температурных данных $T(t)$ по времени составляла $\Delta t = 3$ часа с пространственным разрешением: $0.5^\circ \times 0.625^\circ$.

Рисунок 1 иллюстрирует процесс детектирования предсейсмических возмущений температуры в верхней тропосфере (200 гПа) и нижней стратосфере (100 гПа) (рис. 1а). Для выделения наиболее устойчивых в пространстве и во времени аномальных вариаций температуры использовались результаты сравнения дисперсий предыдущих значений $T(t_i)$ в коротком и длинном окне (рис. 1б, 1в) на двух уровнях UTLS. При обнаружении возмущения $T(t)$ происходит значительное увеличение отношения STA/LTA (рис. 1г). По результатам вычисления δT выявлялись окна, в которых этот параметр превышал пороговое значение $THR=3.0$ (рис. 1д). Как видно, наиболее интенсивные возмущения температуры наблюдались за 2–3 дня до землетрясения $M=6.7$ (рис. 1е). Во все другие моменты времени исследуемого периода такого эффекта не наблюдалось.

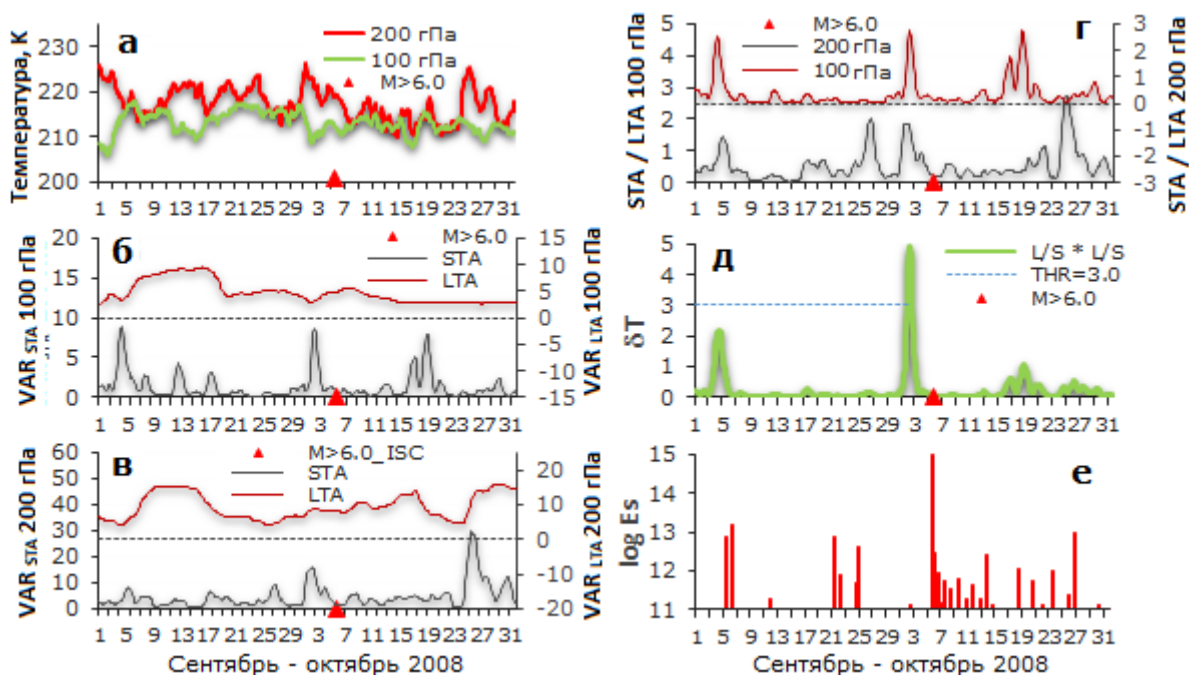


Рис. 1. Исходные временные ряды температуры (а); скользящие дисперсии VAR_{STA} и VAR_{LTA} на уровнях 100 гПа (б) и 200 гПа (в); отношения дисперсий STA/LTA (г) и их произведение (δT) (д) (маркерами отмечено землетрясение $M=6,7$); распределение логарифма сейсмической энергии ($\log E_s$) (е) с 01 сентября по 31 октября 2008 г.

Основываясь на результатах проведенных расчетов была восстановлена трехмерная матрица δT_{CORR} , которая использовалась для исследования динамики распределения аномальных возмущений температуры по меридиональному и широтному

направлениям. Два поперечных сечения изменчивости δT_{CORR} в период с 29 сентября по 05 октября 2008 г., показанные на рис. 2а и рис. 2б, позволили оценить местоположение и размеры аномальных областей, их эволюцию во времени, а также определить, когда значения δT_{CORR} были наибольшими.

Из представленных рисунков следует, что возмущение UTLS наблюдалось в период с 01 по 03 октября 2008 г. Аномальная область начала формироваться 01 октября в 09:00 UT западнее эпицентра и достигла максимума 02 октября 2008 г. за 3 дня до землетрясения.

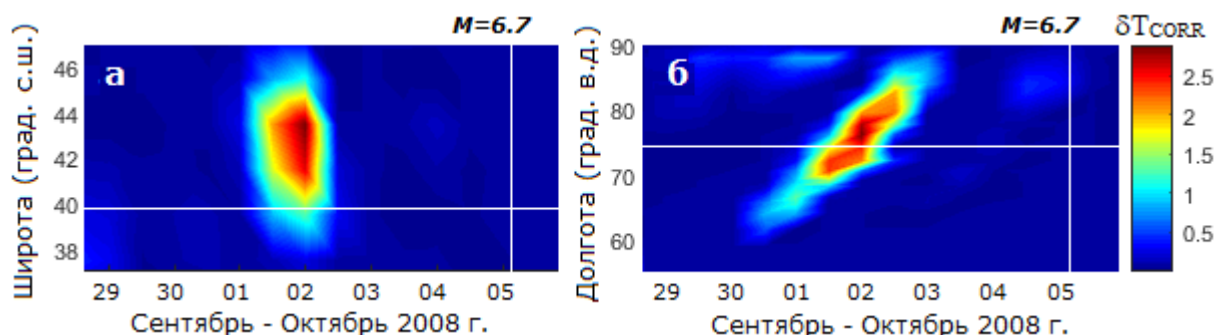


Рис. 2. Распределения параметра δT_{CORR} по широте (а) и долготе (б) с 29 сентября по 05 октября 2008 г. Вертикальные линии указывают момент землетрясения (2008-10-05; 15:52:49 UT). Горизонтальные линии соответствуют координатам эпицентра землетрясения. Красным цветом выделены области, в которых $\delta T_{CORR} \geq THR \geq 2.0$

Рис. 3а и 3б показывают, что мезомасштабная область аномально высоких значений δT_{CORR} располагалась в пределах координат 40–44° с.ш. и 72–80° в.д. Максимум температурного возмущения, наблюдаемого 02 октября 2008 г., был смещен на ~2–3° в северо-западном направлении (в 00:00 UT) и на ~2–4° в северо-восточном направлении (в 12:00 UT) относительно эпицентра землетрясения. Приведенные результаты подтверждают вероятную связь между сейсмической активностью и возмущением температуры в UTLS, устойчиво наблюдающимся в течение 36 часов вблизи эпицентра землетрясения $M=6.7$.

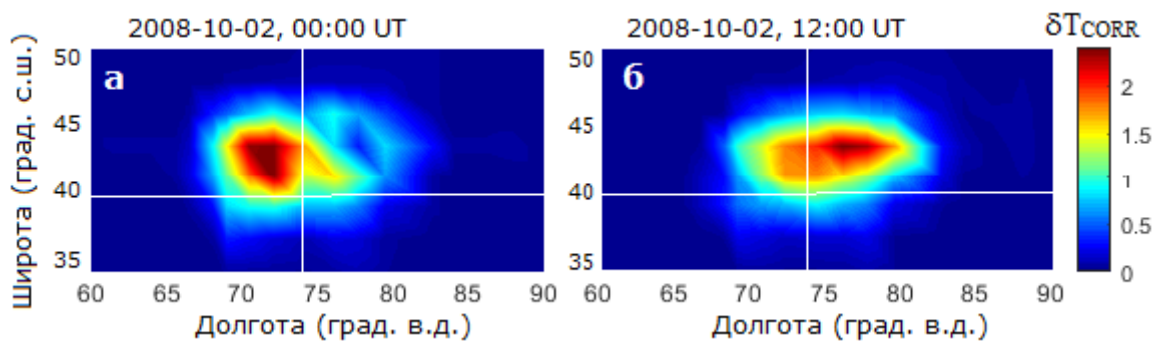


Рис. 3. Эволюция пространственного распределения параметра δT_{CORR} 02 октября 2008 г. в 00:00 UT (а) и 12:00 UT (б). Горизонтальные и вертикальные линии соответствуют координатам эпицентра землетрясения $M=6.7$ (39.52° с.ш.; 73.77° в.д.)

Таким образом, представленный алгоритм, основанный на использовании модифицированного критерия STA/LTA, обладает высокой эффективностью выделения возмущений температуры в UTLS, связанных с крупными землетрясениями. Результаты тестирования алгоритма отражают динамику области аномальных изменений температуры, четко связанную как по времени, так и в пространстве с сейсмическим процессом и с периодом подготовки землетрясения $M=6.7$.

Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC за свободный доступ к данным.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФБГУН Научной станции РАН в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9).

Список литературы

1. Sabbione J.I., Velis D.R. A robust method for microseismic event detection based on automatic phase pickers // *Journal of Applied Geophysics*. 2013. Vol. 99. P. 42–50.
2. Сverdlik Л.Г., Имашев С.А. О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы // *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3. № 1. С. 19–26.
3. Sverdlik L., Imashev S. Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan // *MAUSAM*. 2020. 71. 3. 481–490.
4. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>
5. URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>

L. G. Sverdlik

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

USE OF MODIFIED STA/LTA CRITERION FOR IDENTIFICATION OF PRE-SEISMIC ATMOSPHERIC PERTURBATIONS

This paper presents a new approach to analysis of spatial-temporal temperature changes in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS), based on use of modified STA/LTA criterion and destined for selection and identification of perturbations. The paper presents results of retrospective analysis of satellite temperature time series above the epicentral area of the destructive Nura earthquake of $M=6.7$, occurred in a seismically active Tien-Shan region on October 5, 2008. It has been established that an explicit mesoscale temperature anomaly in UTLS was observed during the period from October 1 to 3, 2008. Temporal and spatial distributions of the temperature perturbation suggest probable association with seismic event preparation.

Keywords: earthquake, satellite measurement, temperature, upper troposphere, lower stratosphere, anomaly, STA, LTA, variance.

А. В. Сенин, Ю. А. Маглинец, В. И. Лосев

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: shurik.19.12.1996@mail.ru; maglinets@mail.ru; vovalosev98@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В статье обсуждается задача автоматизации геологического картирования с использованием данных ДЗЗ. Анализируемая территория – Ак-Сукское медно-порфировое месторождение. Исследование проведено с использованием архивных данных программы ASTER за период с 2003 по 2007 г. Применены метод спектрального угла, метод главных компонент и метод спектральных индексов. В качестве основного инструмента был выбран метод спектрального угла, показавший наиболее высокую корреляцию полученных результатов с данными наземных исследований. Построена векторная карта участков месторождения, спектральные характеристики которых свидетельствуют о высокой вероятности наличия полезных ископаемых.

Ключевые слова: ASTER, метод спектрального угла, геологическое картирование, ДЗЗ.

Задача дистанционного обнаружения залежей полезных ископаемых является сложно алгоритмизуемой задачей, так как, в отличие от классической постановки задачи обнаружения объектов на космическом снимке, в рассматриваемом случае мы имеем дело с поиском объектов, которые на снимке непосредственно не представлены. Поэтому в решении такого рода задач приходится работать с косвенными признаками и сопутствующей геологической информацией. Для медно-порфировых месторождений, о которых идёт речь, в качестве таких признаков выступают минералы-индикаторы. Соответственно, исследователь не может уверенно утверждать о том, что интересующие пользователя объекты присутствуют на снимке, но может выдвинуть гипотезу о наличии тех или иных объектов, с определённой долей вероятности. Данные гипотезы, подтверждённые экспериментально на части территории месторождения, могут быть экстраполированы на её другие области с аналогичными характеристиками. Это позволяет снизить объёмы полевых работ и, как следствие – затраты на проведение геологоразведческих работ.

Территория исследований. Ак-Сугское медно-порфировое месторождение [1] имеет площадь 1300 квадратных километров и находится в Тоджинском районе республики Тыва. Относится к высокогорным районам с высотными отметками от 660 до 2891 метров. Зонально распределен растительный покров. Помимо обширных зон растительности наблюдаются и зоны обнаженности горных пород. Территория хорошо обнажена и имеет эрозионно-денудационный тип рельефа, а характеристика метасоматической зональности свидетельствует в целом о соответствии Ак-Суга модели типичного медно-порфирового месторождения. На территории широко развита сеть несудоходных рек и озёр ледникового происхождения. Согласно [2], в качестве зон, сигнализирующих о возможном наличии полезных ископаемых определяются

зоны: серицитизации (мусковитизации и тоналитизации), окварцевания, хлоритизации и эпидотизации, каолинитизации, а также зоны распространения кислых пород.

Территория исследования с привязкой по координатам в системе WGS-84, с наложением на слой *Google Maps* показана на рисунке 1.

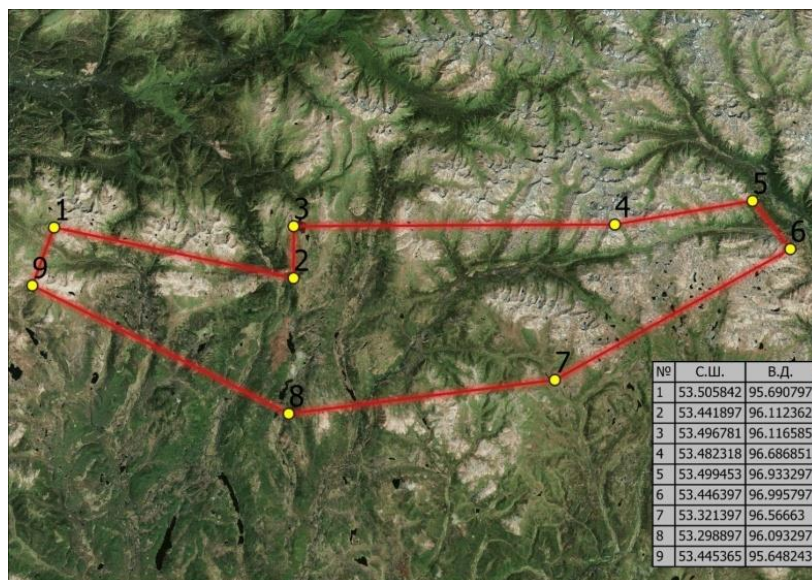


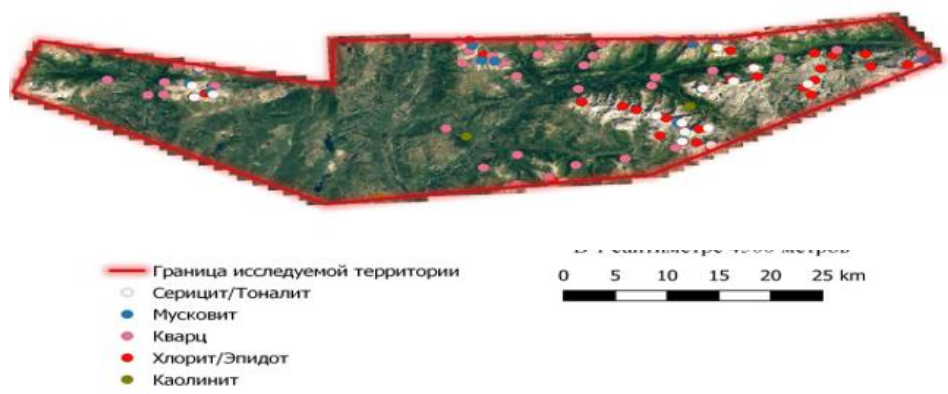
Рис. 1. Территория исследований

Исходные данные и методы исследований. Отражательные характеристики искомым минералов-индикаторов определили выбор в качестве релевантного источника информации данные съёмочной системы ASTER и, в меньшей степени – космической программы Sentinel 2. На территорию исследования были получены сцены ASTER с датами съёмки 21.07.2007, 21.09.2003 и Sentinel-2 от 11.08.2018. Для сцен ASTER выполнена пространственная коррекция, сформировано композитное изображение. С применением индексных изображений сформированы слои растительных и водных объектов, после вычитания которых из анализируемых сцен были сформированы зоны интереса.

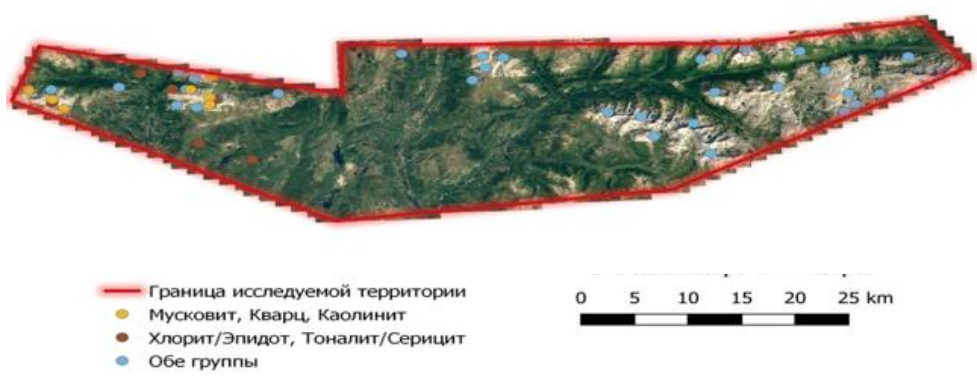
Как показал обзор литературы, при решении аналогичных задач хорошо себя зарекомендовали следующие методы. 1. Метод спектрального угла, основанный на определении сходства спектральных характеристик подстилающей поверхности с эталонными спектрами [3]. В работах [4-5] указанный метод был успешно применён в задачах картирования медно-порфировых месторождений, что подтверждено результатами полевых работ. 2. Метод главных компонент. Определяются связи между значениями нагрузок собственных векторов тех или иных каналов и группами минералов [6-8], что также позволяет использовать данный метод в решении рассматриваемой задачи. 3. Метод минеральных индексов. Определён комплекс минеральных индексов [9], предназначенных для построения изображений, на которых выделяются предполагаемые зоны распространения определённых минералов или групп минералов. Всего было использовано 15 минеральных индексов.

Эксперименты и обсуждение. Для проведения исследований были применены рассмотренные выше методы, с использованием данных съёмочной системы ASTER.

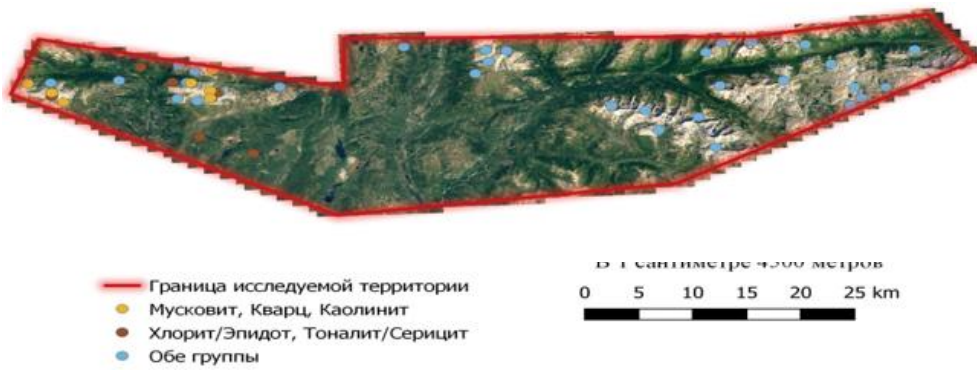
Так как результатом обработки каждого из них является полутоновое изображение (группа изображений), значения пикселей которых косвенным образом свидетельствуют о наличии той или иной группы минералов, для визуализации результатов были экспериментальным образом подобраны пороговые значения, при превышении которых формируется гипотеза о наличии соответствующего минерала на соответствующем участке подстилающей поверхности. При визуализации группы близко расположенных в поле изображения точек, для которых гипотеза верна, отмечены соответствующим цветовым маркером, см. рис. 2. На рисунке показаны результаты применительно к различным методам и группам минералов.



Поз. «а». Картирование методом спектрального угла



Поз. «б». Картирование методом главных компонент



Поз. «в». Картирование методом спектральных индексов

Рис. 2. Результаты экспериментов

По результатам эксперимента было отдано предпочтение методу спектрального угла, так как, во-первых, он не включает визуальное дешифрирование, что уменьшает вероятность ошибки оператора, во-вторых, в ходе применения этого метода было обнаружено кварцевое ядро, наличие которого подтверждается материалами отчета о результатах разведки месторождения [2].

Список литературы

1. Забелин В.И., Блинников В.В., Шевцова Н.Н. и др. Предварительная разведка Ак-Сугского медно-порфинового месторождения (Отчёт Ак-Сугской партии за 1982-85 гг.), 1985.
2. Птицын А.М., Дюдин Ю.К., Поляков А.И. Отчёт о результатах разведки Ак-Сугского медно-порфинового месторождения за 2007-2009 гг., 2009, 394 с.
3. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании/ Г.Г. Райкунов, В.Л. Щербаков, С.И. Турченко, Н.А. Брусничкина – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014.-136 с.
4. Azizi, H. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran/ H. Azizi, M.A. Tarverdi, A. Akbarpour // *Advances in Space Research*. – 2010. – №46. С. 99-109.
5. Di Tommaso, I. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina/ I. Di Tommaso, N. Rubinstein // *Ore Geology Reviews*. – 2007.– № 32. С. 275-290.
6. Beiranvand Pour, A. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran / A. Beiranvand Pour, M. Hashim // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2011. – № 42. С. 1309-1323.
7. Gabr, S. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data / S. Gabr, A. Ghulam, T. Kusky // *Ore Geology Reviews*. – 2010. – № 38. С. 59-69.
8. Tangestani, M.H. Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran / M.H. Tangestani, F. Moore // *Remote Sensing*. – 2002. – №. 22. С. 4815–4825.
9. Ninomiya, Y. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data / Y. Ninomiya // *Geological Survey of Japan, AIST 2016*. С. 180-190.

A. V. Senin, Yu. A. Maglinets, V. I. Losev

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

e-mail: shurik.19.12.1996@mail.ru; maglinets@mail.ru; vovalosev98@gmail.com

AUTOMATION OF GEOLOGICAL MAPPING USING REMOTE SENSING METHODS

The article is discussing the problems of automation of geological mapping using remote sensing data. The territory which is being analysed in this study is Ak-Sukskoye copper-porphyry deposit. The study was conducted using archived ASTER satellite data for the period 2003-2007. The spectral angle mapper, the method of basic components and the method of spectral indicators were applied. Spectral angle mapper was chosen as the main tool. It showed the greatest correlation of the results with ground-based research data. A vector map of the deposit areas has been constructed, the spectral characteristics of which indicate a high probability of the presence of minerals.

Keywords: ASTER, Spectral Angle Mapper, Remote Sensing.

А. А. Синюткина

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал
Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН, Томск, Россия
e-mail: ankalaeva@yandex.ru

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОСУШЕННЫХ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье представлены результаты геоинформационного картографирования современного состояния и временной динамики осушенных в 1980 гг. сосново-кустарничково-сфагновых верховых болот таежной зоны Западной Сибири. Исследование проведено с использованием архивных спутниковых данных Landsat за период 1973–2020 гг. Выявлено, что повышение значений NDVI относительно естественного болота является индикатором трансформации растительного покрова, при развитии процессов самовосстановления NDVI снижается. На участках лесомелиорации с начала 2000 гг. наблюдается стабилизация значений NDVI на уровне естественного болота, что подтверждает развитие процессов самовосстановления растительного покрова.

Ключевые слова: лесомелиорация, самовосстановление болот, NDVI, верховое болото, Landsat

Для территории таежной зоны Западной Сибири и, в частности для Томской области, является актуальной проблема оценки современного состояния и процессов неконтролируемого самовосстановления осушенных болот. Целью исследования является выявление закономерностей пространственно-временной динамики растительного покрова ключевых участков в пределах четырех осушенных верховых болот Томской области. Растительный покров всех участков представлен сосново-кустарничково-сфагновым сообществом. Болота были осушены в 1980 гг. для лесомелиорации и добычи торфа, а в настоящее время ряд участков характеризуется деградацией осушительной сети и развитием процессов самовосстановления растительного покрова. Исследование проведено с использованием методов геоинформационного моделирования на основе архивных спутниковых данных Landsat. Методика проведения геоинформационного моделирования включала два основных этапа: 1) Формирование обучающих выборок и классификация снимков в среде QGIS с использованием Semi-Automatic Classification Plugin. Для формирования обучающих выборок использовались данные полевых ландшафтных исследований, проведенных в пределах ключевых участков в 2019 г. (таблица). Каждый ключевой участок разделен на 6–8 классов (лес, поле, заболоченный лес, топи, комплексные болота, сосново-кустарничково-сфагновые болота – естественные и осушенные. Осушенные болота разделены на два класса в соответствии с участками проведения полевых исследований). Полученные модели сохранены в виде шейп-файлов, которые использовались как основа для ретроспективного анализа динамики растительного покрова ключевых участков. Общая площадь контуров для всех ключевых участков составила около 41 км². 2) Оценка последствий осушения и процессов самовосстановления на основе ретроспективного анализа вегетационного индекса NDVI Landsat за период

1973–2020 гг. Всего для анализа были использованы спутниковые данные за 77 дат съемки, на основе которых определено 456 значения NDVI для точек полевых исследований и 252 значения NDVI для выделенных контуров растительного покрова ключевых участков. Чтобы исключить влияние динамики NDVI, связанной с особенностями вегетационного периода, и возможных ошибок, связанных с использованием неоднородного во временном отношении ряда данных, ретроспективный анализ проведен с использованием не абсолютных значений NDVI, а отношения значений NDVI осушенных болот к естественному участку на Бакчарском болоте. Сравнение значений NDVI между ключевыми участками проведено с использованием критерия Краскела-Уоллиса за пять отдельных периодов (1970 гг., 1989–2001, 2001–2008, 2009–2018, 2019–2020). На основе карт растительного покрова на территорию ключевых участков построены временные серии карт NDVI, отражающее степень трансформации растительности болот после осушения и интенсивность самовосстановления осушенных участков.

Таблица

Характеристика ключевых участков [1]

Ключевой участок	Номер площадки	Координаты	Уровень болотных вод, см	Положение	Антропогенная нагрузка
1 Колпашево (К)	K1	58°19'07"N 83°06'37"E	-100	терраса р. Кеть	гидролесомелиорация
	K2	58°19'10"N 83°06'36"E	-100		
2 Усть-Бакчарское болото (UB)	UB 1	57°34'41"N 82°16'26"E	-42	терраса р. Бакчар	осушение для добычи торфа
	UB 2	57°34'33"N 82°16'22"E	-27		
3 Бакчарский болотный массив (BB)	BB1	56°53'29"N 82°40'47"E	-26	междуречье Бакчар-Икса	гидролесомелиорация
	BB2	56°53'48"N 82°40'56"E	-11		
4 Иксинский болотный массив (IB)	IB1	56°50'25"N 83°15'18"E	-27	междуречье Икса-Шегарка	гидролесомелиорация
	IB2	56°51'15"N 83°15'55"E	-23		
5 Бакчарский болотный массив (фон)	BBpr	56°58'24"N 82°36'41"E	-11	междуречье Бакчар-Икса	естественный участок

Для сопоставления значений NDVI с характеристиками современного растительного покрова проведен анализ значений за вегетационные периоды 2019–2020 гг. NDVI в среднем составляет 0,70 и изменяется в пределах 0,68 на точке BB1 Бакчарского болота и 0,72 на Усть-Бакчарском болоте. Условно ключевые участки можно разделить на три группы исходя из значений NDVI осушенных болот относительно естественного. В первую группу мы отнесли Усть-Бакчарское болото. Более высокие значения NDVI, характерные для обеих точек Усть-Бакчарского болота, мы объясняем присутствием березы в составе древесного яруса и широким развитием кустарничкового яруса, достигающего проективного покрытия 100 % несмотря на отсутствие мохового покрова на отдельных участках. Предположение о росте NDVI за счет разрастания листопадных видов подтвердилось при анализе сезонной динамики NDVI. Значения NDVI на Усть-Бакчарском болоте в мае (по данным на 3 мая 2019 г.) существенно ниже (0,47) в сравнении с остальными участками, где NDVI изменяется

от 0,55 на естественном болоте до 0,58–0,61 на осушенных участках. Вторую группу образуют оба участка болота в окрестностях г. Колпашево, а также участок IB2 Иксинского болота. Для них характерны средние значения NDVI среди ключевых участков, соответствующие NDVI естественного болота. Следует отметить, что несмотря на схожие значения NDVI с естественным болотом, на современном этапе динамики растительного покрова, видовой состав отличается участками. Вероятно, на участках K1 и IB2 значение NDVI достигается за счет более развитого древесного яруса при разреженном кустарничковом и моховом покрове. Значения NDVI несколько ниже (0,68–0,69) в сравнении с естественным болотом на участках Бакчарского болота и IB1, образующих третью группу участков. В соответствии с результатами кластерного анализа, проведенному на основе полевых данных, отмечено, что данные участки характеризуются максимальной степенью самовосстановления растительного покрова [2]. Таким образом, повышение значений NDVI относительно естественного болота является индикатором трансформации растительного покрова, при развитии процессов самовосстановления NDVI несколько снижается.

Для оценки временной динамики NDVI ключевых участков рассматриваемый период был разделен на 4–5 этапов. Выделение этапов проводилось для каждого участка индивидуально исходя из закономерностей динамики значений NDVI. Для большинства участков (главным образом Бакчарское, Иксинское болота, болото в окрестностях г. Колпашево) характерны сходные закономерности динамики NDVI. На первом этапе, включающем период до осушения, значения NDVI были близки к естественному участку, что подтверждает сходные условия до проведения осушительной мелиорации. Второй этап 1989–2001(2002) гг. характеризуется снижением NDVI относительно естественного болота. Вероятно, это происходило за счет деградации моховой растительности, являющейся чутким индикатором снижения уровня болотных вод, при отсутствии значительного прироста древесного яруса. Далее, с начала 2000 гг. наблюдается рост значений и стабилизации их на уровне естественного болота. Для Усть-Бакчарского болота характерно более значимое снижение NDVI в первые годы после осушения, что в большей степени проявляется на участке UB1. Это вероятно связано с более значимой деградацией мохового покрова в связи более сильным снижением уровня болотных вод. К 1999–2000 на участке UB1 значения NDVI восстановились до уровня естественного болота. Более раннее повышение NDVI в сравнении с остальными участками вероятно объясняется интенсивным разрастанием кустарничкового яруса, в частности увеличения проективного покрытия голубикой, являющейся индикатором влияния осушения. В 2002–2010 годах мы опять наблюдаем снижение NDVI, что вероятно объясняется пожаром, произошедшим в этот период. После 2010 происходит стабилизация значений NDVI на уровне выше естественного болота, что уже было отмечено выше.

Таким образом, на большинстве участков мы не выявили ожидаемого увеличения NDVI, которое было вероятно за счет увеличения продукции древесного и кустарничкового ярусов в ответ на снижение уровня болотных вод. Напротив, в результате проведенной осушительной мелиорации наблюдается деградация растительности, приводящая к снижению NDVI в первые годы после осушения. С начала 2000 гг. наблюдается рост значений NDVI и их стабилизации на уровне естественного болота.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 19-77-00010.

Список литературы

1. Синюткина А.А. Оценка трансформации торфяной залежи осушенных верховых болот юго-восточной части Западной Сибири // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 78–87.
2. Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics // Catena. 2021. № 205. 105464.

A. A. Sinyutkina

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia
e-mail: ankalaeva@yandex.ru

SPATIAL AND TEMPORAL MAPPING OF DRAINED BOG WITHIN TOMSK REGION

The article presents the results of GIS mapping of the current state and time dynamics of pine-shrub-sphagnum bogs drained in the 1980s. The study was conducted using archived Landsat satellite data for the period 1973-2020. It was revealed that an increase in the values of NDVI relative to a pristine bog is an indicator of the transformation of vegetation cover. NDVI decreases with the development of vegetation cover self-restoration. At the sites of reclamation since the beginning of the 2000s, there is a stabilization of NDVI values at the level of a pristine bog, which confirms the development of self-restoration of vegetation cover.

Keywords: forestry drainage, self-restoration, NDVI, bog, Landsat.

Б. В. Содномов, А. А. Аюржанаев

Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия
e-mail: sodnomov@binm.ru

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕСИСТОСТИ БАССЕЙНА Р. СЕЛЕНГА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Лес относится к ценнейшим ресурсам не только с точки зрения экономики, но и биосферы в целом. В данной работе дана оценка изменения лесного покрова в бассейне р. Селенги, являющейся крупнейшим притоком оз. Байкал. Используются данные проекта Global Forest Watch, которые основаны на снимках спутников серии Landsat с разрешением 30 м, а также продукт MODIS land use/land cover с 250-метровым разрешением. Выявлено, что ключевыми годами, внёсшими наибольший вклад в потери леса, явились 2003-2004, 2008-2009, 2015–2017 гг. Основной причиной исчезновения лесного покрова являются пожары и ведение лесного хозяйства. Данные дистанционного зондирования Земли низкого пространственного разрешения имеют тенденцию к завышению потерь леса для небольших площадей и, наоборот, занижение больших ареалов.

Ключевые слова: ДЗЗ, бассейн Селенги, Global Forest Watch, MODIS, лесные пожары, потери лесного покрова.

Лес составляет значительную часть биомассы Земли и является одним из наиболее значимых биомов как с точки зрения экологии (средообразование, регулирование климата, поддержка углеродного баланса и пр.), так и экономики (сырье, рекреация и пр.). Оценка глобального изменения лесного покрова (Global Forest Resources Assessment 2015) в рамках проекта Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН за последние годы выявила уменьшение площади лесов на 3 % с 1990 по 2015 гг. Цель работы – оценка динамики потерь леса трансграничного бассейна р. Селенги (главного притока озера Байкал) по данным дистанционного зондирования Земли.

Около 37 % площади бассейна (165,5 тыс. км²) занимают леса (рис. 1). Преобладающими породами в регионе являются лиственница сибирская, сосна обыкновенная и сосна сибирская (кедр), которые образуют легкогоримые светлохвойные леса, что вкупе с весенней засухой (как и засушливым климатом в целом) приводит к регулярным пожарам и последующей санитарной рубкой [1]. Также распространена коммерческая рубка леса [2]. Вредители (сибирский коконопряд, пилильщик сосновый и др.) и возбудители болезней деревьев способствуют масштабному повреждению леса [3]. Деструктивное воздействие могут оказывать сильные ветры в сочетании с постоянным антропогенным прессом, приводящие к ветровалам в кедровом древостое [4].

Для оценки потери лесного покрова использованы данные лаборатории Глобального анализа и обнаружения земель (GLAD) университета Мэриленд в рамках проекта Global Forest Watch (GFW) (рис. 2а). Данные основаны на снимках временных рядов Landsat в период с 2000 по 2020 гг. и являются показателем пространственно-временных тенденций лесопотерь во всем мире. Потеря лесной растительности определена как снижение её плотности или полное исчезновение вне зависимости от причин: пожары, вырубки, ветровалы и т.д.

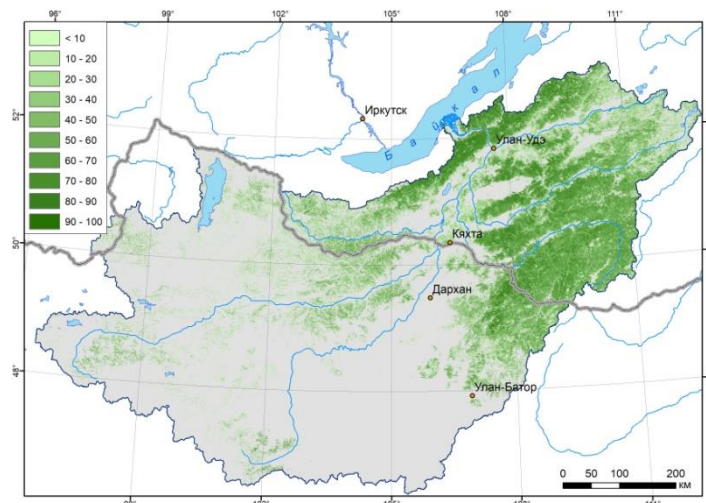


Рис. 1. Плотность древостоя в бассейне р. Селенга (%)

Для картографической оценки динамики типов растительности использованы данные землепользования (land use/land cover), полученные со спектрорадиометра MODIS за период с 2000 по 2019 гг. с пространственным разрешением 250 м (продукт MCD12Q1). Выделены следующие типы растительности: травянистая, лесная, кустарниковая, а также земли с разреженной растительностью и без нее. На основе полученных карт выявлены территории, на которых в период с 2001 по 2019 гг. лес замещен иным типом растительности (рис. 2б).

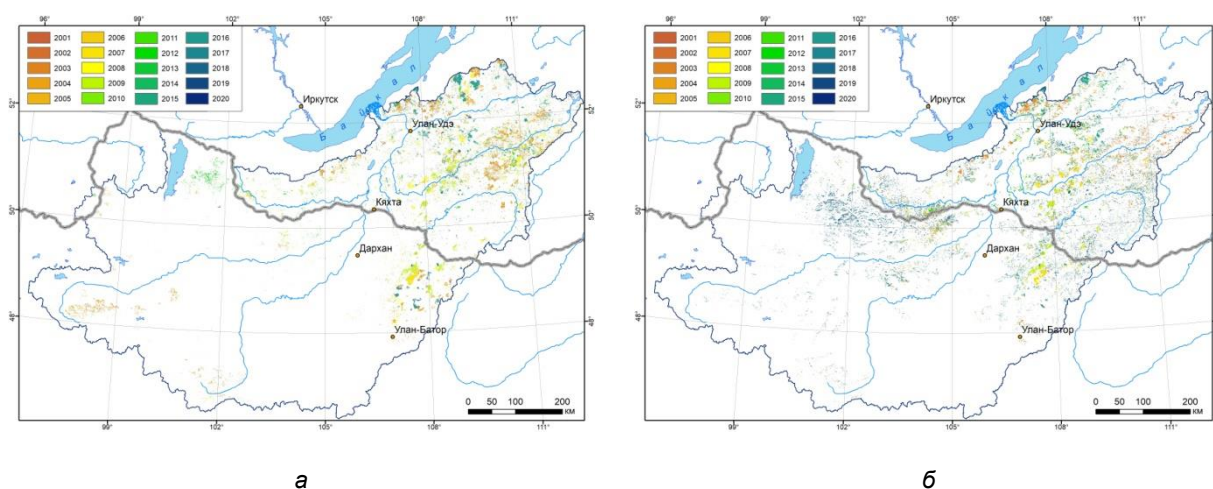


Рис. 2. Динамика обезлесивания: а) по данным GFW, б) по данным MODIS

Процессы обезлесивания в целом распространены равномерно по лесопокрытым территориям. Наиболее крупные очаги лесопотерь возникли в 2003-2003, 2008-2009, 2015-2016 гг. Основной причиной потерь являются лесные пожары, которым способствовали весенние и летние засухи. Помимо лесных пожаров, потери обусловлены коммерческой деятельностью по заготовке леса. Отметим тенденцию занижения MODIS достаточно крупных потерь леса площадью более 20–30 тыс. га, тогда как небольшие ареалы менее 15–20 тыс. га наоборот завышаются. При этом принимается, что данные GFW имеют на порядок более высокую точность потери лесного покрова по сравнению с MODIS в силу разницы в пространственном разрешении

спутниковых сенсоров. Также отметим, что по данным MODIS в 2018-2019 гг. наблюдается рост обезлесивания в монгольской части бассейна, не обнаруженный по данным GFW. Вероятно, это вызвано различием в определении лесной растительности: GFW определяет лесную растительность как растительность высотой более 5 м вне зависимости от её типа, тогда как по данным MODIS растительность выше 2 м распределена между кустарниковой и древесной растительностью.

Анализ космических снимков показывает, что в течение 3–5 лет после крупного пожара гари хорошо дешифрируются как визуально, так и автоматизированными методами. Следует отметить, что восстановление древесной растительности после крупных лесных пожаров происходит достаточно медленно, а в некоторых случаях, не наблюдается вовсе. Это может быть вызвано тем, что отдельные повреждённые пожарами участки леса, расположенные в потенциально пожароопасных местах (возле автодорог, населенных пунктов и т.д.), подвергаются повторному выгоранию после появления молодой поросли лиственных пород деревьев и кустарников. Кроме того, после уничтожения больших площадей леса пожарами, проводится сплошная санитарная рубка горелого леса.

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 20-17-00207) и при частичной поддержке Государственного задания БИП СО РАН (АААА-А21-121011990023-1).

Список литературы

1. Евдокименко М.Д., Иванов В.В. Особенности противопожарного обустройства в лесах Прибайкалья // Сибирский лесной журнал. 2017. № 5. С. 63–75. DOI: 10.15372/SJFS20170506.
2. Шуфан Я., Плотникова Г.П., Симонян С.Н. Перспективное развитие лесопереработки сибирского округа: взаимодействие Китая и России // Системы Методы Технологии. 2018. № 3 (39). С. 116–124. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-116-124.
3. Ставников Д.Ю. Анализ санитарного и лесопатологического состояния лесов Республики Бурятия // Вестник БГСХА. 2013. №. 2. С. 67–73.
4. Черных В.Н., Бондаренко Д.В., Аюшеева Д.М., Раднаева Б.Б. Добыча кедрового ореха как фактор деградации кедровников горно-таёжных ландшафтов Забайкалья (на примере тайги хребта Цаган-Дабан) // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2019. № 3. С.44–51. DOI: 10.18101/2587-7148-2019-3-44-51.

B. V. Sodnomov, A. A. Ayurzhanayev

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

e-mail: sodnomov@binm.ru

ASSESSMENT OF FOREST CHANGE IN THE SELENGA BASIN ACCORDING TO ERS DATA

The forest is one of the most valuable resources not only from the point of view of the economy, but also from the point of view of the biosphere as a whole. This paper provides an assessment of the change in forest cover in the river basin. Selenga, which is the largest tributary of the lake. Baikal. The data of the Global Forest Watch project, which are based on images of Landsat satellites with a resolution of 30 m, as well as the MODIS land use / land cover product with a 250-meter resolution, were used. It was revealed that the key years that made the greatest contribution to forest loss were 2003-2004, 2008-2009, 2015-2017. The main reasons for the loss of forest cover are fires and forestry. Low spatial resolution Earth remote sensing data tend to overestimate forest loss for small areas and, conversely, underestimate large areas.

Keywords: remote sensing, Selenga basin, Global Forest Watch, MODIS, forest fires, loss of forest cover.

А. Г. Терехов^{1,2}, Н. Н. Абаев^{2,3}, Ю. А. Маглинец⁴

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

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

³ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

⁴ Кандидат технических наук, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: aterekhov1@yandex.ru, abayev_n@meteo.kz, maglinets@mail.ru

**О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СНЕЖНОГО ПОКРЫТИЯ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В ПЕРИОД 2001–2021**

Рассмотрены возможности мониторинга высоты снежного покрова территории Казахстана для контуров всех восьми водохозяйственных бассейнов Республики. В качестве источника информации использовался продукт USGS USA, «Snow Depth» FEWS NET. Продукт имеет ежесуточное обновление, пространственное разрешение 1 км и детализировку тематического слоя (высота снега) в 1 см. В практическом смысле наиболее востребованы относительные оценки высоты снега, которые позволяют ранжировать текущий зимний сезон, относительно прошлых лет. Такая информация представляет интерес для гидрологии территорий, в частности в задачах прогноза объемов весеннего половодья и оценках весенних запасов продуктивной влаги в почве.

Ключевые слова: высота снега, мониторинг, снежность холодного периода, водохозяйственный бассейн.

В аридном климате Центральной Азии водные ресурсы являются основой экологической стабильности территорий. Снежный покров Казахстана, формирующийся в холодный период, является критически важным водным ресурсом. Осадки в форме снега, в основном приурочены к периоду с ноября по март. За это время выпадает до 40% осадков от годовой нормы.

На большей части территории Казахстана испаряемость воды в разы превосходит количество осадков. В связи с этим, накопленные за зиму твердые осадки формируют непродолжительное время (апрель-июнь), когда влагообеспеченность территорий оказывается относительно неплохой. В этот момент реки наполняются водой (казахстанский тип рек – сток только в весенний период). Естественная растительность бурно развивается (эфемеры, эфемероиды), чтобы к началу летней жары сформировать семена и закончить сезонный цикл развития.

С экономической точки зрения наиболее важными гидрологическими процессами, связанными со снежным покровом, являются: весеннее половодье, которое может нести значительные угрозы объектам народного хозяйства Республики; и весеннее увлажнение почв, являющееся основой водообеспеченности яровых сельскохозяйственных культур Северного Казахстана в первую половину вегетационного сезона (Казахстан занимает 6-9 место в мире по экспорту зерна пшеницы).

Таким образом, Казахстан является страной, для которой мониторинг снежного покрова представляет особый интерес. В связи с этим, параметры снежного покрова территорий, получаемые в рамках различных систем, как наземных, так и дистанци-

онных (спутниковые, модельные оценки) должны анализироваться, чтобы составить возможно более объективную и детальную картину.



Рис. 1. Водохозяйственные бассейны на территории Казахстана: 1. Жайлык-Каспийский; 2. Тобол-Торгайский; 3. Есильский; 4. Ертиский; 5. Нура-Сарыусуский; 6. Балкаш-Алакольский; 7. Шу-Таласский; 8. Арало-Сырдарьинский

Наземные измерения на сети метеорологических станций на большей части территории Казахстана имеют определенные ограничения. Для степных территорий Евразии в зимнее время характерны низкие температуры и сильные ветра. В таких условиях инструментальное измерение количества твердых осадков затруднительно. Ветровой перенос снега, усложняет не только измерение количества осадков, но и измерение высоты снежного покрова. Подветренные или наветренные рельефы кардинально отличаются по высоте снежного покрова. Практически полное отсутствие древесной растительности в сухостепных зонах не позволяет организовывать там зоны, защищенные от ветра, в которых помехи при регистрации параметров снежного покрова минимальны.

В последнее время, появляются различные продукты, характеризующие состояние снежного покрова на глобальном либо региональном уровне. Основой для их расчетов, как правило, являются спутниковые данные и модельные расчеты. Продукт «высота снега» (Snow Depth), разработанный в рамках программы Famine Early Warning Systems Network (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/410>) от USGS хорошо зарекомендовал себя для характеристики снежного покрова территорий в Центральной Азии [1].

В практическом плане наиболее востребованы относительные оценки снежности территорий, которые более точны, поскольку регулярные отклонения при этом автоматически компенсируются. На территории Казахстана принято выделять восемь водохозяйственных бассейнов, в границах которых организовано государственное администрирование и управление использованием водных ресурсов, рис.1. Для этих восьми полигонов были созданы суточные архивы средней высоты снега в период с 1 января по 31 марта в сезонах 2001-2021 гг. Динамика снежности территории Казахстана в таком разрезе представлена на рис.2,3.

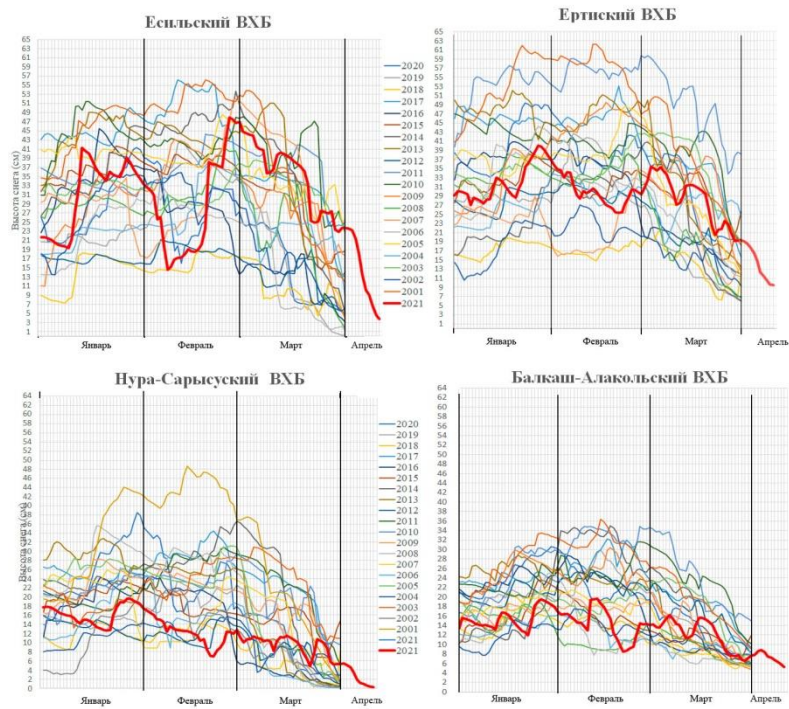


Рис. 2. Суточная динамика снежности в сезонах 2001-2021 гг. для ряда водохозяйственных бассейнов Казахстана в период с 1.01 по 31.03 (2021 год до 30.04)

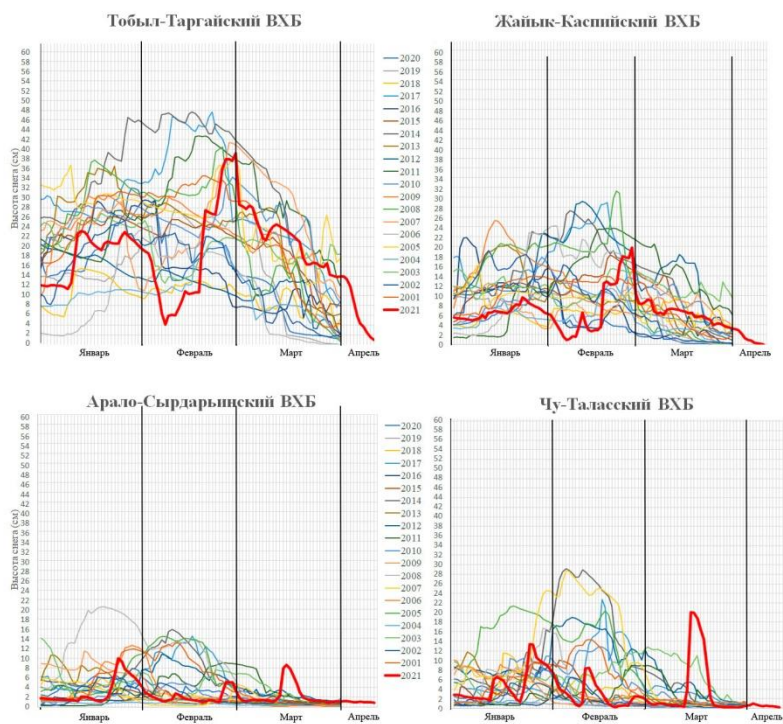


Рис. 3. Суточная динамика снежности в сезонах 2001-2021 гг. для ряда водохозяйственных бассейнов Казахстана в период с 1.01 по 31.03 (2021 год до 30.04)

База суточных данных по высоте снега SD FEWS NET позволяет детально отслеживать динамику снежности текущего сезона. Оперативность обновления данных составляет около 1-3 дней. Сезон 2021 года характеризовался на большей части Ка-

захстана двумя периодами, малоснежным, до середины февраля и существенно более снежным во второй половине февраля и в марте. Данный вид информации представляется полезным дополнением к другим видам оперативных данных о снежном покрове Казахстана.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты: № AP09562387 и № BR10965172.

Список литературы

1. Терехов А.Г., Ивкина Н.И., Абаев Н.Н., Елтай А.Г., Егембердиева З.М. Валидация суточного продукта Snow Depth FEWS NET для бассейна реки Урал по данным метеорологических наблюдений// Ж. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020, Т.17, № 3, С.31-40, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-31-40.

A. G. Terekhov^{1,2}, N. N. Abayev^{2,3}, Yu. A. Maglinets⁴

¹ Institute informational and computing technology MES, Almaty, Kazakhstan

² RSE Kazhydromet, Almaty, Kazakkstan

³ al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan

⁴ Institute of space and informational technology, SFU, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: aterekhov1@yandex.ru, abayev_n@meteo.kz, maglinets@mail.ru

MONITORING OF SNOW COVER OF WATER MANAGEMENT BASINS IN KAZAKHSTAN DURING 2001-2021

The possibilities of snow depth monitoring of water management basins in Kazakhstan are considered. The USGS USA product, "Snow Depth" FEWS NET with daily renew and 1 km resolution was used. In a practical sense, the most popular relative estimates of snow depth, which allow you to rank the current winter season, relative to previous years. Such information is of interest for the territory hydrology, in the tasks of spring flooding forecasting and estimates of spring soil moisture deposit.

Keywords: snow depth, monitoring, snowiness of cold period, water management basin.

**А. М. Халимов¹, Н. Б. Курбонов^{2,3},
А. В. Митусов⁴, Ф. К. Восидов¹**

¹ Центр изучения ледников НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан,

² Кандидат технических наук, Таджикский национальный университет,
Душанбе, Таджикистан

³ Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана,
Душанбе, Таджикистан

⁴ Кандидат сельскохозяйственных наук, Казахстано-Немецкий университет,
Алматы, Казахстан

e-mail: knomvarb.0502@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ ЛЕДНИКА ГИДРОГРАФИЧЕСКАЯ ПАРТИЯ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ

В данной статье рассмотрены изменения среднемесячных климатических условий в районе ледника Гидрографическая партия (ГПП) в период 1990-2018 гг., оценено влияние синоптических процессов на выпадение осадков в ледниковой зоне в летний период. Целью этой работы является подробное описание изменения площади, и отступление языковой части ледника ГПП. Для исследования ледников использовались спутниковые снимки Ландсат (Landsat) с 1990 по 2018 гг. А также, наш полевой работы в ходе исследования изменения состоянии ледника ГПП состоит в определении ее язык с помощью GPS и сравнении данных, полученных со спутниковыми снимками программы ArcGIS.

Ключевые слова: мониторинг ледника, деградация ледника, Гидрографическая партия, Landsat, спутниковые снимки, колебание климата.

Введение. Полевые исследования ледников в высокогорье проводятся в основном на локальных территориях с ограниченным периодом наблюдений, что не всегда позволяет получить достоверные сведения об их параметрах [1]. Современные компьютерные технологии и спутниковые снимки поверхности Земли высокого разрешения значительно упрощают и повышают точность определения состояния ледников. Множество авторов при исследовании оледенения в основном делают акцент на дистанционное зондирование [2-5].

В настоящее время оледенение Центральной Азии и других горных стран, находятся в очередной фазе деградации, начавшейся более 160 лет назад [2]. Эти процессы идут как в высотной, так и широтной зональности. Например, при анализе горного [6-8] оледенения Земли Норденшельда [9], и его чувствительности на изменение климатических условий за период XX и начало XXI вв. показано, что в данной местности сокращается площадь оледенения. Такие изменения касаются ледников площадью менее 0,5 км². При изучении и сравнении с 1936 по 2016-2017 гг. малые ледники потеряли 76 % своей площади, а крупные горно-долинные ледники – сократились до 33 % [9].

Дешифрирование космических снимков, аэрофотоснимков, анализ результатов полевых измерений и опубликованных материалов позволили определить границы

ледника Абрамова (Алайский хребет) в разные годы и оценить скорость его изменения. Выявлено, что имеется тенденция к отступанию ледника, однако на этом фоне отмечены периоды относительной стабилизации фронтальной части языка, а также периоды наступательных подвижек разной длительности и интенсивности [10]. Таким образом, необходимо не только анализ текущего состояния ледников, но и выявление многолетней динамики изменений, что невозможно сделать без использования космоснимков.

Обзор литературы. Согласно Курбоновым Н.Б. и другие [11] процесс изучения ледников бассейна р. Зерафшан отхватает более 150 лет. Независимо от продолжающихся гляциологических исследований по количеству, площади и размеру этих ледников среди исследователей наблюдаются разные результаты. Автор [12] пишет, что по расчетам Насырова М.А. общая площадь ледники бассейна реки Зерафшан равны 558 км^2 , их количества достигают 424 и объем составляют 55 км^3 . Другие исследователи [11], которые в основном использованы космоснимки, общий количества, площадей и объемов ледники бассейна р. Зерафшан составляют $892,642,1 \text{ км}^2$ и $36,9 \text{ км}^3$ соответственно. Согласно [12] Щетинников А.С. рассчитает, что в бассейне р. Матча 587 ледник имеют $179,2 \text{ км}^2$ площадью, в бассейне р. Фан-Ягноб 460 ледник имеют $133,29 \text{ км}^2$ поля и в бассейнах левых и последних крупных притоков р. Зерафшан (Киштуд и Могиян) 174 ледник имеют $43,3 \text{ км}^2$ площадью. Наряду со этими, по данным Каталога ледников СССР в Матчинском узле оледенения сосредоточено $245,0 \text{ км}^2$ и в Искандеркульском $56,0 \text{ км}^2$ площади ледников [12]. Здесь же располагаются наиболее крупные ледники бассейна.

Ледники бассейна р. Зерафшан расположены в основном в верховьях бассейна реки Матча и в Фанские горы, и одним из самых известных и более изученных из которых является ледник ГПП. Потому что, первые наблюдения на этот ледник (Рис. 1) проведены в 1968 году, а в период 1971-1974 гг. на ледник ГПП каждое лето работала комплексная гляциологическая экспедиция ГПП Управления Гидрометслужбы Таджикской ССР, в честь которой ледник и получил свое название.

По мнениям Курбонова Н.Б. и Норматова П.И. [13] в настоящее время деградация ледника ГПП несколько замедлилась, он отступает примерно на 1 метр в год. Однако, по получении результаты сотрудниками Агентства по гидрометеорологии Таджикистана, которые в 4-12 августа 2006 г. организовали вторая экспедиция для исследования ледника ГПП, названом ледник с 1990 по 2006 года ежегодно отступал в среднем на 35-55 м со скоростью приблизительно 3 метра в год [12].

Таким образом, анализ приведенных эти цифры о количества, площадью и объёма ледники бассейна р. Зерафшан показывают, что ледники очень неравномерно распределены в названом бассейне. Также информации о количества, площадь и объема ледники бассейна р. Зерафшан очень разный, и поэтому их всестороннее изучение имеет большое научное значение. Поэтому в данной статье анализируем изменения состояния ледника ГПП на основе спутниковые съёмки и их сопоставления с данными другими литературы в данной области.

Место исследования. Бассейн реки Зерафшан состоит из двух речных бассейнов: Матча и Фандарья. Первый вытянут в широтном направлении и открыт на запад, второй представляет собой как бы «замкнутый мешок» с довольно узкой горло-

виной в северной части. В каждом из этих бассейнов наиболее значительные площади оледенения приурочены к верховьям рек Матча и Искандердаря, расположенных в крупных горных массивах – Матчинском и Ганза-Чимтаргинском – местах соединения хребтов.

Ледник ГПП каровый, расположен на северном склоне Гиссарского хребта в бассейне р. Саритаг, впадающей в озеро Искандеркуль. Длина ледника 1,2 км, площадь 0,7 км², средняя ширина 0,47 км. Конец ледника лежит на высоте 3440 метров над уровнем моря. Ледник находится в стадии деградации. С 1968 по 1976 года он отступил на 18 метров со средней скоростью 2,2 м/год. При этом он потерял 3100 м² площади, его поверхность понизилась на 3,6-4,0 метра [11-13].

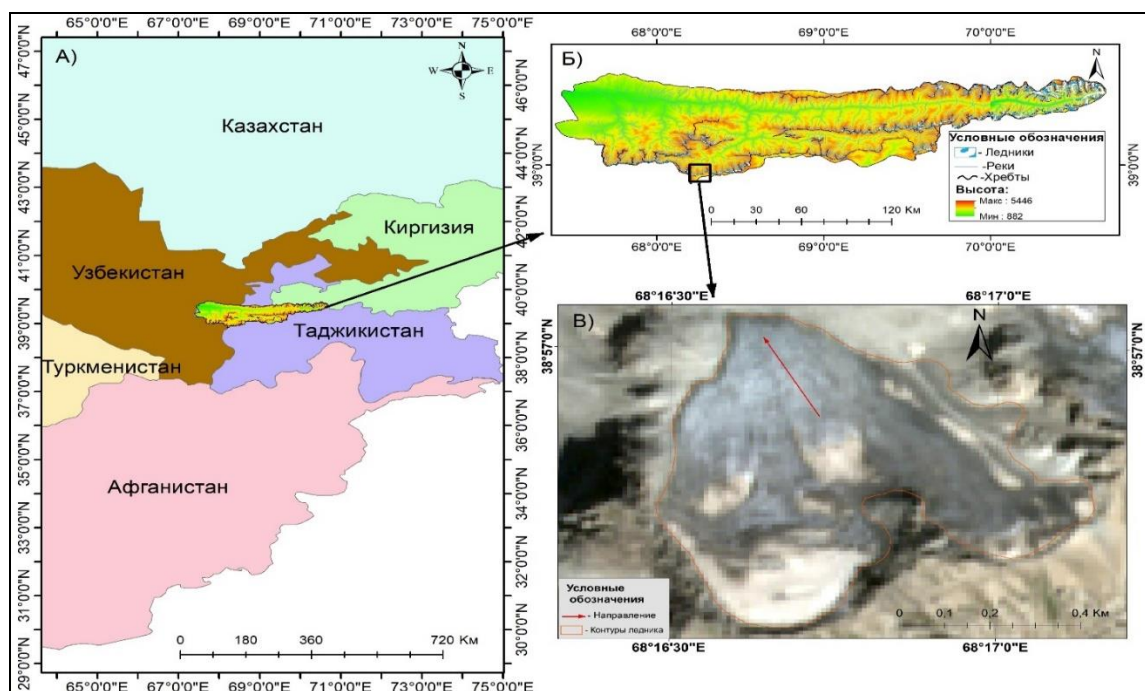


Рис. 1. Расположение бассейна реки Зерафшан. А) Карта Центральной Азии; Б) Бассейн реки Зерафшан; В) Ледник ГПП

Климат района. В бассейне реки Зерафшана имеется сравнительно большое (для горных районов Центральной Азии) количество метеостанций, однако эти метеостанции, расположенные на высотах от 1000 до 3000 м, характеризуют лишь климат нижней и средней зоны бассейна, гляциальная же зона оказывается слабо освещенной стационарными метеорологическими наблюдениями. Единственная станция – метеостанция Анзобский перевал (3379 м) – расположена на водоразделе. Метеостанция Шахристан (3143 м) находится на северном склоне Туркестанского хребта уже за пределами бассейна р. Зерафшан. Поэтому источником информации о гидрометеорологических условиях гляциальной зоны бассейна р. Зерафшана являются результаты экспедиционных исследований. Данные метеостанций, расположенных вне гляциальной зоны, служат исходным материалом для приведения коротких рядов экспедиционных наблюдений и в качестве опорных материалов для экстраполяции на высокогорную зону.

На рис. 2 представлена изменение температуры воздуха и годового количества осадков по многолетним наблюдениям метеостанции Анзобский перевал за период 1980-2018 гг.

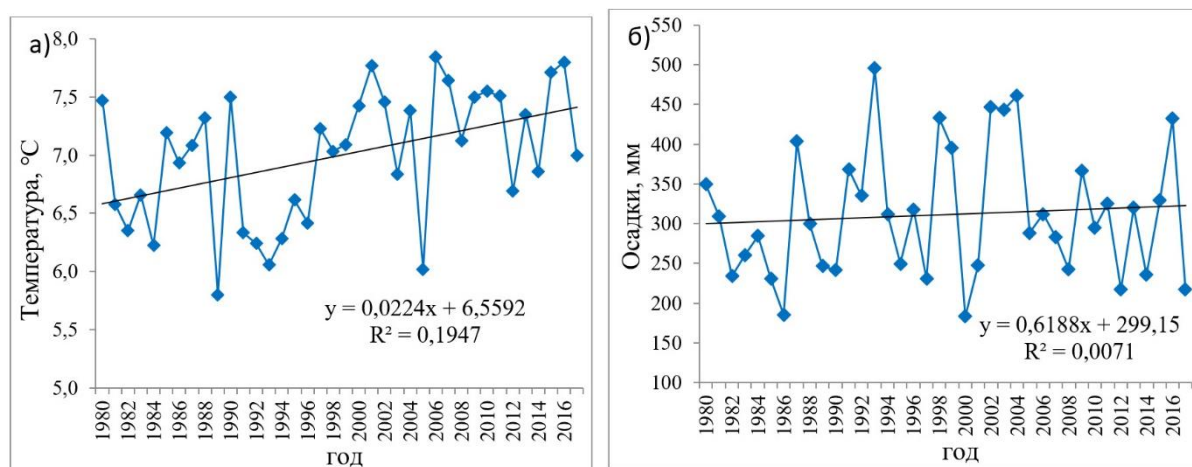


Рис. 2. Изменения температуры воздуха (а) и сумма годовых атмосферных осадков (б)

При исследовании среднегодовой температуры воздуха и количества атмосферных осадков показывают, что за 50 лет в данном регионе температура воздуха возросла. Величина роста тренда по температуре воздуха за данный период равен $1,1^{\circ}\text{C}$, а также сумма годовых осадков в данном регионе возросла и его величина равна $29,7$ мм или 10% .

Повышение региональной температуры, приводящее к сокращению площади оледенения хорошо видно на годовом ходе температуры воздуха и атмосферных осадков в августе (Рис. 3). Именно в августе начинается таяние ледников. Поэтому, на рисунке 3 показана изменения температуры воздуха (а) и годового количества осадков (б) в августе месяце за период 1980-2018 гг.

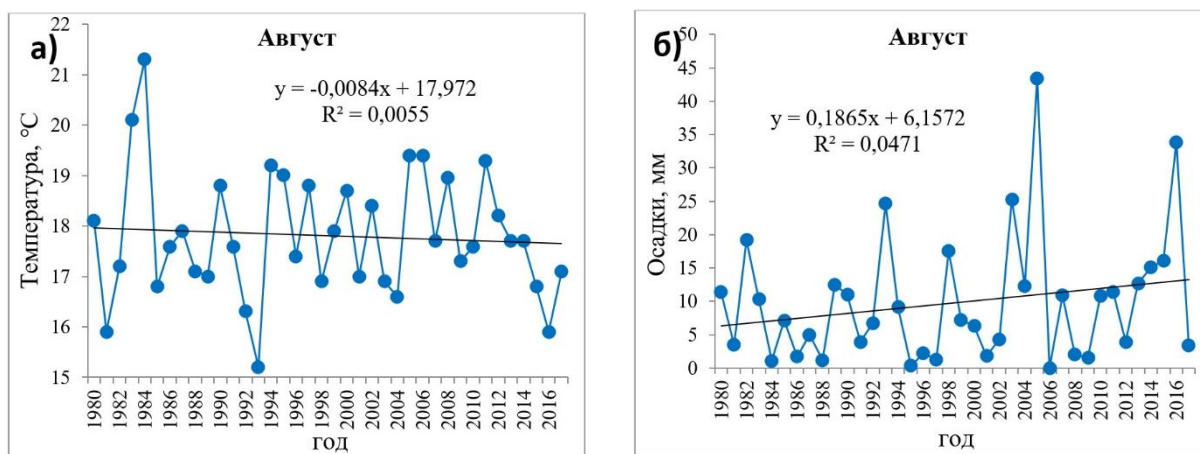


Рис. 3. Изменения температуры воздуха (а), атмосферных осадков (б) в августе за период 1980-2018 гг.

По тренду видно, что температура воздуха (Рис. 3, а) снижается на $0,4^{\circ}\text{C}$, а сумма осадков (Рис. 3, б) в августе имеет тенденцию роста и повысилась на $9,0$ мм, при августовской норме $9,8$ мм эта величина равна почти 100% .

Сравнение рисунков 2 (а) и 3 (б) показывают, что, хотя среднегодовая температура воздуха увеличилась с 1980 по 2016 гг., однако средняя температура в августе месяце снизилась за период наблюдения. В отличие от рисунков 2 (а) и 3 (а), годовое количество осадки (Рис. 2, б) увеличилось в течение 1980-2016 гг., а месячные количество осадки (Рис. 3, б) тоже увеличилось в августе за этот период.

Методы исследования. В настоящей работе использованы спутниковые снимки Landsat с пространственным разрешением 30 м. Границы ледников на спутниковых снимках Landsat дешифрировались вручную. На основе полученных результатов созданы цифровые карты границ ледников в векторном формате в картографической проекции UTM Zone 42N WGS 1984.

Вклад погрешности, обусловленной разрешающей способностью и точностью пространственной привязки космических снимков Landsat, оценивался путём построения буферной зоны вдоль границ ледников. Ширина буферной зоны равнялась удвоенной величине точности пространственной привязки данных снимков по методике [9].

Результаты исследования. За период с 1982 по 2018 площадь ледника ГПП сократилась на 0,24 км² (табл. 1). За период 1990–2018 гг. площадь ледника ГПП сократилась на 0,10 км². Отступление за каждую декаду составляет в среднем 0,03 км² (табл. 1). На рисунке 4 приведено наглядное состояние ледника ГПП, а также линиями показано его динамика его границы по годам. Погрешность расчёта площади ледника составляет ± 10,5%. Накопительная дистанция отступления языковой части ледника приведена в таблице 1.

Таблица 1

Анализ изменения площади ледника ГПП за период 1990–2018 гг.

№	Дата	Площадь, км ²	Изменения площадь, км ²	Погрешность расчёта, %
1	11-сентябрь-1990	0,56 км ²	-0,14*	9,2
2	05-августа-2000	0,52 км ²	-0,04	10,2
3	10-сентябрь-2010	0,49 км ²	-0,03	10,7
4	08-сентябрь-2018	0,46 км ²	-0,03	12,0

Как ясно из рис. 4, что северная часть ледника ГПП (языковой части ледника) намного больше отступила, чем южная его часть. Результаты, показаны на рис. 4, с точными цифрами представлены в таблице 2.

Таблица 2

Отступление языка ледника ГПП за период 1990-2018 гг.

Годы	1990	2000	2010	2018
Отступ, метр	–	36,5	86,5	123,2

Динамика отступления языковой части ледника по декадам приведено в таблице 2. Наибольшее отступление отмечается в период 2000-2010 годы. В среднем за декаду язык отступал на 37,4 метров при средней погрешности ± 10 метров. Как видно из гистограммы рис. 4, что за четыре декады наблюдений язык ледника ГПП в течение 2000-2010 годов отступал быстрее, чем в другие декады.

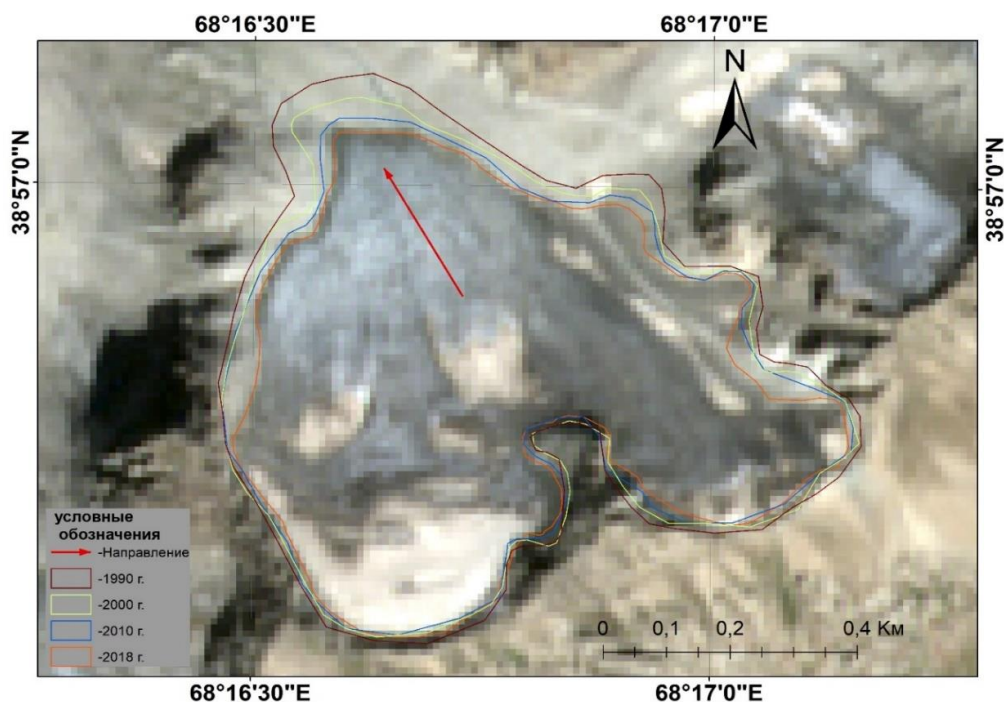


Рис. 4. Контуры ледника ГПП за анализируемый период. Красная стрелка указывает направление движения ледника.

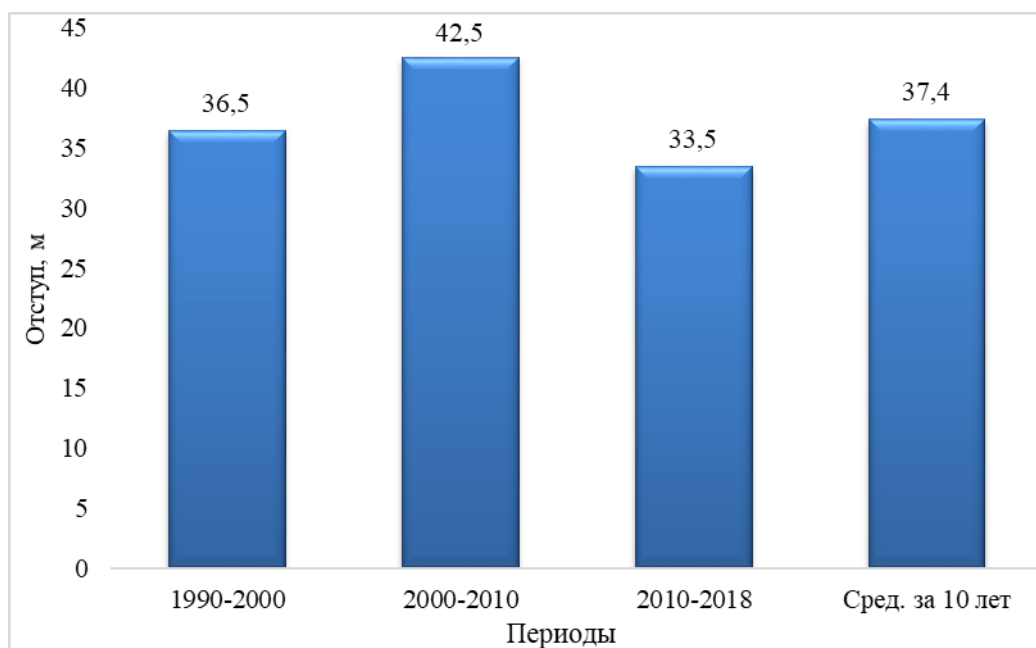


Рис. 5. Отступление ледника ГПП по декадам

Обсуждение результатов. Как выяснилось за анализируемый период с 1990 по 2018 гг. ледник ГПП потерял площадь 0,1 км², а его языковая часть сократилась на 123 метров. В процентах от начальной даты это составляет 14,3% и 10,2 % соответственно. Следовательно, ледник ГПП в период 1968-1976 гг. отступает на 2,2 м/год, с 1982 по 1990 год – на 7,9 м/год [14] и за период 1990-2018 гг. – на 4,4 м/год.

Поскольку ледник ГПП расположен на северных склонах хребта и за этого отступление языковой части наиболее значительное. Отступление ледника с северо-

восточной части объясняется тем, что в этой местности рельеф ледника более мягкий и в летнее время через перевал данного хребта перегоняется скот несколько раз. Именно этот фактор очень сильно влияет на таяние этой части ледника, который и наблюдался, и подтверждался в ходе экспедиции в 2019 году.

Повышение температуры воздуха негативно сказывается на состоянии оледенения повсеместно [8; 11-15]. В наших исследованиях так же зафиксировано повышение среднегодовой температуры воздуха. Хотя тренд температуры воздуха в августе скорее отрицательный (Рис. 3, а). Таким образом, температурное воздействие на ледник концентрируется не на пиковом августе, а распределяется на все тёплые месяцы. В свою очередь воздушные течения приносят тёплый воздух из долины, где число тёплых дней больше.

По воздействию осадков на состояние ледника однозначного мнения нет. Потому что, в районе ледника ГПП достоверно зафиксировано повышение среднегодового объёма осадков и явно виден положительный тренд осадков в августе (Рис. 3, б). Обобщая этот результат можно утверждать наличие двух синхронных трендов деградации ледника ГПП и роста объёма осадков. Для установления функциональной связи необходимы более детальные изучения формы этих осадков и влажности воздуха. Анализ многолетних данных об изменении климатические параметры показывают, что в районе ледника количество осадков увеличилось в теплое время года, то есть в виде дождя. Поэтому летние осадки не компенсируются деградацию ледников, в том числе ГПП.

Заключение. Установлено, что ледник ГПП, Зерафшанского бассейна продолжает сокращаться за период 1970 по 1990 г площадь данного ледника сократился на 0,14 км², за период 1990 на 2018 площади данного ледника сократилась на 0,1 км². Декадная динамика следующая: за 1968-1976 гг. на 18 м, за 1982-1990 гг. – 63 м, за 1990-2000 гг. – 36 м, за 2000-2010 гг. – 42 м и за 2010-2019 гг. – 33,5 м.

Данные сокращение связаны с повышением годовых температур и перераспределением осадков. Это подтверждается анализом многолетних климатических данных в бассейне р. Зерафшан. В частности, повышение годовой температуры воздуха на 1,1°C и прирост суммы осадков на 29,7 мм. Причём наиболее значительный прирост суммы осадков наблюдается в тёплый период года.

Список литературы

1. Золотарёв Е.А. Теоретические основы картографо-аэрокосмических технологий дистанционного мониторинга опасных гляциальных процессов высокогорных геосистем, 2014.
2. Коновалов В.Г. Каталогизация горных ледников и генерализация их распределения по материалам дистанционного зондирования, 2007 // URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2010t2/43-54.pdf
3. Китов А.Д., Плюснин В.М. Сравнение динамики ледников в Гималаях и горах юга Восточной Сибири / Известия Иркут. гос. ун-та. Серия «Науки о Земле», 2019. – Т.29. – С.68-84.
4. Кобляко Р.А. Изменение ледников Центрально Алтая, фиксируемые дистанционными методами, 2014 // URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2014/2504/2200_69000_2760da.pdf
5. Иванов Е.Н. Современные методы наземного изучения горных ледников юга Восточной Сибири // Известия Иркут. гос. ун-та. Серия «Науки о Земле», 2018. – Т.25. – С.54-65.
6. Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадота Т. Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки // Лёд и Снег, 2013. – №4 (124). – С.30-42.

7. Носенко Г.А., Никитин С.А., Хромова Т.Е. Изменение площади и объёма ледников Горного Алтая (Россия) с середины XX в. по данным космических съёмки. Институт географии РАН, Москва 2014 г.
8. Адаменко М.М., Гутак Я.М., Антонова В.А. Изменение климата и размеров ледников в горах Кузнецкого Алатау в 1975-2015 гг. // Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2017.
9. Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // Лёд и Снег, 2018. – Т.58. – №4. – С.462-472.
10. Мандычев Н., Усубалиев Р.А., Азисов Э.А. Изменения ледника Абрамова (Алайский хребет) с 1850 по 2014 гг. // Лёд и Снег, 2017. – №3 – С.326-333.
11. Курбонов Н.Б., Восидов Ф.К., Мирзохонова С., Халимов А.М. Процесс деградации ледников верховья бассейна реки Зерафшан в условиях современного изменения климата // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук, 2019. – №2. – С.58-67.
12. Курбонов Н.Б. Динамика изменения метеорологических условий и их влияние на водные ресурсы бассейна реки Зерафшан // Дисс. на соискание уч. степ. к.тех.н. – Душанбе, 2019 – 156 с.
13. Курбонов Н.Б., Норматов П.И. Мониторинг метеорологических условий и их влияние на состояние ледников бассейна реки Зерафшан // Известия ВУЗов Кыргызстана. – 2015. – №4. – С.82-86.
14. Ледники – водные ресурсы Таджикистана в условиях изменения климата // Главное управление по гидрометеорологии и наблюдениям за природной средой. – Душанбе, 2010. – 34 с.
15. Архивные данные Агентство по гидрометеорологии Республики Таджикистан (дата обращения: ноябрь – декабрь 2019 г.).

A. M. Khalimov¹, N. B. Kurbonov^{2,3}, A. V. Mitusov⁴, F. K. Vosidov¹

¹ Glacier Research Center of the National Academy of Sciences of Tajikistan,
Dushanbe, Tajikistan,

² Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

³ Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy
of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

⁴ Kazakh-German University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: knomvarb.0502@gmail.com

THE STUDY OF STADRESEARCH THE PROCESS OF DEGRADATION OF THE HYDROGRAPHIC PARTY WITH ACCOUNT FOR CLIMATIC OSCILLATION

This article discusses the changes in the average monthly climatic conditions in the area of the Hydrographic Party (HGP) glacier in the period 1990-2018, the influence of synoptic processes on precipitation in the glacial zone in the summer period is estimated. The purpose of this work is a detailed description of the change in the area, and the retreat of the lingual part of the HGP glacier. Landsat satellite images from 1990 to 2018 were used to study the glaciers. And also, our field work during the study of changes in the state of the HGP glacier consists in determining its language using GPS and comparing the data obtained with satellite images of the ArcGIS program.

Keywords: glacier monitoring, glacier degradation, Hydrographic team, Landsat, satellite imagery, climatic oscillation.

Н. Д. Якимов^{1,2}, Е. И. Пономарев^{1,3}, Т. В. Пономарева³

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

³ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Россия

e-mail: nyakimov96@mail.ru, evg@ksc.krasn.ru, bashkova_t@mail.ru

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСТТЕХНОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Предложен метод мониторинга процесса восстановления растительного и верхних горизонтов почвенного покровов в пост-техногенных ландшафтах на основе спутниковых данных в широком спектральном диапазоне, включая данные инфракрасного диапазона. Снижение спектрального альbedo в коротковолновых диапазонах на пост-техногенных участках достигало 45–60% от нормы в течение первых 20 лет. В условиях изменения теплоизолирующих свойств растительности и почвенного покрова оценивалась многолетняя динамика относительных тепловых аномалий. На пост-техногенных участках восстановление теплового режима занимает период >60 лет. Скорость восстановления пост-техногенных территорий зависит от рекультивации. При этом показано, что формируются «нео-техногенные экосистемы» со средним превышением фоновых температур поверхности на 10–13%.

Ключевые слова: Мониторинг, тепловой режим, температура поверхности, техногенные нарушения, спутниковые снимки, пост-техногенные ландшафты, альbedo.

Введение. На значительной территории Сибири наблюдаются повреждения растительного и почвенного покровов. Это связано не только с природными факторами (лесные пожары, энтомофиты, другие естественные процессы), но и с антропогенным воздействием (с/х деятельность, добывающий комплекс и т.д.) [1]. Антропогенное воздействие не так масштабно, относительно природных факторов, однако несет более интенсивные локальные изменения. Одно из таких изменений – это изменение теплового режима, спровоцированное нарушением теплоизолирующих свойств почвенно-растительного покрова. Нарушения происходят в результате механического повреждения [2] и, как следствие снижается отражательная способность поверхностного слоя (альbedo), происходит аномальный прогрев поверхности, относительно смежных, ненарушенных территорий. Такие аномалии могут сохраняться продолжительный срок [3–5]. Спутниковый мониторинг способен повысить эффективность выявления таких нарушений, что важно при исследовании возможных последствий в пространственно-временном масштабе. В настоящее время активно ведется промышленное освоение новых территорий Сибири, включая уязвимые регионы криолитозоны. Мониторинг тепловых режимов ландшафтов, а также разработка дистанционных методов контроля восстановительных процессов является актуальной задачей, которую можно эффективно решать на основе спутниковых данных, доступных в широком диапазоне спектра, включая инфракрасный (ИК) диапазон.

Цель исследования – разработка метода мониторинга долговременного состояния пост-техногенных экосистем с использованием спутниковой съемки среднего пространственного разрешения Landsat, включая тепловой диапазон спектра.

Исходные данные. Для получения спутниковой информации были использованы каталоги данных с сайта геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Использовались снимки среднего пространственного разрешения 30–60 м со спутников Landsat 5–8 в различном диапазоне спектра.

В работе отобраны хроноряды спутниковых данных и восстановлены спектральные характеристики на два варианта территорий с техногенным нарушением покрова. Периодичность съемки составляет 10 лет, с привязкой к выделенным зонам различного срока восстановления. Рассмотрены участки с применением рекультивационных мероприятий (на примере Бородинского угольного разреза) за период 1975–2018 гг. и без применения рекультивационных мероприятий (на примере Олимпиадинского ГОКа) за 1989–2019 гг.

Методы исследования. Выборка спутниковых данных проведена для летнего вегетационного периода (июль), что позволило проследить спорадические максимумы тепловых аномалий. Вычисления температуры подстилающей поверхности проводились по калиброванным данным 6 канала (Landsat-5), 6 канала/1 (Landsat-7) и 10 канала (Landsat-8). Усреднение совокупности данных Landsat в тепловом диапазоне (канал B6 – Landsat-5/TM, $\lambda = 10.4\text{--}12.5$ нм; канал B10 – Landsat-8/OLI, $\lambda = 10.6\text{--}11.9$ нм) позволяют построить карты теплового состояния исследуемых локальных участков. Температурные замеры проводились по всем точкам в границах нарушенной территории для сроков 1, 5, 10, 15, 20, 40, 60 лет после воздействия деструктивных факторов. Аналогичные замеры проведены для участков фоновой растительности в непосредственной близости к пост-техногенным участкам. Использование ГИС-программы ArcMap позволило рассчитать точные усредненные значения по большому количеству исходных данных на выделенных участках. Для нивелирования влияния отдельных абсолютных значений в работе, динамику температуры и альbedo поверхности на нарушенных участках рассматривали относительно показателей для фоновой растительности, в процентах к статистической норме. Расчет альbedo проводился по данным 1, 2 спектральных каналов MODIS (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>).

Результаты. Снижение спектрального альbedo поверхности на пост-техногенных участках вследствие механического повреждения поверхностного слоя почвы провоцирует избыточный прогрев подстилающей поверхности, сохраняющийся десятилетиями. Такой эффект проявляется в летний, поздний весенний и ранний осенний вегетационный период при положительных температурах воздуха. Аномалии и динамика восстановления альbedo зависит от варианта рекультивационных процедур на пост-техногенной территории (Рисунок А, Б). Относительные аномалии альbedo в 1 канале составляли до 17–20% на ранних этапах (1–5 лет). Для значений во 2 канале диапазон аномалий составлял 47–51%. На рекультивируемых участках наблюдается последующее экспоненциальное выравнивание до нормы в течение ~15 лет (Рисунок А, Б, кривая 2). В условиях отсутствия рекультивации и неудовлетворительном естественном восстановлении выравнивания аномалий альbedo не наблюдается (Рисунок А, Б, кривая 1). При анализе температурных данных выявлено, что значения тепловых аномалий в течение первых лет могут достигать 70–100%. В течение 40 лет такие аномалии снижаются до ~18%. Но даже после 60 лет

восстановления уровень аномалии был значимым (до 10–13% относительно фона). Отмечается, что такой высокий уровень относительной аномалии на техногенных участках сохраняется вдвое дольше, чем на участках подверженных пожарам, где восстановление идет естественным образом [6]. На основе долговременных хронорядов установлено, что в пост-техногенных экосистемах свойства верхних горизонтов почв длительное время не восстанавливаются до фонового уровня [2; 7] и тепловые режимы остаются значимо аномальными на срок более 60 лет. Период стабилизации параметров наблюдается только к 40–60 году (Рисунок В). Таким образом, можно говорить о формировании нео-техногенных экосистем с особыми тепловыми режимами почв, отличающимися от фоновых.

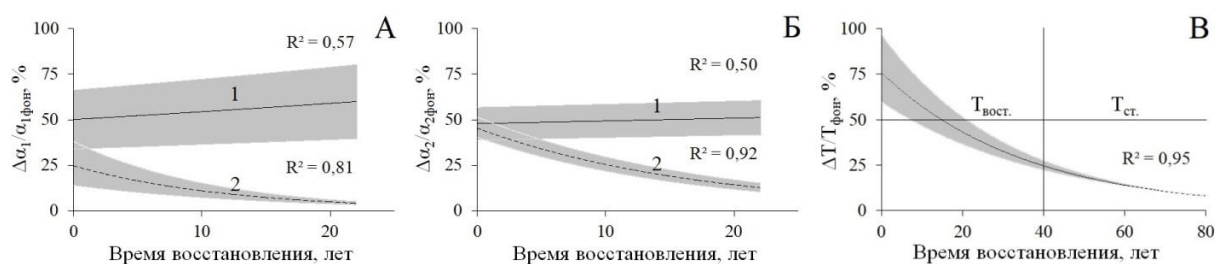


Рисунок. Долгосрочная динамика восстановления относительного спектрального альbedo в 1 канале (А) и 2 канале (Б) для участков с рекультивацией (1) и без рекультивации (2); относительной температурной аномалии на пост-техногенных участках.

Выводы. В условиях повышенной инсоляции на пост-техногенных участках наблюдаются более контрастные условия по сравнению с фоном, а процессы восстановления теплового режима занимают более 60 лет. Формируются «нео-техногенные экосистемы», характеризующиеся особыми тепловыми режимами почв, отличными от фоновых. Таким образом, мониторинг поверхностных тепловых аномалий может быть использован в качестве дополнительного диагностического критерия состояния пост-техногенных экосистем в контексте развития территорий.

Предлагаемый подход, основанный на использовании теплового диапазона, расширил предел дистанционного мониторинга состояния нарушенных экосистем до 20-40 лет с возможностью контроля и прогнозирования динамики восстановительных процессов.

Работа выполнена при поддержке: РФФИ-КФН №20-44-242002 Инструментальный мониторинг физических свойств и численное моделирование состояния техногенно-нарушенных почв Сибири.

Список литературы

1. Uzarowicz, Ł., Charzyński, P., Greinert, A., Hulisz, P., Kabała, C., Kusza, G., Kwasowski, W., and Pędziwiatr, A. Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives. *Soil Science Annual*. 2020. Vol. 71(4), P. 281–299.
2. Ponomareva T.V., Kovaleva N.M., Shishikin A.S., Ponomarev E.I. Biodiversity assessment in the area of Olimpiada mining and processing plant, Polyus Krasnoyarsk // *Gornyi Zhurnal*. 2020. 10. 48–53. DOI: 10.17580/gzh.2020.10.02
3. Kirryanov, A., Saurer, M., Siegwolf, R., Knorre, A., Prokushkin, A.S., Churakova, O., Fonti, M.V., Büntgen, U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // *Env. Res. Let.* 2020. #15, 034061.

4. Ponomarev E.I., Masyagina O.V., Litvintsev K.Y., Ponomareva T.V., Shvetsov E.G., Finnikov K.A. The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia // *Forests*. 2020. Vol. 11 (8), 790.

5. Безкоровайная И. Н., Борисова И. В., Климченко А. В., Шабалина О. М., Захарченко Л. П., Ильин А. А., Бескровный А. К. Влияние пирогенного фактора на биологическую активность почв в условиях многолетней мерзлоты (Центральная Эвенкия) // *Вестник КрасГАУ*. 2017. № 9. С. 181–189.

6. Yakimov N.D., Ponomarev E.I. Dynamics of post-fire effects in larch forests of central Siberia based on satellite data // *E3S Web Of Conferences*. 2020. 03008

7. Пономарева Т.В., Пономарев Е.И., Шишкин А.С. Трансформация почвенного покрова в горно-таежной зоне Средней Сибири при разработке месторождений золота // *Мат. междунар. конф. «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2020»*. Севастополь: СевГУ. 2020. С. 447–450. ISBN 978-5-6044481-3-7.

N. D. Yakimov^{1,2}, E. I. Ponomarev², T. V. Ponomareva²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», Krasnoyarsk, Russia
e-mail: nyakimov96@mail.ru, evg@ksc.krasn.ru, bashkova_t@mail.ru

REMOTE MONITORING OF THE STATE OF POST-TECHNOGENIC TERRITORIES BASED ON SPECTRAL CHARACTERISTICS

A method was proposed for monitoring the process of vegetation and upper soil layers restoration in post-technogenic landscapes based on satellite data of a wide spectral range, including infrared bands data. The spectral albedo in the short-wave ranges decrease was 45-60% in the post-technogenic areas during the first 20 years. Surface thermal anomalies were evaluated under the conditions of changes in the heat-insulating properties of vegetation and soil cover. In post-technogenic areas, the restoration of the thermal regime takes a period of >60 years. The rate of recovery of post-technogenic territories depends on reclamation. [Neo-technogenic ecosystems are being formed with an average excess of background temperatures by 10–13%.

Keywords: Monitoring, thermal regime, surface temperature, technogenic disturbances, satellite images, post-technogenic landscapes, albedo.

