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

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы IX Международной научной конференции
Красноярск, 13–16 сентября 2022 г.

Электронное научное издание

Научный редактор
Е. А. Ваганов

При поддержке Краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности»

Красноярск
СФУ
2022

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 IX Междунар. науч. конф. Красноярск, 13–16 сентября 2022 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Электрон. дан. (21,8 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2022. – 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.

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, 2022

Конференция проводится при поддержке Правительства Красноярского края, Госкорпорации «Роскосмос», ФГБУН ИКИ РАН

Конференция проводится в рамках выполнения гранта, предоставленного в форме субсидии на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития в рамках подпрограммы «Фундаментальные научные исследования для долгосрочного развития и обеспечения конкурентоспособности общества и государства» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации», проект *«Социально-экономическое развитие Азиатской России на основе синергии транспортной доступности, системных знаний о природно-ресурсном потенциале, расширяющегося пространства межрегиональных взаимодействий», номер соглашения с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации* № 075-15-2020-804 *(внутренний номер гранта № 13.1902.21.0016)*

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 9

Балашов И. В., Бурцев М. А., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Прошин А. А., Сенько К. С.
Спутниковый мониторинг пожаров в ИСДМ «Рослесхоз»: история, текущее состояние и перспективы развития 9

Бышев В. И., Гусев А. В., Сидорова А. Н.
Концептуальные основы физической модели современного климата 13

Дмитриев Е. В., Говедар З., Мельник П. Г., Зотов С. А.
Оценка изменений состояния насаждений ели Панчича вследствие воздействия лесных пожаров 17

Козлов И. Е., Плотников Е. В., Михайличенко Т. В., Атаджанова О. А., Артамонова А. В., Кузьмин А. В., Петренко Л. А., Жук Е. В.
Спутниковый мониторинг динамических процессов в арктических морях 24

Пономарев Е. И., Забродин А. Н., Якимов Н. Д.
Мониторинг воздействия пожаров и послепожарного восстановления растительности с использованием спектральных индексов по спутниковым данным 28

Рябинин И. В., Романов Д. А., Хвостов И. В., Трошкин Д. Н., Романов А. Н.
Некоторые результаты дистанционного микроволнового мониторинга засух на юге Западной Сибири 33

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ 37

Бронов С. А., Заболотский И. А., Зазнобина А. В., Лукьянов Д. В.
Система моделирования электроприводов аппаратуры в спутниках для дистанционного зондирования Земли 37

Бронов С. А., Никулин Н. А., Чумакова Е. П., Чумаченко А. А., Вайман М. Е.
Системы управления электроприводами сервисных систем космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли 41

Варламова Е. В., Соловьев В. С.
Исследование тенденции начала вегетационного сезона по индексу NDVI 45

Дубровин К. Н., Степанов А. С., Верхотуров А. Л.
Классификация земель сельскохозяйственного назначения с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса 49

Корляков Д. С., Литвинов С. В.
Приемные и передающие антенны современного ионозонда 53

Литвинов С. В., Милорадов Г. А., Авдеев К. В.
Построение региональных сетей наземных ионосферных станций 57

Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев И. А., Токарева О. С., Мачука К. Р., Осипова В. В.
Полносверточные нейронные сети для классификации поврежденных деревьев сосны сибирской кедровой на изображениях с БПЛА 61

Павлов А. В., Никитин И. А., Гронь А. В., Головина Т. Ю.
Федеральный фонд данных ДЗЗ из космоса. Особенности предоставления данных ДЗЗ физическим и юридическим лицам 65

Павлова Е. В., Алсынбаев К. С.
ГИС-проект «Растительность Республики Хакасия» как основа формирования природного каркаса территории 68

Скрипачев В. О., Авдеев К. В., Гельфман Т. Э.
Учебно-научный центр РТУ МИРЭА – ионосферный мониторинг и дистанционное зондирование Земли 73

Шелопут Т. О.
Методика постановки условий на открытых боковых границах на основе вариационной ассимиляции данных 77

Ширшова В. Ю.
Физико-географическая характеристика территории как основной фактор выбора параметров интерферометрической пары 81

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ 84

Агошков В. И., Шутяев В. П., Пармузин Е. И., Захарова Н. Б., Шелопут Т. О., Лёзина Н. Р.
Вариационное усвоение данных наблюдений со спутников для модели динамики Черного моря 84

Васильев Е. Н., Макаров Д. С., Подопригора В. Г., Реушев М. Ю., Сорокин А. В.
Исследование состояния льда с использованием метеоданных и рефлектометрии сигналами навигационных спутников L1-диапазона 88

Данилова И. В., Буренина Т. А.
Оценка эвапотранспирации для лесных экосистем бассейна реки Подкаменная Тунгуска 92

Добронец Б. С., Кемельбаева А. Р.
Новые подходы в регрессионном анализе данных ДЗЗ 97

Добронец Б. С., Попова О. А., Мерко А. М.
Визуальная аналитика в задачах обработки данных дистанционного зондирования Земли 101

Дунаева А. В.
Обзор общедоступных инструментов для сегментации объектов на спутниковых снимках 105

Литвинов С. В., Полевода Ю. А., Салеев В. Ю., Горбунов Р. В.
Зондирование ионосферы радиозатменным методом с использованием ГНСС .. 109

Мамаш Е. А., Пестунов И. А., Кудряшова С. Я., Чумбаев А. С.
Валидация температурных продуктов MODIS/(Terra+Aqua) LST с использованием наземных данных 113

Матузко А. К.
Обработка спутниковых наборов данных Landsat 8 C2L2 для определения температуры поверхности 118

Перфильев Д. А.
Технология управления сегментацией изображения 122

Подольская Е. С., Ершов Д. В., Ковганко К. А.
Зонирование лесов Красноярского края на основе данных по инфраструктуре и лесным пожарам 126

Попов С. Е., Замараев Р. Ю., Миков Л. С.
Обнаружение оползней и оползневых зон на бортах карьеров по данным радарной интерферометрии 130

Романов Д. А., Рябинин И. В.
Некоторые особенности сезонных вариаций температуры в штамбе дерева 135

Саринова А. Ж.
Обработка и кодирование аэрокосмических изображений на борту космического аппарата 139

Скрипачев В. О.
Результаты обработки спутниковых данных извержения вулкана 14 января 2022 года 144

Стальмак А. В., Голюков А. С.
Исследование продуктивности пройденных огнем лесных территорий с СФО по материалам спутниковой съемки 148

Удод А. В., Маглинец Ю. А.
Автоматизация детектирования зарастаний просек ВЛЭП по космическим снимкам высокого разрешения 152

Хамедов В. А.
Применение радарных данных Sentinel-1 для оценки состояния растительного покрова 155

Харламов Д. В., Реушев М. Ю., Борисов А. Н., Подопригора В. Г., Сорокин А. В.
Радиопросвечивание древостоев сосны и березы сигналами навигационных спутников L1-диапазона 159

Хмельнов А. Е., Гаченко А. С.
Возможные источники информации о подводном и прибрежном рельефах и построение комплексной модели на основе этих данных 163

Шляхова М. М., Дедкова В. В.
Контроль состояния защитных сооружений магистральных трубопроводов по материалам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна Геоскан 401 167

Шушпанов А. С., Голюков А. С., Петров И. А.
Горимость северных сосняков Сибири в меняющемся климате 170

Якубайлик О. Э., Ромасько В. Ю., Павличенко Е. А., Ерунова М. Г., Кузнецова А. С.
Автоматизация расчета NDVI по спутниковым данным Landsat/Sentinel 174

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ 178

Белолипецкий В. М., Генова С. Н.
Оценка термической структуры атмосферы над г. Красноярском 178

Белоносов А. Ю., Кудрявцев А. Е.
Тектоническое дешифрирование материалов ДЗЗ из космоса при оценке перспектив нефтегазоносности (на примере центральных районов Западно-Сибирской плиты) 182

Болданова Е. В.
Моделирование изменения береговой линии оз. Байкал при разных уровнях воды 187

Верхошенцева С. Л., Непомнящий О. В., Ципотан А. С.
Система для обнаружения эмиссий метана 191

Володько О. С., Дергунов А. В.
Дисперсионный анализ зависимости концентрации взвешенных частиц $PM_{2.5}$ в атмосфере г. Красноярска и метеоусловий 195

Газимов Т. Ф., Антипова Д. В.
Исследование поверхностного городского острова тепла с использованием локальных климатических зон 199

Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Тутубалина О. В., Середа И. И., Зимин М. В., Пачкин А. А.
Разработка методов диагностики основных возбудителей болезней озимой пшеницы с использованием наземных и авиа-спектральных измерений и дистанционных средств мониторинга 203

Дергунов Д. М., Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Лежнин С. А.
Оценка динамики фитомассы лесов Пензенской области по спутниковым снимкам Landsat 208

Дергунов А. В., Якубайлик О. Э.
Влияние метеорологических факторов на экологическое состояние атмосферы в Красноярске 211

Долгова Н. В., Волкова М. А.
Оценка продуктивности растительности по данным спутниковой информации . 215

Евстратова Л. Г., Антошкин А. А.
Оценка степени зарастания залежных земель по многоспектральным космическим снимкам с помощью метода, основанного на вейвлет-анализе 219

Захарова Н. Б., Пармузин Е. И., Шелопут Т. О., Агошков В. И., Лёзина Н. Р.
Интеграция ИВС «ИВМ РАН – Черное море» с ЦКП «ИКИ – Мониторинг» 223

Им С. Т.
Динамика лесных территорий республики Хакасия и климатические тренды 227

Имашев С. А., Свердлик Л. Г.
Исследование атмосферных и ионосферных аномалий, предшествующих низкоширотному землетрясению на Суматре 231

Кашкин В. Б., Одинцов Р. В., Рублева Т. В., Симонов К. В.
Атмосферные колебания температуры во время подготовки байкальских землетрясений 2020–2021 гг. по спутниковым данным 235

Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э.
Применение данных дистанционного зондирования для пространственной оценки экологической обстановки в Красноярске 240

Кремнева О. Ю., Данилов Р. Ю., Тутубалина О. В., Середа И. И.
Изменения спектральных характеристик озимой пшеницы в зависимости от степени развития желтой пятнистости листьев 245

Кулик Е. Н., Байшуаков А. Т.
Применение средств дистанционного зондирования Земли и геоинформационных систем при мониторинге территорий, находящихся под антропогенным воздействием 250

Легостаева Я. Б., Журавлев А. И., Шадринова О. В., Попов В. Ф., Иванов В. А.
Дистанционное зондирование для геоэкологической оценки техногенного воздействия геологоразведочных работ 255

Лозин Д. В., Лупян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Стыценко Ф. В.
Оперативная оценка степени повреждений лесов пожарами на основе данных об интенсивности горения 259

Мальканова А. В., Пономарев Е. И.
Пространственно-временная динамика метеорологических показателей в Восточной Сибири, как фактор изменения горимости в регионе 263

Матузко А. К., Шапарев Н. Я., Якубайлик О. Э.
Летний гидротермический режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС 268

Никитин А. А., Цыпышева И. Л., Мокрин Н. М.
Гидрологические элементы структуры вод, благоприятные для максимальной концентрации тихоокеанского кальмара в северо-западной части Японского моря по данным спутниковых наблюдений в 2018–2022 гг. 272

Свердлик Л. Г.
Аномалии температуры атмосферы, предшествующие крупнейшим землетрясениям Альпийско-Гималайского сейсмического пояса 280

Стародубцев В. С., Соловьев В. С., Васильева С. А.
Предварительные результаты исследования вариаций атмосферного метана в Якутии по данным спутника Sentinel-5P 284

Степанов А. С., Дубровин К. Н., Илларионова Л. В., Фомина Е. А.
Применение данных ДЗЗ в решении задач идентификации и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на Дальнем Востоке 289

Таранюк М. И., Мыльников Ю. П., Полежайкин И. А.
Опыт использования материалов космической съемки в процессе экологического сопровождения нефтегазодобывающих предприятий 293

Томашова А. С., Кужевская И. В.
Использование данных Landsat-8 для оценки агрометеорологических условий степной зоны Хакасии 297

Томшин О. А., Соловьев В. С.
Катастрофические лесные пожары в Якутии в 2021 г. и вариации параметров атмосферы 301

Фёдоров Р. К., Попова А. К., Авраменко Ю. В.
Классификация спутниковых снимков с помощью нейронных сетей 306

Филина Я. А., Дунаева Е. А., Денисов П. В.
Оценка состояния озимых зерновых культур по Республике Крым с помощью сервиса ВЕГА 310

Шляхова М. М., Дедкова В. В.
Контроль состояния защитных сооружений магистральных трубопроводов по материалам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна Геоскан 401 314

УДК 528.88

И. В. Балашов, М. А. Бурцев, Е. А. Лупян, А. А. Мазуров, А. А. Прошин, К. С. Сенько

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

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПОЖАРОВ В ИСДМ «РОСЛЕСХОЗ»: ИСТОРИЯ, ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация. В 2022 г. информационной системе мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз, https://nffc.aviales.ru) исполнится 17 лет с момента ввода в промышленную эксплуатацию. С начала промышленной эксплуатации и по сегодняшний день система позволяет работать по всей территории Российской Федерации и пограничным территориям с оперативной и однородной информацией, необходимой для ведения мониторинга лесных пожаров и их последствий. Состав данных и функционал, используемый для решения задач мониторинга пожаров, непрерывно расширяется, что позволяет системе до настоящего времени оставаться самой крупной промышленной системой мониторинга природных пожаров и их последствий, которые используют службы охраны и защиты лесов, не только в стране, но и в мире. В настоящей работе рассматриваются данные, использующиеся в блоках мониторинга пожаров и их последствий, кратко описывается основной функционал и перспективы развития.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг природных пожаров, дистанционное зондирование, информационные системы, распределенная обработка данных, web-интерфейсы, сверхбольшие архивы данных.

Задача мониторинга пожаров по данным космических наблюдений успешно решается достаточно давно, и к 2003 г. были реализованы различные элементы и методы, которые позволили в 2003–2004 гг. создать, а в 2005 г. ввести ИСДМ-Рослесхоз в промышленную эксплуатацию. С этапами этих работ можно, в частности, ознакомиться в публикации [1]. Регулярный мониторинг и учет пожаров стал возможен, в первую очередь, благодаря появлению хорошо привязанных и устойчивых данных прибора MODIS в 2000 г. В дальнейшем количество таких наборов данных для учета пожаров, а также решения смежных задач по оценке пост-пожарных повреждений и др. постоянно росло. В настоящее время в системе доступны и используются данные более 30 аппаратов, основными источниками данных которых являются Единая система работы со спутниковыми данными «НИЦ «Планета» Росгидромета

© Балашов И. В., Бурцев М. А., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Прошин А. А., Сенько К. С., 2022

(http://moscow.planeta.smislab.ru/) [2] и ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) [3]. В таблице, приведенной ниже, представлено наличие данных, используемых в ИСДМ-Рослесхоз, по годам.

Таблица

Приборы и КА, используемые в ИСДМ в разные годы

Разрешение	Прибор	Спутник / Год	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
>1 км	TROPOMI	Sentinel 5P																	
	OMI	AURA																	
	МСУ-ГС	ELECTRO-L-1,2,3										1		1,2	1,2	2,3	2,3	2,3	2,3
		Арктика																	
	SEVIRI/MVIRI	METEOSAT 7,8,10								7	7	7		8,10	8,10	8,10	8,10	8,10	8,10
	AHI	Himawari -8																	
1 км – 100 м	AVHRR	NOAA 15																	
		NOAA 16																	
		NOAA 17																	
		NOAA 18																	
		NOAA 19																	
	Modis	Terra																	
		Aqua																	
	VGT	SPOT																	
	МСУ-МР	«Метеор-М»,№1																	
		«Метеор-М»,№2																	
		«Метеор-М»,№2-2																	
	VIIRS	SNPP																	
		NOAA20																	
	SLSTR / OLCI	Sentinel 3a																	
		Sentinel 3b																	
	MERSI	FY3D,FY3E																	
100 м – 10 м	TM	Landsat 4, 5																	
	ETM+	Landsat 7																	
	OLI-TIRS, OLI	Landsat 8																	
	OLI	Landsat 9																	
	HRVIR	SPOT																	
	КМСС	«Метеор-М»,№1																	
		«Метеор-М»,№2																	
		«Метеор-М»,№2-2																	
	MSI	Sentiinel 2a																	
		Sentiinel 2b																	
	КШМСА- ВР, СР	«Ресурс-П» № 1,2,3									1	1,2	1,2,3	1,2,3	1	1	1	1	1
	ГСА											1	1						
<10 м	МСС, ПСС	«Канопус-В» №1																	
		«Канопус-В-ИК»																	
		«Канопус-В» № 3,4																	
		«Канопус-В» № 5,6																	
	Геотон-П	«Ресурс-П» № 1,2,3									1	1,2	1,2,3	1,2,3	1	1	1	1	1
Итого в году			9	10	10	11	11	12	11	14	18	20	20	25	25	29	28	30	32

Ядром системы ИСДМ-Рослесхоз является автоматическая система ведения баз данных о пожарах – объектах, которые объединяют в себя выявляемые на сеансах аномальные пиксели (горячие точки) как по пространству, так и по времени. Наличие информации по накопленным границам и активным областям горения пожара на каждый момент времени наблюдения позволяет получать не только текущие данные о пройденных огнем площадях в разрезе необходимых тематических слоев, но и анализировать динамику развития – приросты площадей – от точки регистрации до состояния на момент ликвидации пожара. В настоящее время в ИСДМ-Рослесхоз доступна информация о площадях пожаров в разрезе карт земного покрова, границ субъектов РФ, зон мониторинга за 22 года наблюдения территории России по данным спутниковых приборов MODIS, а с 2017 года – и VIIRS. В дополнение к данным о пожарах, для совместного анализа доступа вся информация о термических аномалиях, формируемая по данным других приборов как Российских, так и зарубежных аппаратов. Такой набор данных совместно с мощными инструментами анализа позволяет решать целый спектр как оперативных задач, так и исследовательских, требующих данных многолетних рядов наблюдений.

Кроме оценки площадей пожаров на основе данных о горении, спутниковые данные в ИСДМ-Рослесхоз применяются и в других сценариях мониторинга. В первую очередь, это различные оценки пост-пожарных повреждений растительности на лесных территориях – гарей, которые проводятся как автоматически, по данным приборов среднего, так и автоматизированно – по данным высокого разрешения.

Использование спутниковых данных для мониторинга пожаров не ограничивается приведенными выше сценариями. Более подробно про решение таких задач на основе данных космических аппаратов в рамках ИСДМ-Рослесхоз можно ознакомиться в публикациях [4].

В заключение следует отметить, что в настоящий момент перед ИСДМ-Рослесхоз возникают новые задачи, связанные как с общим повышением уровня горимости лесов, так необходимостью повышения устойчивости системы путем расширения возможностей ее работы с информацией различных спутниковых систем. Имеющаяся в настоящее время научная и технологическая основа дает возможность решить задачи, в числе которых нужно упомянуть:

- внедрение устойчивых алгоритмов детектирования горячих точек и учета их в пожарах по данным приборов Российского аппарата Метеор 2_2 и аппаратов FY3D, FY3E КНР;
- ввод в эксплуатацию системы первичной оценки повреждений лесного покрова на основе данных об интенсивности горения пожаров [5], позволяющей получать оперативные оценки как потерь непосредственно лесных ресурсов, так и оценки потенциальных выбросов углерода.

Данная публикация подготовлена при поддержке темы «Мониторинг» Минобрнауки (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Список литературы

1. Ковалев Н. А. и др. ИСДМ-Рослесхоз: 15 лет эксплуатации и развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т. 17. № 7. С. 283–291.

2. Лупян Е. А. и др. 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. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

3. Бурцев М. А. и др. Современные возможности и перспективы развития Объединённой системы распределённой работы с данными НИЦ «Планета» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 198–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-198-212.

4. Барталев С. А. и др. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.

5. Лупян Е. А. и др. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.

I. V. Balashov, M. A. Burtsev, E. A. Lupyan, A. A. Mazurov, A. A. Proshin, K. S. Senko

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

SATELLITE FIRES MONITORING IN ISDM «ROSLESKHOZ»: THE HISTORY, CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

In 2022, the information system for monitoring forest fires of the Federal Forestry Agency (ISDM-Rosleskhoz, https://nffc.aviales.ru) will be 17 years old from the date of commissioning. From the beginning of commercial operation to the present day, the system allows you to work throughout the entire territory of the Russian Federation and border areas with operational and homogeneous information necessary for monitoring forest fires and their consequences. The composition of data and the functionality used to solve monitoring problems is constantly expanding, which allows the system to remain the largest industrial system for monitoring natural fires and their consequences, which are used by forest protection and protection services, not only in the country, but also in the world. The paper considers the data used in the blocks for monitoring fires and their consequences, briefly describes the main functionality and development prospects.

Keywords: remote forest fires monitoring, remote sensing, information systems, distributed data processing, web-interfaces, big data archives.

УДК 551.465.7

В. И. Бышев[1], А. В. Гусев[2], А. Н. Сидорова[3]

[1]Доктор физико-математических наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

[2]Кандидат физико-математических наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия

[3]Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: byshev.v@mail.ru

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

Аннотация. Современный климат – это климат текущего столетия с присущими ему характерными особенностями. Океан и атмосфера, при этом, рассматриваются в качестве двух важнейших компонентов климатической системы. Динамика и термодинамика этих сфер отражают текущие возмущения планетарной окружающей среды на внутридекадных (2–8 лет) и мультидекадных (20–60 лет) временных масштабах. Квазисинхронность и глобальность происходящих в современной климатической системе явлений обеспечиваются и сопровождаются выявленными и в атмосфере, и в океане структурами планетарного масштаба: соответственно Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО) и Мультидекадной осцилляцией теплосодержания океана (МОСТОК).

Ключевые слова: современный климат, океан, атмосфера, Глобальная атмосферная осцилляция (ГАО), планетарная океаническая осцилляция, фазы климата.

Введение. Выявленная разнонаправленность изменения климата в океанах и на континентах [1] позволила сформулировать гипотезу о современном внутрисистемном перераспределении тепла между океаном и континентом при посредничестве атмосферы, ее общей циркуляции.

Изменчивость современного климата – это, на текущий момент, одна из наиболее важных проблем в науках о Земле. Вызывают озабоченность наблюдаемые стремительные планетарные изменения природной среды, произошедшие в 1970-е гг. [2] и получившие название «климатический сдвиг». Подобные климатические изменения происходят не только в современной истории (в конце 1930-х – начале 1940-х гг., в середине 70-х гг. прошлого века и на рубеже 20–21 столетий [3], но также имели место в прошлом [4] и, очевидно, будут происходить в будущем. Качественные фазовые переходы природной среды от относительно влажного глобального климата к существенно континентальному, а затем вновь к фазе влажного и т. д. заслуживают специального изучения их природы и источника.

Качественные изменения природной среды сопровождаются их крупномасштабными аномалиями одного или другого знака, а, следовательно, влияют на результаты хозяйственной деятельности не только отдельных регионов, но и целых государств. В связи с этим обсуждаемая проблема является актуальной и представляет существенную фундаментальную значимость и практическую направленность.

© Бышев В. И., Гусев А. В., Сидорова А. Н., 2022

Результаты. Обнаруженная тенденция роста приповерхностной температуры над континентами в XX столетии наблюдалась на фоне снижения температуры над океанами и, напротив, рост ее над океанами – снижением над континентами. Подобное явно указывало на наличие внутрисистемного перераспределения тепла между океаном и континентами, источником которого, очевидно, является Мировой океан. С целью обоснования этой гипотезы были использованы результаты численного моделирования эволюции термодинамического состояния Мирового океана в период с 1948 по 2007 г. [5]. Это позволило обнаружить признаки наличия в Мировом океане локальных источников тепла [6], которые демонстрируют мультидекадные фазы теплонакопления и тепловой разгрузки (рис.), согласующиеся с фазами относительно влажного и континентального климата.

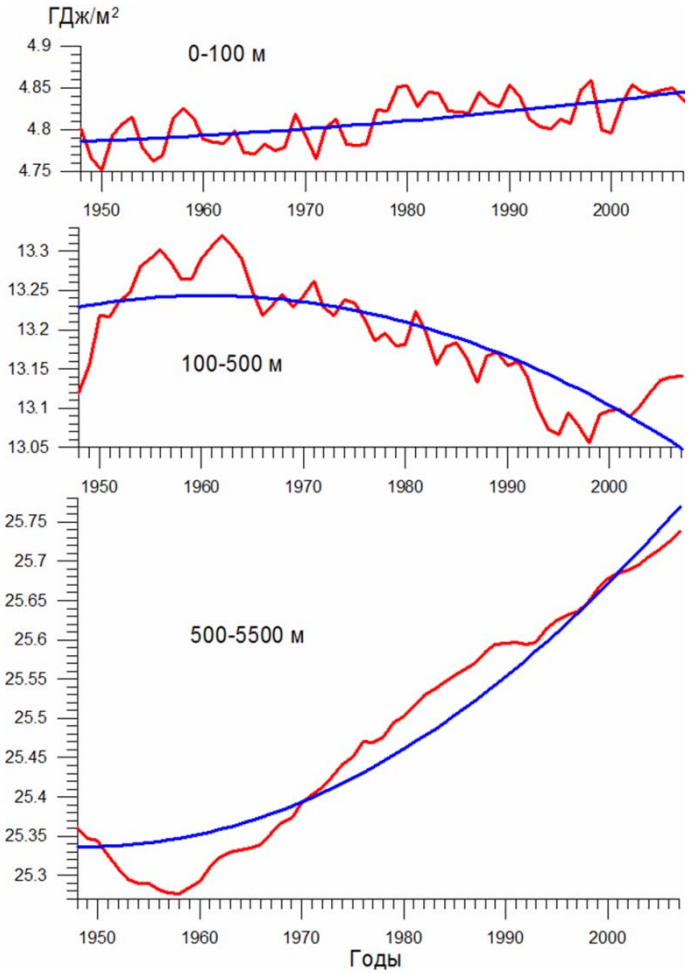


Рис. Изменчивость теплосодержания Мирового океана в период с 1948 по 2007 г.: в верхнем однородном слое (0–100 м), в слое главного термоклина (100–500 м) и в глубинном слое (500–5 500 м)

Фундаментальные процессы, свойственные современной климатической системе, несомненно, должны воспроизводиться высококачественными гидродинамическими моделями в результате численных экспериментов. Естественно, что эти же процессы также должны проявляться и при диагностических вычислениях, и отражаться

в наблюдениях, выполненных в крупных гидрофизических проектах, таких как ПОЛИГОН-70, ПОЛИМОДЕ, МЕГАПОЛИГОН, Атлантэкс-90 и т. д.

Обсуждение и дискуссия. Изменчивость современного климата характеризуется межгодовыми (2–8 лет) и мультидекадными (20–60 лет) возмущениями. В качестве источника межгодовых возмущений глобального климата принято рассматривать явления Эль-Ниньо – Южные Колебания [7]. Однако вопрос о природе самого феномена Эль-Ниньо до настоящего времени остается открытым. Для внутридекадных возмущений климата, очевидно, важную роль играет атмосферный фактор. Междекадные возмущения (20–60 лет) глобального климата, присутствие которых проявилось эпизодически наблюдаемыми его фазовыми сдвигами (в 1935–1940 гг., в середине 70-х гг. прошлого века, на рубеже 20–21-го столетий), реализуются уже при определяющей роли океанического фактора. Надо полагать, что глобальные климатические изменения должны сопровождаться планетарными структурами как в атмосфере, так и в океане. Следует отметить, что признаки наличия таковых содержатся в многочисленных региональных колебаниях, таких как Северо-Атлантическое, Северо-Тихоокеанское, Арктическое, Южное и др.

Численное моделирование эволюции теплосодержания Мирового океана (рис.) позволило выявить важные особенности этого процесса. В частности, было установлено, что мультидекадная осцилляция теплосодержания океана (МОСТОК) обнаруживается в слое главного термоклина (100–500 м), в котором расположены структуры всех основных течений Мирового океана: Гольфстрима, Куросио, Антарктического Циркумполярного и др. Теплосодержание слоя главного термоклина в 50-е – 60-е гг. было относительно высоким, а затем в 70-е гг. оно начало сокращаться и продолжило сокращение в 80-е и 90-е гг. На рубеже 21-го столетия в слое главного термоклина наметился рост теплосодержания. В верхнем квазиоднородном слое (0–100 м), нижней границей которого является сезонный термоклин, и в глубинном слое (500–5 500 м) глубже слоя главного термоклина, в течение всего рассматриваемого периода времени наблюдался рост теплосодержания. Таким образом, МОСТОК представляет собой внутрислойную структуру, что, вероятно, способствовало долгое время её сокрытию. Вместе с тем очевидна связь МОСТОК с фазовыми мультидекадными изменениями климата, в которых она выступает в качестве механизма наблюдаемых мультидекадных возмущениях климата на современном этапе. Можно предположить, что временной масштаб осцилляции определяется временем «зарядки» (теплонакоплением) и «разрядки» (тепловой разгрузки) слоя главного термоклина. Механизмом изъятия тепла из слоя главного термоклина является глубокая конвекция, присутствие или отсутствие которой в информативных районах океана может служить признаком фазового состояния климатической системы.

Заключение. Открытие структур ГАО и МОСТОК позволило пролить свет на природу Эль-Ниньо [8] и мультидекадную фазовую изменчивость современного климата. Одновременно с этим был достигнут определенный прогресс в перспективе прогноза как Эль-Ниньо, так

и мультидекадной изменчивости климата. Стало ясно, что эволюция Эль-Ниньо совершается при активном, а возможно и определяющем, участии атмосферы. В мультидекадных же фазовых процессах глобального климата доминирующую роль, несомненно, играет Мировой океан – вариации его термодинамического состояния.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № FMWE-2021-0003.

Список литература

1. Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А. О существенных различиях крупномасштабных изменений приземной температуры над океанами и материками // Океанология. 2006. Т. 46. № 2. С. 165–177.

2. Minobe S. A. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillation over the North Pacific: role in climatic regime shift // Geophys. Res. Lett. 1999. Vol. 26. P. 855–858.

3. Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А., Серых И. В. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // ДАН. 2011. Т. 438. № 6. С. 817–822.

4. Feng S., Oglesby R. J., Rowe C. M., Loope D. B., Hu Q. Atlantic and Pacific SST influences on Medieval drought in North America simulated by the Community Atmospheric Model // J. Geophys. Res. 2008. 113. D11101. DOI:10.1029/2007JD009347.

5. Byshev V. I., Neiman V. G., Anisimov M. V., Gusev A. V., Serykh I. V., Sidorova A. N., Figurkin A. L., Anisimov I. M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174. No. 7. P. 2863–2878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.

6. Бышев В. И., Фигуркин А. Л., Анисимов И. М. Междекадная изменчивость термической структуры вод верхнего деятельного слоя на северо-западе Тихого океана // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 2. С. 240–244.

7. Brönnimann S. Impact of El Nino Southern Oscillatuon on European climate. Rev. Geophys. 2007. Vol. 45. RG3003. DOI: 10.1029/2006RG000199.

8. Серых И. В. О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 1. С. 14–28.

V. I. Byshev[1], A. V. Gusev[1,2], A. N. Sidorova[1]

[1]Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, Russia
[2]Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: byshev.v@mail.ru, anatoly.v.gusev@gmail.com

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF THE PHYSICAL MODEL OF MODERN CLIMATE

The modern climate is the climate of the current century with its characteristic features. The ocean and the atmosphere, however, are considered as two of the most important components of the climate system. The dynamics and thermodynamics of these spheres reflect the current perturbations of the planetary environment on intra-decadal (2-8 years) and multi-decadal (20–60 years) time scales. Quasisynchrony and globality of the phenomena occurring in the modern climate system are provided and accompanied by planetary scale structures identified both in the atmosphere and in the ocean: respectively, the Global Atmospheric Oscillation (GAO) and the Multidecadal Ocean Heat Content Oscillation (MOHO).

Keywords: modern climate, ocean, atmosphere, Global Atmospheric Oscillation (GAO), planetary oceanic oscillation, climate phases.

УДК 528.8.04, 528.88

Е. В. Дмитриев[1,2], З. Говедар[3], П. Г. Мельник[4], С. А. Зотов[2]

[1]Кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт вычислительной математики РАН», Москва, Россия
e-mail: yegor@mail.ru

[2]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», г. Долгопрудный Московская обл., Россия
e-mail: zotov.sa@mipt.ru

[3]PhD, Университет Баня-Лука, Факультет лесного хозяйства, г. Баня-Лука, Республика Сербская
e-mail: zoran.govedar@sf.unibl.org

[4]Кандидат сельскохозяйственных наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия
e-mail: melnik_petr@bk.ru

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ НАСАЖДЕНИЙ ЕЛИ ПАНЧИЧА ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Аннотация. Рассматривается задача оценки состояния насаждений ели Панчича в районе горы Великий Столац (Сербия), подвергшихся пирогенному воздействию в августе 2021 г. Ель Панчича является реликтовым, исчезающим видом деревьев, занесенным в Красную книгу МСОП. В настоящее время данный вид произрастает в основном в Республике Сербской, а также на территории Боснии и Герцеговины. В данной работе представлен метод поэтапной тематической обработки многовременных многоспектральных изображений Sentinel-2 L2A. На основе данного метода были получены данные по местоположению насаждений ели Панчича в пределах рассматриваемой тестовой территории. Анализ временной динамики вегетационных индексов показал значительное снижение значений NDVI насаждений ели Панчича в течение 2 недель после даты тушения пожара. По полученным оценкам более 80 % данной популяции были уничтожены пожаром, либо получили серьезные повреждения, которые впоследствии могут привести к усыханию древостоя.

Ключевые слова: Дистанционное зондирование, распознавание образов, спутниковые изображения, лесные пожары, ель Панчича.

Ель Панчича (Picea omorika) – один из древнейших видов деревьев европейских лесов, была обнаружена во второй половине 19 века в районе деревни Заовине (Сербия) [1]. Исследования ископаемых остатков указывают, что ранее данный вид занимал значительные площади на территории Европы, однако в дальнейшем его ареалы произрастания существенно сократились и в настоящее время ель Панчича является реликтовым эндемичным видом Балканского полуострова. Ель Панчича занесена в Красную книгу МСОП как вид, находящийся под угрозой исчезновения. Основной ареал ели Панчича ограничен относительно узким

© Дмитриев Е. В., Говедар Р., Мельник П. Г., Зотов С. А., 2022

участком среднего и верхнего течения реки Дрина, протекающей вдоль границы между республикой Босния и Герцеговина и Республикой Сербской. Ареал составляют 26 небольших изолированных групп различного размера, которые могут содержать как несколько особей Picea omorika, так и популяции около 1 000 деревьев.

Ель Панчича чувствительна к различным негативным воздействиям биотической и абиотической природы, в связи с чем в последнее время происходит постоянное сокращение площади насаждения. Основными причинами деградации данного вида являются изменение климата, поражение стволовыми вредителями и воздействие пожаров. В пустошах, образовавшихся после пожара или в результате ветровала, происходит заселение чистых насаждений ели Панчича другими конкурирующими видами деревьев, такими как ель и бук, что приводит к образованию смешанных древостоев и постепенному замещению исходного вида [2, 3]. Исследования прироста ели Панчича в естественных местообитаниях показали более низкую продуктивность, чем у ели европейской [4].

Процессы, происходящие в последнее время в связи с глобальным потеплением климата, повлекли за собой увеличение пожарной опасности в труднодоступных местообитаниях ели Панчича [5]. В середине 20 века были зафиксированы довольно крупные пожары, в результате которых были уничтожены насаждения ели Панчича в районах горы Явор и Смрчево Точило [6]. Кроме поражения самих деревьев, пожары изменяют физико-химические и биологические свойства лесных почв: происходит выгорание гумусовых веществ, повышение pH, снижение ферментативной активности [7]. Такие изменения почв часто влекут за собой изменение видового состава древостоев.

Для поддержания процессов естественного возобновления лесов после пирогенного воздействия, помимо наблюдения за плодоношением взрослых деревьев, большое значение имеет оценка их жизненного состояния. Традиционно определение жизненного состояния древостоев производится в ходе наземных обследований, проведение которых связано со значительными временными затратами. Применяемые при этом методы основываются на глазомерном способе с использованием систем классификации, адаптированных для нужд лесоводства и лесоохраны [8]. Использование данных спутникового зондирования и соответствующих методов автоматизированной обработки позволяет своевременно актуализировать информацию о состоянии лесных территорий, что имеет особое значение для исчезающих и редких лесных экосистем.

Одна из самых значительных популяций ели Панчича находится в районе горного массива Великий Столац, который расположен в восточной части Боснии и Герцеговины недалеко от реки Дрина [9]. Район исследования находится на высоте около 1 100–1 500 м, занимает площадь 40,8 га и относится к Столацкому реликтовому сектору Иллирийской провинции [10]. Местоположение района исследования представлено на рис. 1.



Рис. 1. Местоположение территории исследования Великий Столац.
Красной линией на RGB изображения выделен ареал наиболее крупной популяции ели Панчича в данном районе

Для данной местности характерно большое количество осадков в весенние и летние месяцы. Среднегодовое количество осадков в период 1961–1990 гг. составляет 1 009 мм, а среднее количество осадков за вегетационный период (с апреля по сентябрь) – 562 мм. Среднегодовая температура воздуха за указанный период составляет 5.9 °C. Средняя температура воздуха за вегетационный период составляет 11.3 °C. Геологическую основу составляют известняки среднетриасовой формации, образующие гряды и скальные выступы. Почвенный слой имеет малую или среднюю глубину, без четкой структуры с вкраплениями известняков. Содержание гумуса колеблется от 10,71 % на глубине 20 см, до 8,83 % на глубине 20–40 см. Реакция почвы кислая на глубине около 15 см.

Ель Панчича произрастает на данном участке в смеси с елью европейской. Древостои располагаются между скальными грядами. Представленность ели Панчича в смеси довольно велика и колеблется

в пределах 60–80 %, при этом насаждения образуют кластеры с чистым видовым составом. Незадолго до Второй мировой войны в районе Великий Столац была проведена инвентаризация елей Панчича. Согласно полученным данным в рассматриваемом районе насчитывается около 38 000 взрослых деревьев, часть из которых имеет довольно крупные размеры. По современным оценкам популяция сократилась до 10 000 деревьев.

Для определения насаждений ели Панчича на рассматриваемой территории использовались многовременные мультиспектральные изображения Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м за период с 2016 по 2022 гг. Изображения были приведены к уровню обработки L2A – отражательная способность на нижней границе атмосферы. В качестве признаков использовались значения NDVI. Классификация проводилась с помощью метода самокорректирующихся кодов с использованием метода опорных векторов в качестве базового бинарного классификатора. Для решения данной задачи были выбраны только безоблачные сцены. Результаты представлены на рис. 2. По данным классификации, общая площадь популяции ели Панчича на рассматриваемой тестовой территории составляет 30,5 Га.

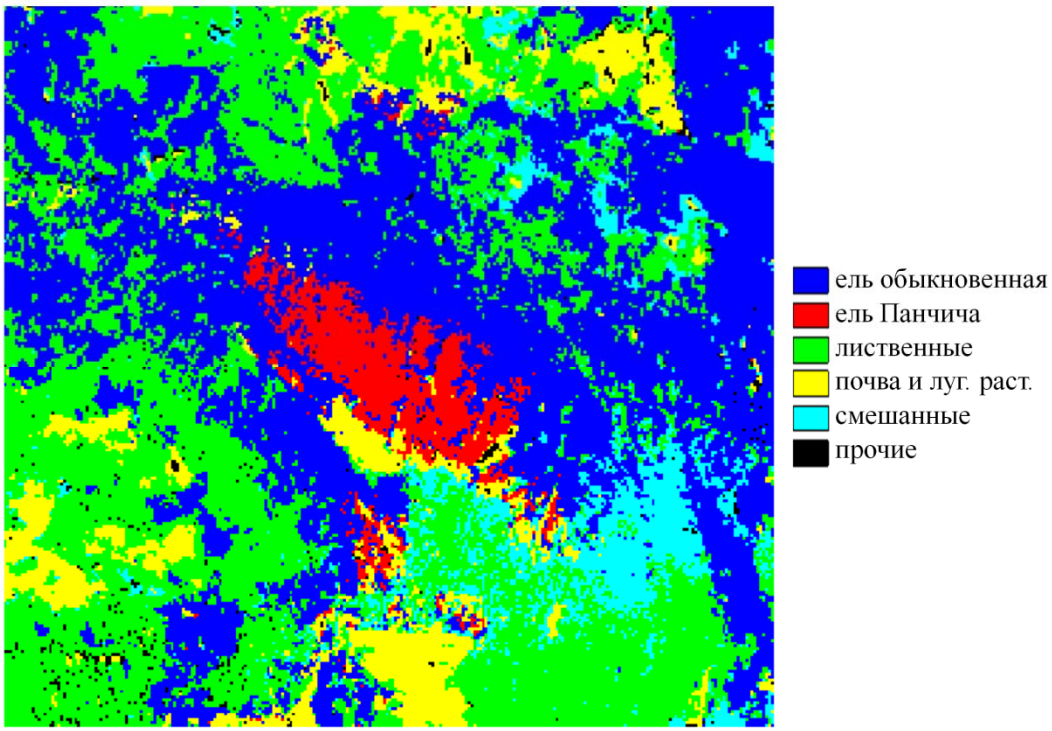


Рис. 2. Классификация основных типов объектов тестовой территории по данным Sentinel-2. Насаждения ели Панчича выделены красным цветом

Общая схема тематической обработки состоит из нескольких этапов. На первом этапе строится маска вечнозеленых пород деревьев по изображениям, полученным в период с конца октября по середину апреля. В условиях сложной орографии, процессы вегетации листопадных деревьев и луговой растительности существенно зависят от высоты над уровнем моря. Таким образом, для повышения точности мы использовали

несколько изображений от 22.10.2019, 20.03.2020 и 09.04.2020. На следующем этапе происходит классификация хвойных пород. В нашем случае это ель обыкновенная и ель Панчича. Наиболее информативными оказались снимки от 02.09.2017, 17.09.2019 и 08.08.2019. Далее, на основе изображений от 02.09.2017, 12.09.2018 и 13.08.2019 классифицировались лиственные породы, луговая растительность и открытые почвы. Полученные данные классификации были использованы при расчете временной динамики индексов NDVI (Normalized difference vegetation index) и NBR (Normalized Burn Ratio). Результаты представлены на рис. 3.

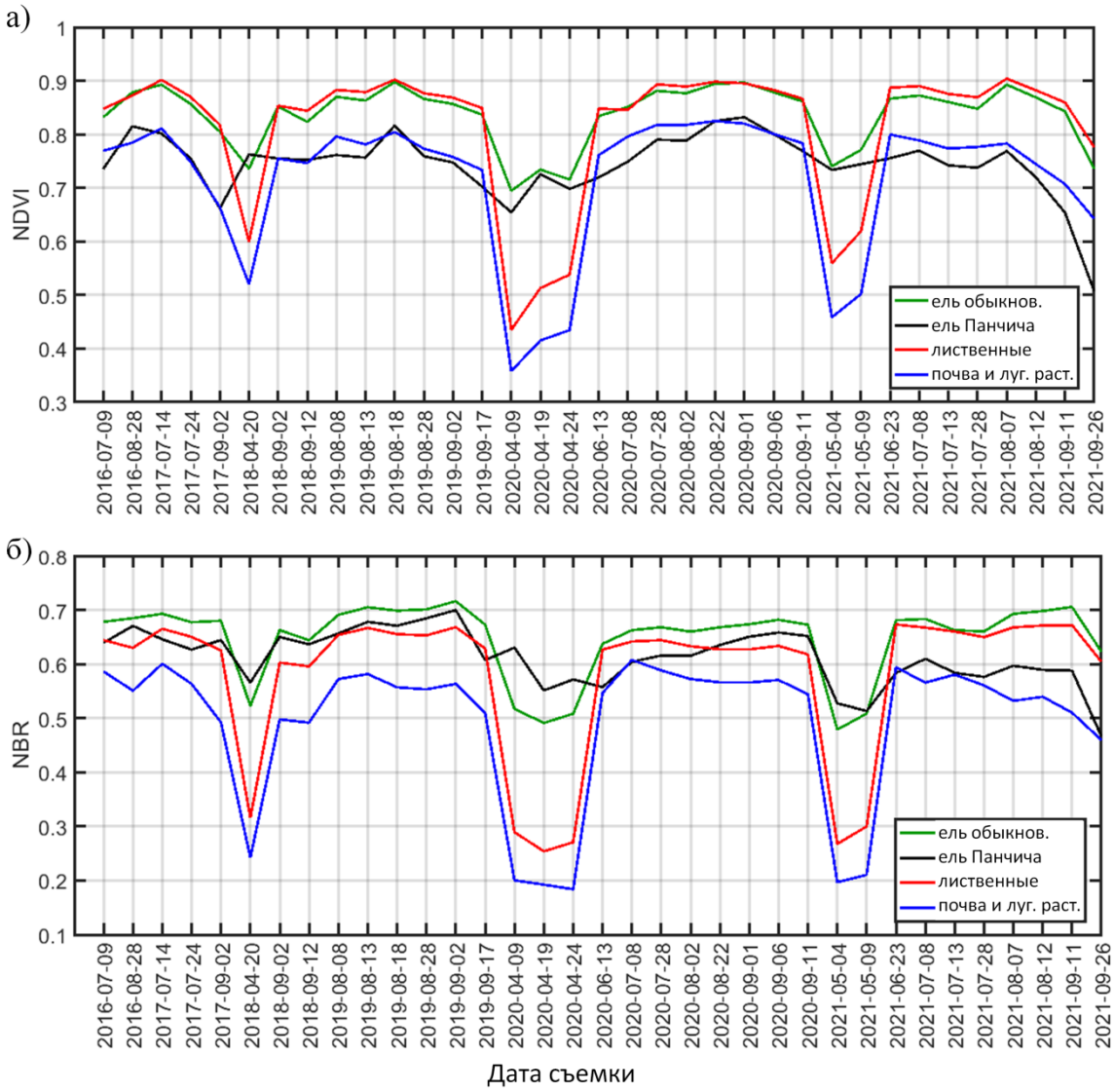


Рис. 3. Динамика NDVI и NBR основных объектов тестовой территории по данным Sentinel-2

В августе 2021 г. почти весь район Великий Столац был охвачен лесным пожаром. Пожар начался 27 июля и продолжался до 6 сентября. В соответствии с рис. 3, после тушения пожара наблюдается резкое понижение среднего значения NDVI. Индекс NBR снижается менее заметно, спустя 2 недели после тушения. Результаты классификации повреждения насаждений ели Панчича представлены на рис. 4.

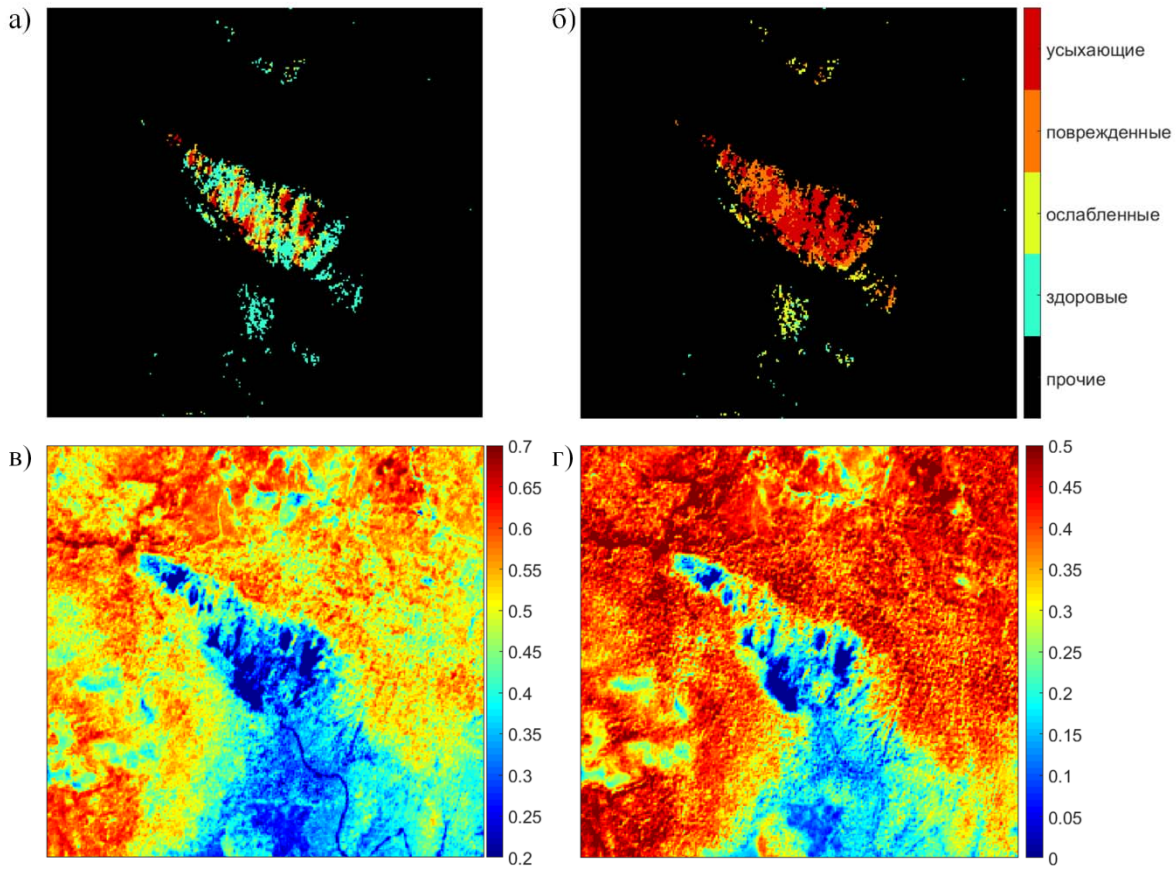


Рис. 4. Оценка повреждения насаждений ели Панчича по данным Sentinel-2: *а* – градации повреждения по NDVI на 2021-09-11; *б* – градации повреждения по NDVI на 2021-09-26; *в* и *г* – значения NDVI и NBR, соответственно, на 2022-05-19

Пороговые значения были получены по снимкам за годы, предшествующие пожару. В соответствии с рис. 4, *а*, наибольшие повреждения приходятся зоны активного верхового пожара. При этом около половины площади насаждений относятся к классу здоровых, поскольку соответствующие значения NDVI находятся в интервале возможных значений (при сравнении с данными рис. 3, *а*).

Спустя две недели (рис. 4, *б*), площадь здоровых древостоев снижается до 1 га, при этом около половины насаждений классифицируются как усыхающие, что соответствует наземным оценкам площади верхового (10,9 га) и низового (5,9 га) пожаров. По нашим оценкам, площадь ослабленных древостоев составляет 3,9 Га и около 10,3 Га имеют серьезные повреждения. По данным за май 2022 г. (рис. 4, *в*, *г*), большая часть насаждений ели Панчича также имеют значения NDVI ниже 0,4. Площади со значениями NBR ниже 0,1 также, видимо, соответствуют территориям гарей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 20-07-00370 «Фундаментальные проблемы повышения информативности обработки данных оптоэлектронных авиакосмических устройств высокого пространственного и спектрального разрешения».

Список литературы

1. Pančić J. Omorika nova fela četinara u Srbiji. Težak, Beograd. 1887. XVIII(1). P. 1–8.

2. Ballian D. Kontrola podrijetla pančićeve omorike (Picea omorika /Panč./ Purk.) iz plantaže kod Kaknja pomoću izoenzimskih biljega // Šumarski list. 2006. V. 130. P. 295–304.

3. Burschel P. Die Omorikafichte // Forstarchiv. 1965. Vol. 36. P. 113–131.

4. Stojanović O. Prirast i oblik stabala Pančićeve omorike na njenom prirodnom staništu. Radovi Šumarskog fakulteta i Instituta za šumarstvo i drvnu industriju u Sarajevu. 1959. Vol. 4. P. 164–187.

5. Wang S., Li H., Niu S. Empirical research on climate warming risks for forest fires: A case study of grade I forest fire danger zone, Sichuan Province, China // Sustainability. 2021. Vol. 13, № 14. P. 7773.

6. Fukarek P. Staništa Pančićeve omorike nakon šumskih požara u 1946/47 godini // Šumarski list. 1951. Vol. 75. P. 61–75.

7. Woodmansee R. G., Wallach L. S. Effects of fire regimes on biogeochemical cycles. Fire Regimes and Ecosystem Properties: Proceedings of the Conference. General Technical Report WO-GTR-26 [Washington, D.C.]. USDA Forest Service. 1981. P. 379–400.

8. Govedar Z., Krstić M., Stanivuković Z. Categorisation of trees in serbian spruce natural stands in the region of Govza in the Republic of Srpska // Proceedings International scientific conference «50 years University of Forestry». Faculty of Forestry, 1–2 April, Sofia, Bulgaria. 2003. P. 96–101.

9. Mataruga M., Milanović D. Prirodne populacije Pančićeve omorike u Republici Srpskoj (Bosna i Hercegovina) // Glasnik Šumarskog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci. 2020. Vol. 30. P. 77–113.

10. Dizdarević M., Lakušić R., Grgić P., Kutleša L., Pavlović B., Jonlija R. Ekološke osnove poimanja reliktnosti vrste Picea omorica Pančić // Bilten Društva ekologa BiH, Serija A. 1984. Vol. 2. P. 7–56.

E. V. Dmitriev[1,2], Z. Govedar[3], P. G. Melnik[4], S. A. Zotov [2]

[1]Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: yegor@mail.ru

[2]Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow reg., Russia
e-mail: zotov.sa@mipt.ru

[3]University of Banja Luka, Faculty of Forestry Banja Luka, Banja Luka, Republic of Srpska/Bosnia and Herzegovina
e-mail: zoran.govedar@sf.unibl.org

[4]Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
e-mail: melnik_petr@bk.ru

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE STATE OF THE PICEA OMORIKA STANDS DUE TO THE IMPACT OF FOREST FIRES

The problem of assessing the state of Pančić spruce stands located in the area of the mountain Veliki Stolac (Serbia), subjected to pyrogenic effects in August 2021, is considered. Pančić spruce is a relict, endangered tree species listed in the IUCN Red List. Currently, this species grows mainly in the Republika Srpska, as well as in Bosnia and Herzegovina. This paper presents a method for the stage-by-stage thematic processing of multitemporal Sentinel-2 L2A multispectral images. This method was used for obtaining the data on the location of Pančić spruce within the considered test area. An analysis of the temporal dynamics of vegetation indices showed a significant decrease in the NDVI values of Pančić spruce stands within 2 weeks after the date of fire extinguishing. According to estimates obtained, more than 80% of this population was destroyed by fire, or received the serious damage, which can subsequently lead to the drying of the Pančić spruce stands.

Keywords: Remote sensing, pattern recognition, satellite images, forest fires, Picea omorika.

УДК 551.465, 551.466, 528.88

И. Е. Козлов, Е. В. Плотников, Т. В. Михайличенко, О. А. Атаджанова, А. В. Артамонова, А. В. Кузьмин, Л. А. Петренко, Е. В. Жук

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Россия
e-mail: ik@mhi-ras.ru

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

Аннотация. В работе излагается многолетний опыт и результаты применения спутниковых радиолокационных (РЛ) измерений для определения «горячих точек» образования и основных характеристик мезо- и субмезомасштабных динамических процессов верхнего слоя арктических морей, диагностика которых на основе прямых измерений и численного моделирования крайне затруднены на сегодняшний день. Анализ квазисинхронных спутниковых РЛ-измерений, доступных в последние годы, позволяет на регулярной основе получать данные о кинематике и эволюции этих процессов на акватории Северного Ледовитого океана (СЛО), являясь ценным источником информации для валидации численных моделей динамики СЛО.

Ключевые слова: океанские вихри, короткопериодные внутренние волны, динамика океана, радиолокаторы с синтезированной апертурой, Арктика.

Введение. В последние десятилетия наблюдается активное изменение ледовых и гидрологических условий на акватории арктических морей. В настоящее время основное внимание специалистов уделяется исследованию физических механизмов, ответственных за существенное сокращение площади ледяного покрова, а также гидрофизическим процессам, влияющим на теплообмен, вертикальное перешивание, вентиляцию глубоководных бассейнов и поступление тепла к нижней границе ледяного покрова. В этой связи менее всего изучена роль различных мезо- и субмезомасштабных гидрофизических процессов – короткопериодных внутренних волн (КВВ), вихрей, фронтов и филаментов, что объясняется их малыми пространственно-временными масштабами, требующими проведения специальных измерений.

Интенсивное сокращение площади ледяного покрова в Арктике не только в летний, но и в зимний периоды, позволяет в настоящее время эффективно использовать данные дистанционного зондирования океана из космоса для определения районов устойчивой генерации динамических процессов верхнего слоя океана, их интенсивности и характеристик. Начиная с 2016 г. в Морском гидрофизическом институте РАН ведется активная работа по исследованию этих процессов по данным современных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) Envisat

© Козлов И. Е., Плотников Е. В., Атаджанова О. А., Михайличенко Т. В., Кузьмин А. В., Петренко Л. А., Жук Е. В., 2022

ASAR, Sentinel-1 A/B, ALOS-2 PALSAR-2, Radarsat-1/-2 [1], включая создание системы автоматизированной обработки последовательных РСА-изображений для выбранных районов Арктики. Последняя используется для получения полей скорости дрейфа льда в прикромочной ледовой зоне (ПЛЗ) высокого пространственного разрешения (< 1 км), определения орбитальной скорости вихрей внутри ПЛЗ и фазовой скорости КВВ [2, 3].

Данные и методы. Основой спутникового мониторинга динамических процессов в морях Арктики являются спутниковые радиолокационные изображения (РЛИ), которые в силу всепогодности и высокого пространственного разрешения (10–100 м) известны своей эффективностью при исследовании мезо- и субмезомасштабной динамики океана из космоса [1, 2]. Идентификация вихревых процессов, КВВ и границ поверхностных течений в РЛИ возможна на основе выделения связанных с ними характерных локальных неоднородностей в поле обратного рассеяния РЛ-сигнала, т. н. поверхностных проявлений (ПП). Анализ РСА-измерений позволяет определять районы генерации этих процессов, их пространственные (радиус вихрей, длину волны КВВ и т. д.) и кинематические (орбитальные скорости вращения вихрей, фазовые скорости КВВ) характеристики [2, 3].

К настоящему времени выполнена обработка больших массивов спутниковых РСА-данных за 2007–2012 гг. (Envisat ASAR, Radarsat-1/-2) и 2016–2020 гг. (Sentinel-1 A/B, ALOS-2 PALSAR-2), покрывающих области открытой воды и ПЛЗ всей арктических морей. Получена детальная информация о районах генерации и характеристиках более чем 20 000 ПП внутренних волн и вихрей. Получаемые спутниковые продукты далее размещаются в сети интернет по адресу http://polar-space.ru.

Примеры. В данном разделе рассмотрим несколько примеров получаемой информации о кинематических характеристиках вихрей ПЛЗ и внутренних волн в проливе Фрама и окрестностях арх. Шпицберген по данным последовательных РСА-измерений Sentinel-1 A/B. Анализ данных сводится к выполнению следующих действий: i) поиск и определение квазисинхронных пар изображений; ii) калибровка и фильтрация изображений для каждой пары; iii) выделение пересекающихся фрагментов для пары РЛИ; iv) расчёт полей горизонтальной скорости течений/фазовой скорости КВВ для подготовленных фрагментов парных РЛИ [2]. На рис. 1, *а* показано положение двух квазисинхронных РЛИ Sentinel-1 A/B за 17.09.2017 в районе пролива Фрама, а на рис. 1, *б* – увеличенный фрагмент РЛИ с отчетливым проявлением антициклонического вихря в прикромочной ледовой зоне.

На рис. 2 показаны примеры спутниковых продуктов, полученных на основе обработки квазисинхронных РЛИ Sentinel-1 A/B и размещаемых на сайте http://polar-space.ru. Рис. 2, *а*, *б* показывает поле скорости дрейфа льда в ПЗЛ, в котором отчетливо виден антициклонический вихрь (рис. 1, *б*), орбитальная скорость вращения которого достигает 0,7 м/с [2]. На рис. 2, *в* показана карта с положением лидирующих гребней КВВ,

идентифицированных по данным Sentinel-1 A/B в июне-августе 2018 г., а на рис. 2, *г* – увеличенный фрагмент района с информацией о фазовой скорости пакета КВВ, выделенного 03.08.2018 вблизи арх. Шпицберген.

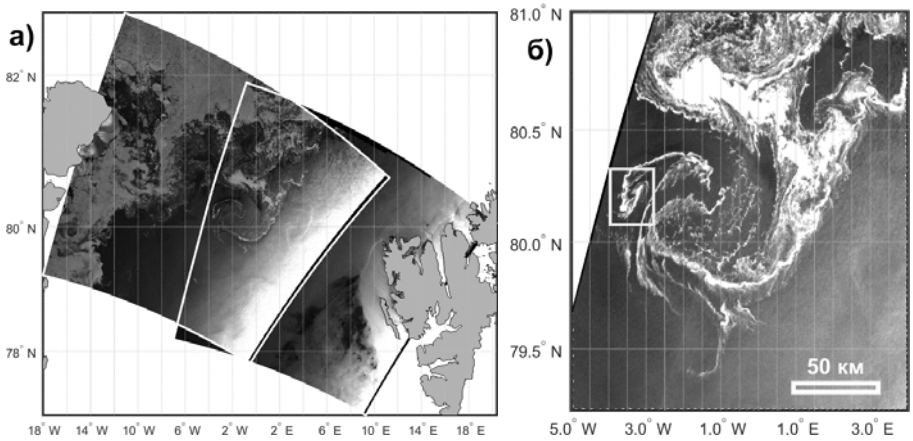


Рис. 1. *а*) Положение двух квазисинхронных РЛИ Sentinel-1 A/B за 17 сентября 2017 г. в районе пролива Фрама. *б*) Фрагмент РЛИ Sentinel-1A за ту же дату (07:12 UTC) с отчетливым проявлением антициклонического вихря в прикромочной ледовой зоне

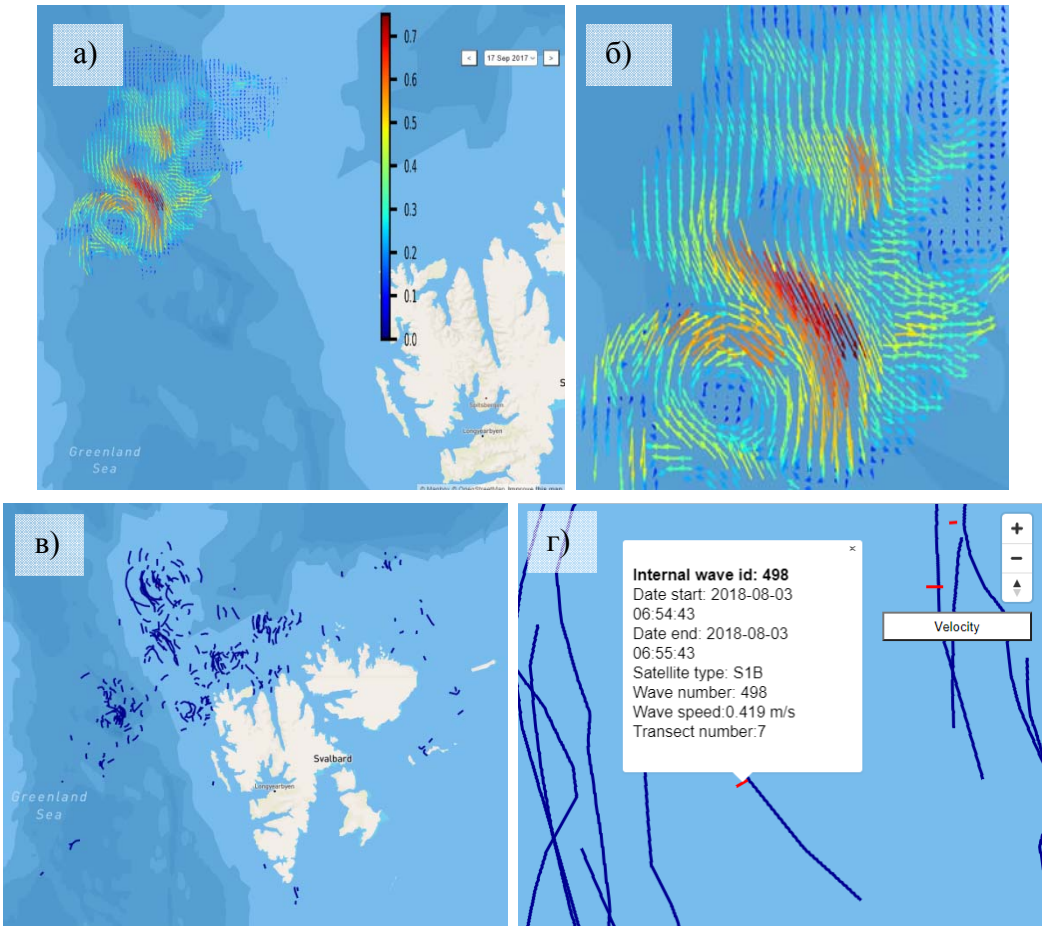


Рис. 2. Примеры спутниковых продуктов на сайте http://polar-space.ru, полученных на основе обработки квазисинхронных РЛИ Sentinel-1 A/B для пролива Фрама. Вверху (*а*, *б*) – скорость дрейфа льда внутри ПЛЗ с антициклоническим вихрем, внизу – лидирующие гребни внутренних волн (*в*) и значения их фазовой скорости (*г*)

Заключение. Опыт многолетнего анализа спутниковых РСА-измерений показал исключительную эффективность этих данных для определения «горячих точек» образования и пространственных характеристик мезо- и субмезомасштабных процессов верхнего слоя арктических морей, диагностика которых на основе прямых измерений и численного моделирования крайне затруднены на сегодняшний день в силу их относительно малых размеров и короткого времени жизни. Анализ квазисинхронных спутниковых измерений, доступных в последние годы, позволяет также исследовать кинематические характеристики этих процессов и их эволюцию на акватории Северного Ледовитого океана.

Данная работа выполнена в рамках гранта РНФ № 21-17-00278 (разработка методов и оценка динамических характеристик вихрей и КВВ по данным квазисинхронных РСА-измерений), а также в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0010 (анализ пространственно-временных характеристик вихрей и КВВ).

Список литературы

1. Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A. A. Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. № 124 (9). P. 6601–6616.

2. Kozlov I. E., Plotnikov E. V., Manucharyan G. E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // The Cryosphere. 2020. № 14. P. 2941–2947.

3. Kozlov I. E., Mikhaylichenko T. V. Estimation of internal wave phase speed in the Arctic Ocean from sequential spaceborne SAR observations // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. Vol. 18. № 5. P. 181–192.

I. E. Kozlov, E. V. Plotnikov, T. V. Mikhaylichenko, O. A. Atadzhanova, A. V. Artamonova, A. V. Kuzmin, L. A. Petrenko, E. V. Zhuk

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: ik@mhi-ras.ru

SATELLITE MONITORING OF DYNAMIC PROCESSES IN THE ARCTIC SEAS

The paper presents an experience and results of using spaceborne synthetic aperture radar (SAR) measurements to determine the "hot spots" of formation and the main characteristics of meso- and submesoscale dynamic processes in the upper layer of the Arctic seas, the diagnosis of which based on direct measurements and numerical modeling is extremely difficult today. In addition, analysis of quasi-synchronous satellite radar measurements available in recent years makes it possible to regularly obtain data on the kinematics and evolution of these processes in the Arctic Ocean (AO), being a valuable source of information for validating numerical models of the AO dynamics.

Keywords: ocean eddies, short-period internal waves, ocean dynamics, synthetic aperture radar, Arctic Ocean.

УДК 551.509.68

Е. И. Пономарев[1,3], А. Н. Забродин[1,2], Н. Д. Якимов[1,2]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[3]Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: evg@ksc.krasn.ru, azabrodin@ksc.krasn.ru, nyakimov96@mail.ru

МОНИТОРИНГ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЖАРОВ И ПОСЛЕПОЖАРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Аннотация. Воздействие пожаров на доминирующие древостои бореальных лесов Сибири анализировалось с использованием нормализованного индекса гари (NBR) и его разности до и после пожара (dNBR) по данным Landsat-8/OLI. Приведена классификация воздействия пожаров по преобладающим древостоям и типам растительности. Получено среднемноголетнее соотношение площадей с низкой, умеренной и высокой степенью пожарного воздействия: 37 %, 39 % и 24 % от ежегодной площади пожаров в сомкнутых древостоях и 30 %, 57 % и 13 % для разреженных древостоев севера. Апробирован метод контроля восстановительных процессов за 5-летний период на основе анализа диапазонов аномалий температуры ($\Delta T/T_{фон}$) поверхности и вегетационного индекса ($\Delta NDVI/NDVI_{фон}$) по отношению к фоновым значениям, что характеризует динамику восстановления растительности и напочвенного покрова.

Ключевые слова: Бореальные леса, лесные пожары, классификация, аномалии температуры, послепожарное восстановление, NBR/dNBR.

Введение. В Сибири ежегодно до 1 % лесной территории подвергается воздействию пожаров [1, 2], что составляет значительную долю послепожарных нарушений лесов мира [3]. С учетом климатических изменений прогнозируется рост площадей пожаров в Сибири [4].

Экологические последствия на послепожарных участках проявляются десятилетия [5, 6]. Получить количественную оценку степени пирогенной нарушенности в масштабах Сибири позволяет технология индекса Normalized Burn Ratio (NBR) и его разности dNBR [7, 8]. Такие данные характеризуют степень нарушенности в зависимости от типа пожара и интенсивности горения [7, 9]. Детализация степени нарушенности послепожарных участков [8] позволяет прогнозировать скорость восстановительных процессов. В вопросе длительного мониторинга послепожарного состояния растительности широко используют вегетационный индекс, предложенный еще Rouse et al. в 1973 г. [10]. Однако послепожарные нарушения можно контролировать и по снижению отражательной способности поверхности (альбедо) и по изменению и скорости выравнивания аномалий теплового режима

© Пономарев Е. И., Забродин А. Н., Якимов Н. Д., 2022

послепожарных участков [6, 11]. Эффективность такого количественного контроля на протяжении 20–40 лет зависит от начального уровня нарушенности [5].

Оценкам послепожарных повреждений древостоев посвящены многие публикации [2, 8, 9], но остается не до конца изученным вопрос эффективности дистанционного мониторинга восстановительных процессов с учетом особенностей древостоев. С этой целью в данной работе мы выявили связь между степенью пожарного воздействия и динамикой восстановительных процессов, используя дистанционные методы и спектральные индексы и учитывая доминирующие древостои Сибири.

Исходные данные и методы обработки. В работе использовались спутниковые изображения среднего пространственного разрешения (30, 100 м) Landsat–8/OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor), полученные из открытых каталогов (https://earthexplorer.usgs.gov/). Были отобраны хроноряды спутниковых данных (всего 42 снимка) для послепожарных участков (8 участков общей площадью 218 тыс. га) в четырех вариантах преобладающих пород: лиственница *(Larix* sibirica) и сосна *(Pinus sylvestris)* (светлохвойные), а также ель *(Picea obovata)* и пихта (*Abies sibirica)* (темнохвойные).

Многолетние ряды значений вегетационного индекса и радиояркостной температуры были восстановлены по >160 спутниковым снимкам за 5-летний период после воздействия пожара. Для расчета радиояркостной температуры поверхности использовались данные теплового канала B10 (TIR, $\lambda = 10.30–11.30$ мкм). Для расчёта вегетационного индекса – данные каналов B4 (RED, $\lambda = 0.63–0.68$ мкм) и B5 (NIR, $\lambda = 0.85–0.89$ мкм).

Послепожарные полигоны классифицировали в терминах NBR/dNBR:

$$\boldsymbol{NBR} = \frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)}, \quad (1)$$

где *NIR* – значения в канале $\lambda = 0.85–0.89$ мкм; *SWIR* – значения в канале $\lambda = 2.10–2.30$ мкм;

$$\boldsymbol{dNBR} = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire}, \quad (2)$$

где $NBR_{prefire}$ – значения допожарного состояния; $NBR_{postfire}$ – послепожарное состояние.

После попиксельного преобразование снимков Landsat в значения коэффициента отражения и яркостной температуры стандартными средствами Quantum GIS выполняли расчет индекса NBR/dNBR с пороговым выделением диапазонов значений, соответствующих трем классам (низкая, средняя, высокая) начальной нарушенности растительности [7, 8].

При определении радиояркостной температуры выполняли предварительную процедура атмосферной коррекции. Значения

радояркостной температуры усредняли за вегетационный период для каждого послепожарного участка с учетом преобладающего древостоя и класса нарушенности. Аномалии температуры ($\Delta T/T_{фон}$, %) вычисляли как отношение усредненных значений для послепожарного участка (ΔT) и фона ($T_{фон}$) в непосредственной близости от рассматриваемых объектов. Аналогично определяли относительные аномалии ($\Delta NDVI/NDVI_{фон}$, %). Для каждого послепожарного участка проводилось не менее 20 измерений, усреднение за вегетационный период выполняли по 3–6 значениям в месяц (рис. 1).

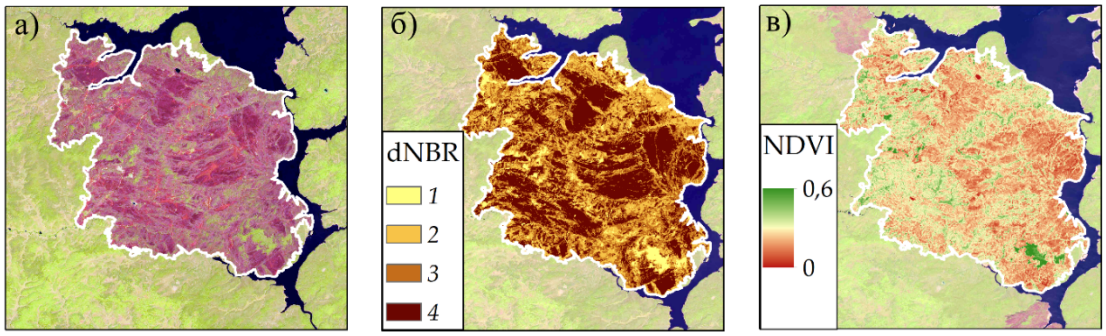


Рис. 1. Обработка спутниковых снимков Landsat-8/OLI для послепожарного участка. Лиственничный древостой, 2021 г.: *а* – послепожарный полигон; *б* – значения индекса dNBR; *в* – распределение показателя NDVI

Результаты. Получено соотношение площадей с низкой, умеренной и высокой степенью пожарного воздействия: 37 %, 39 % и 24 % от ежегодной площади пожаров в сомкнутых древостоях и 30 %, 57 % и 13 % для разреженных древостоев севера Сибири. До 40 % послепожарной территории в лиственничниках характеризовалось высоким уровнем пожарного воздействия, в сосняках – около 12 %, в темнохвойных насаждениях (ель, пихта) – более 25 %. В сосновых и темнохвойных древостоях средний уровень пожарного воздействия зафиксирован на 35 % площадей; низкий – 51 % в сосняках и 40 % в темнохвойных древостоях. Эти результаты соответствуют предварительно полученным данным для большей выборки пожаров Сибири [8].

На послепожарных участках значения температурных аномалий ($\Delta T/T_{фон}$, %) определяются уровнем нарушенности и типом древостоя (рис. 2, *а–г*). В течение 5 лет после пожара наблюдается экспоненциальное снижение температурных аномалий. Наивысший уровень начальной тепловой аномалии в первый год после пожара наблюдается в сосновых насаждениях (превышение на 45 % относительно фона) при высокой степени пожарного воздействия в терминах NBR/dNBR (рис. 2, *а*). Для пожаров в лиственничниках $\Delta T/T_{фон}$ ~35 %, для участков с древостоями ели и пихты – 25 % и 20 % соответственно.

Для данных $\Delta NDVI/NDVI_{фон}$ зафиксирована относительно высокая скорость восстановления в течение первых 3 лет после пожарного воздействия, далее значения стабилизируются (рис. 2, *д–з*).

В лиственничниках через 5 лет после пожара отмечен достаточно высокий уровень аномалии NDVI (~40–45 %), вероятно обусловленный значительными нарушениями напочвенного покрова в разреженных лиственничных древостоях. Такие последствия могут проявляться до 20 и более лет после пожара [5]. В рассмотренных древостоях уровень остаточной аномалии значений $\Delta NDVI/NDVI_{фон}$ после 5 лет восстановления не превышает 5–15 % от фоновых значений. Такие диапазоны могут быть статистически незначимы для выполнения дальнейшей (5 и более лет) оценки восстановительных процессов по спутниковым вегетационным индексам.

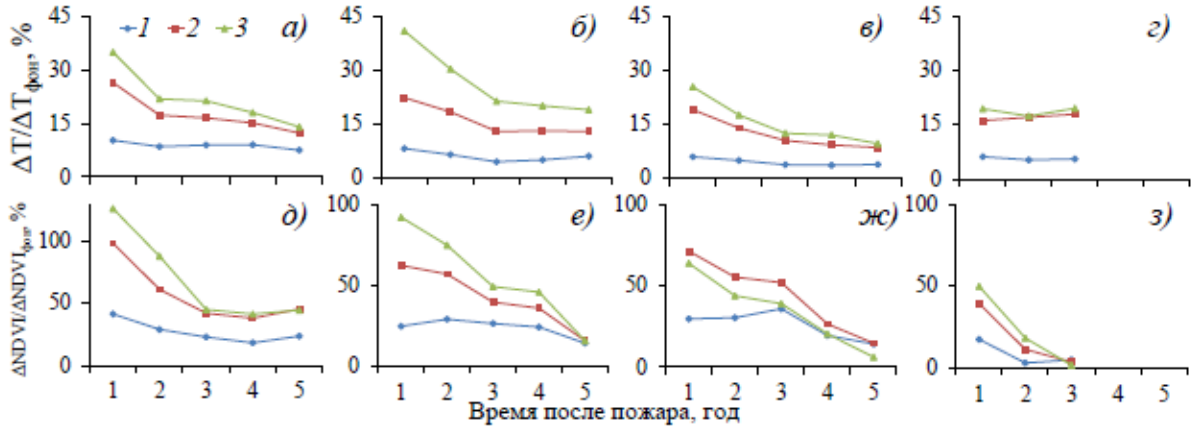


Рис. 2 Динамика значений $\Delta T/T_{фон}$ на послепожарных участках в лиственничниках (*а*), сосняках (*б*), еловых (*в*) и пихтовых (*г*) насаждениях и аномалии $\Delta NDVI/NDVI_{фон}$: *д* – лиственница; *е* – сосна; *ж* – ель; *з* – пихта. Цветом показаны кривые для различного уровня пожарного воздействия в терминах dNBR: 1 – высокое, 2 – среднее, 3 – низкое

Заключение. Спектральные индексы позволяют оценить как степень пожарного воздействия на древостои и растительные покровы (индекс NBR/dNBR), так и скорость восстановительных процессов (в терминах $\Delta T/T_{фон}$, $\Delta NDVI/NDVI_{фон}$). Показана эффективность спутникового мониторинга восстановления растительности на послепожарных участках. Для калибровки и дальнейшего использования предложенного подхода необходимо учитывать особенности, связанные как с начальным уровнем послепожарной нарушенности, так и с различиями, обусловленными доминирующими древостоями. Однако при всех ограничениях, в масштабах пожарных нарушений Сибири, это наименее затратный и максимально эффективный подход.

Работа выполнена в рамках базового проекта № 0287-2021-0040 (ФИЦ КНЦ СО РАН) и при поддержке РФФИ-КФН №20-44-242002.

Список литературы

1. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. № 50 (11). P. 1953–1974.

2. Bartalev S. A., Stytsenko F. V. Assessment of Forest-Stand destruction by Fires based on Remote-Sensing data on the Seasonal distribution of Burned areas // Contemporary problems of Ecology. 2021. № 7. P. 711–716.

3. Flannigan M., Stocks B. J., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Glob Change Biol. 2009. № 15. P. 549–560.

4. Hayasaka H. Fire Weather Conditions in Boreal and Polar Regions in 2002–2021 // Atmosphere. 2022. № 13(7). 1117; https://doi.org/10.3390/atmos13071117

5. 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. № 11 (8). 790.

6. Yakimov N. D., Ponomarev E. I., Ponomareva T. V. Satellite monitoring of the state and dynamics of disturbed natural and technogenic landscapes in Siberia // CEUR Workshop Proceedings. 2021. № 3006. P. 585–593.

7. dos Santos S. M. B., Bento-Gonçalves A., Franca-Rocha W., Baptista G. Assessment of Burned Forest Area Severity and Postfire Regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) Using dNBR and RdNBR Spectral Indices // Geosciences. 2020. № 10. P. 106.

8. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Ponomareva T. V. Classification of Fire Damage to Boreal Forests of Siberia in 2021 Based on the dNBR Index // Fire. 2022. № 5. 19.

9. Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Стыценко Ф. В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232.

10. Rouse J. W., Jr. Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation // Progress Reports RSC 1978-1 93. Texas A & M University. 1973.

11. Ponomarev E. I., Ponomareva T. V. The effect of postfire temperature anomalies on seasonal soil thawing in the permafrost zone of central Siberia evaluated using remote data // Contemp. Probl. Ecol. 2018. № 11 (4). P. 420–427.

E. I. Ponomarev[1,3], A. N. Zabrodin[1,2], N. D. Yakimov[1,2]

[1]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[2]Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», Krasnoyarsk, Russia
[3]V. N. Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk, Russia

FIRE DAMAGE TO BOREAL FORESTS AND POST-FIRE RECOVERY MONITORING USING SPECTRAL INDICES FROM SATELLITE DATA

The impact of fire on dominant tree stands in boreal forests of eastern Siberia was analyzed using the normalized burn ratio (NBR) and its pre- versus post-fire difference (dNBR) applied to Landsat-8/OLI data. We provided the classification of fire impact in relation to dominant tree stands and vegetation types in boreal forests of eastern Siberia. We quantified the proportions of low, moderate, and high fire severity (37 %, 39 %, and 24 % of the total area burned, respectively) in dense tree stands. The proportions were varied to 30 %, 57 %, and 13 %, respectively, for sparse stands and tundra vegetation dominated in the north of Siberia. For post-fire areas of different disturbance level, we evaluated the 5-year dynamics of restoration processes through the ranges of anomalies in the surface temperature and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which can indirectly characterize the post-fire state and recovery of vegetation and on-ground cover.

Keywords: boreal forest; wildfires; normalized burn ratio; fire impact classification; post-fire restoration monitoring

УДК 528.813; 528.8.042.8; 528.88; 551.582.2

И. В. Рябинин[1], Д. А. Романов[2], И. В. Хвостов[3], Д. Н. Трошкин[4], А. Н. Романов[5]

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия
[1]Аспирант, cgsiena@gmail.com
[2]Инженер, zzzromanovzzz@mail.ru
[3]Кандидат технических наук, с.н.с., khvostov.iwep@ya.ru
[4]Кандидат технических наук, с.н.с., uchsec@iwep.ru
[5]Доктор технических наук, г.н.с., romanov_alt@mail.ru

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО МИКРОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА ЗАСУХ НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Аннотация. Приведены результаты сравнительного анализа радиояркостных температур ($T_Я$) подстилающей поверхности и физических характеристик почв для тестового участка Кулундинской равнины, характеризующейся засушливым климатом. Установлены закономерности сезонной динамики $T_Я$, используемые при разработке методов дистанционного мониторинга засух. Исследована многолетняя сезонная динамика $T_Я$, определенная по данным спутника SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity). На основе экспериментальных данных рассчитаны тренды $T_Я$ и физической температуры, описываемые линейными зависимостями. Анализ спутниковых данных за последние 10 лет указывает на усиление процессов иссушения в степных районах Западной Сибири.

Ключевые слова: Западная Сибирь, засуха, спутник, микроволновое зондирование.

Введение

Засухи в стратегически важных аграрных регионах угрожают продовольственной безопасности России. Продолжительные засушливые периоды на юге Западной Сибири характеризуются региональными (часто уникальными) особенностями, зависящими от природно-климатических условий, физических и химических характеристик почвы, циркуляции атмосферы. Для каждого региона является важным выявить специфические особенности протекания засух. Широкомасштабные исследования засух ведутся в разных регионах России [1–3]. Обобщение исследований засух в мире приведено в [4].

В настоящее время для оценки засухи предложено более 170 индексов, возможности которых ограничены. В современных условиях непредсказуемости климатических изменений ранее определенные индексы засухи становятся бесполезными [5].

В данной работе изучена возможность разработки дистанционных индикаторов увлажненности территории для прогнозирования сроков наступления и интенсивности засух на основе ежедневных данных спутникового микроволнового зондирования.

© Рябинин И. В., Романов Д. А., Хвостов И. В., Трошкин Д. Н., Романов А. Н., 2022

Методика исследований

Натурные исследования проводили на территории Кулундинской равнины, находящейся на юге Западной Сибири, характеризующейся засушливым климатом. Количество годовых осадков составляет 200–350 мм в год. В 2012 г. данный регион охватила сильнейшая с 1960 гг. засуха. В Алтайском крае пострадало более 3 млн га с/х посевов, и с 26 июля был введен режим чрезвычайной ситуации (ЧС).

Использовали значения $T_Я$ на горизонтальной поляризации для угла зондирования 42.5º, полученные из продукта SMOS L1C версии v724 [6]. Данные географически привязаны к дискретной геодезической сетке ISEA 4H9 [7]. Линейный размер ячейки составляет 15 км, площадь 195 км^2. В качестве объекта исследования выбрана ячейка № 4010460 с координатами центра 52°29'14.28" СШ, 80°4'35.73" ВД. Основным ландшафтом являлись распаханные поля с посадками с/х культур. Площади водных объектов <5 %, населенных пунктов <1 %. Площадь лесных массивов, искусственных древесных насаждений незначительна. Метеорологические характеристики исследуемой территории определяли по ежедневным данным (https://rp5.ru).

Для почв со слаборазвитой растительностью значения $T_Я$ рассчитали по формуле, имеющей для плоской слабошероховатой подстилающей поверхности вид: $T_Я = \mathrm{T} \cdot \chi$, где T – физическая температура в скин-слое, χ – коэффициент излучения подстилающей поверхности. На тестовом участке отбирали образцы почвы, в лабораторных условиях определяли объемную влажность W [см^3/см^3] и измеряли диэлектрические характеристики почв. На основе этих данных установили зависимость $W(T_Я)$, имеющую вид:

$$W = 0.89442 - 1.01038 \cdot (T_Я/\mathrm{T}), \sigma = 0.018\,, \qquad (1)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение.

Результаты исследований

На рис. 1 приведены многолетняя сезонная динамика радиояркостной (1) и физической (2) температур подстилающей поверхности тестового участка. Рассчитанные зависимости T(D) и $T_Я$(D) имеют вид

$$T = 287.49718 - 5.09964 \times 10^{-4} \times \mathrm{D}, \sigma = 0{,}01$$

$$T_Я = 230.8247 + 10.1 \times 10^{-4} \times \mathrm{D}, \sigma = 0{,}01,$$

где D – юлианский день, отсчитываемый от 01.01.2012 г.

Из приведенных соотношений следует, что T со временем уменьшается, а $T_Я$ возрастает. Величина $T_Я$ зависит от T, влажности, засоленности, гранулометрического состава почвы. Отсюда можно сделать вывод о некотором изменении физических или химических свойств почв.

На рис. 2 приведена сезонная динамика $T_Я$ (1), T (2), W (3) в 2012 г/ для тестового участка. Значение W рассчитывали на основе спутниковых измерений $T_Я$ и наземных измерений T по формуле (1). Из графиков видно, что значительную часть теплого сезона $W < 0.1$ см^3/см^3. Это сопоставимо

с максимальной объемной долей, связанной воды в почве, недоступной растениям. Низкие значения W связаны с незначительными снеговыми запасами, накопленными в зимний сезон 2011/2012 гг., малым количеством дождевых осадков. С начала года выпало около 60 мм осадков. За две недели, предшествовавшие введению режима ЧС (26.07.2012), осадков не было. Увлажненная в результате дождевых осадков почва успевала высохнуть в течение 2–3 суток до предельно низких значений W. Скорости высыхания $\Delta W/\Delta D$ изменялись от 0.01 до 0.09 см^3/см^3 в сутки. Соответствующие им скорости возрастания $dT_Я/dD$ изменялись от 3.5 до 17 К/сутки. Уменьшение W на 0.01 ведет к возрастанию $T_Я$ на 3.5 К.

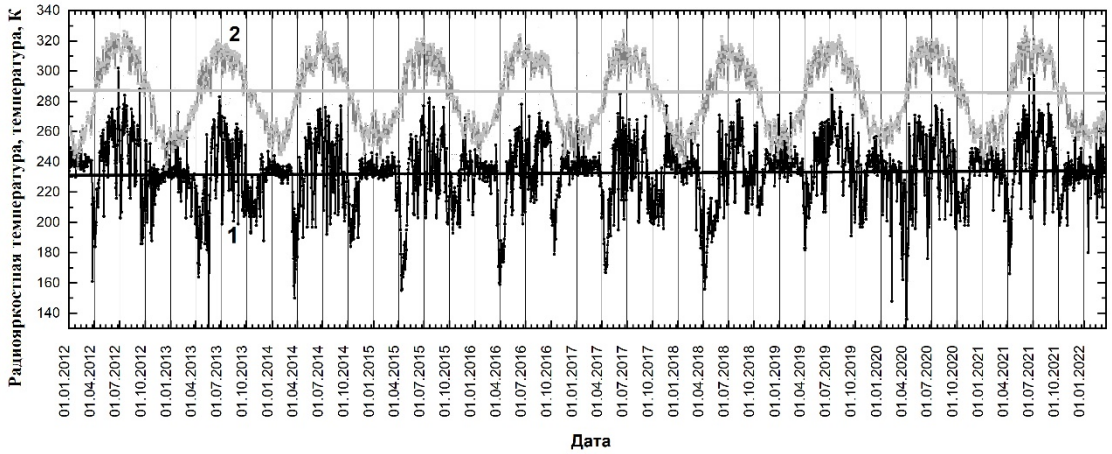


Рис. 1. Многолетняя динамика радиояркостной (1) и физической (2) температур подстилающей поверхности ячейки № 4010460 ISEA 4H9

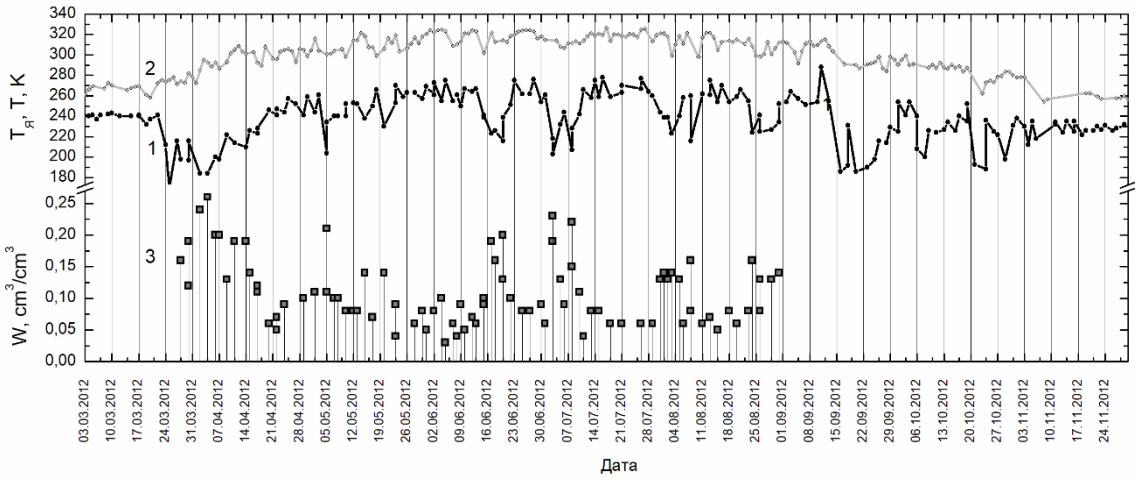


Рис. 2. Сезонная динамика радиояркостной (1), физической (2) температур подстилающей поверхности, объемной влажности W (3) ячейки № 4010460 ISEA 4H9

Выводы

1. На основе ежедневных спутниковых данных $T_Я$ можно оценить скорость обезвоживания почвы и спрогнозировать дату наступления засухи и ее интенсивность.

2. Скорости возрастания $dT_Я/dD$ могут быть использованы в качестве предвестников возможных засух.

3. Анализ спутниковых и наземных данных за последние 10 лет указывает на усиление процессов иссушения в степных районах на юге Западной Сибири.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-20041, https://rscf.ru/project/22-17-20041/ .

Список литературы

1. Воропай Н. Н., Рязанова А. А. Засухи на территории Томской области // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 39–51.

2. Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б. Аридизация засушливых земель европейской части России и связь с засухами // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. № 2. С. 207–217.

3. Шмакин А. Б., Попова В. В. Динамика климатических экстремумов в Северной Евразии в конце XX века // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 157–166.

4. Добровольский С. Г. Засухи мира и их эволюция во времени: сельскохозяйственный, метеорологический и гидрологический аспекты // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 2. С. 119.

5. Amin Zargar, Rehan Sadiq, Bahman Naser, et al. A review of drought indices // Environmental Reviews. 13 September 2011. https://doi.org/10.1139/a11-013.

6. Gutierrez A., Castro R., Vieira P. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0009. No. 2.14. 2014. 80 p. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models

7. Sahr, K., White, D., Kimerling, A. J.: Geodesic Discrete Global Grid System, Cartography and Geographic Information Science. 2003. Vol. 30, N 2. Pp. 121–134.

I. V. Ryabinin, D. A. Romanov, I. V. Khvostov, D. N. Troshkin, A. N. Romanov

Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

SOME RESULTS OF REMOTE MICROWAVE MONITORING OF DROUGHTS IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

The results of a comparative analysis of the radio brightness temperatures (T_B) of the underlying surface and the physical characteristics of soils for the test area of the Kulunda Plain, which is characterized by an arid climate, are presented. The regularities of seasonal dynamics of T_B used in the development of methods for remote monitoring of droughts have been established. The long-term seasonal dynamics of T_B, determined from the data of the SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) satellite, was studied. Microwave radiation from the underlying surface, calibrated in units of T_B, was extracted from the L1C product. On the basis of experimental data, the trends of T_B and physical temperature are calculated, which are described by linear dependencies. An analysis of satellite data over the past 10 years indicates an intensification of desiccation processes in the steppe regions of southern Western Siberia.

Keywords: Western Siberia, drought, satellite, microwave remote sensing.

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 528.837:629.78:621-83:517.938:004.94

С. А. Бронов[1], И. А. Заболотский[2], А. В. Зазнобина[2], Д. В. Лукьянов[2]

[1]Доктор технических наук, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
[2]Студент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: nul-sapr@mail.ru

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АППАРАТУРЫ В СПУТНИКАХ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Рассмотрена разработанная авторами система моделирования, предназначенная для исследования процессов в динамических объектах, в частности, в электроприводах спутников для дистанционного зондирования Земли. Отличительной особенностью системы моделирования является возможность управления процессом моделирования в ходе самих вычислений. Это позволяет менять структуру модели объекта, параметры составляющих его элементов, внешних воздействий и вычислений. Система реализуется на языке С++. Новые принципы организации системы моделирования обеспечивают повышение качества моделирования: уменьшение времени и погрешностей расчётов, расширение функциональных возможностей, удобство визуализации результатов. Система моделирования может использоваться также в учебном процессе при изучении динамических объектов и при разработке прикладного программного обеспечения.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, электропривод, моделирование.

Введение. Исполнительные электроприводы играют важную роль в системах автоматического управления аппаратурой спутников для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. Их проектирование всегда связано с моделированием. Для этого используются коммерческие системы моделирования, например, Matlab, MathCAD и другие. Достоинством существующих систем моделирования является наличие в них встроенных библиотек с функциями, реализующими большое число математических методов, а также интерфейс, включая графическую визуализацию результатов расчётов. Но эти системы обладают общим недостатком – они построены в соответствии с жёстко заданной структурой, в которую нельзя вмешиваться. Имеющиеся ограничения системы моделирования создают соответствующие ограничения для

© Бронов С. А., Заболотский И. А., Зазнобина А. В., Лукьянов Д. В., 2022

моделируемых объектов. В частности, процесс моделирования предусматривает задание всех его параметров до начала моделирования без возможности вмешательства в процесс моделирования. При попытке сделать процесс моделирования более гибким приходится существенно усложнять программы, что требует дополнительных усилий для их отладки, также обычно существенно увеличивается время расчёта. В данной работе предлагается гибкая система моделирования, позволяющая вмешиваться в процесс моделирования и осуществлять автоматическую корректную перестройку его параметров. Это позволяет повысить качество моделирования, т. е. снизить время расчётов и уменьшить их погрешность относительно реальных процессов.

Описание системы моделирования. Структура системы моделирования на рисунке содержит четыре основных подсистемы: Подсистему формирования модели объекта, Подсистему организации вычислений, Подсистему вывода результатов и Интерфейс пользователя.

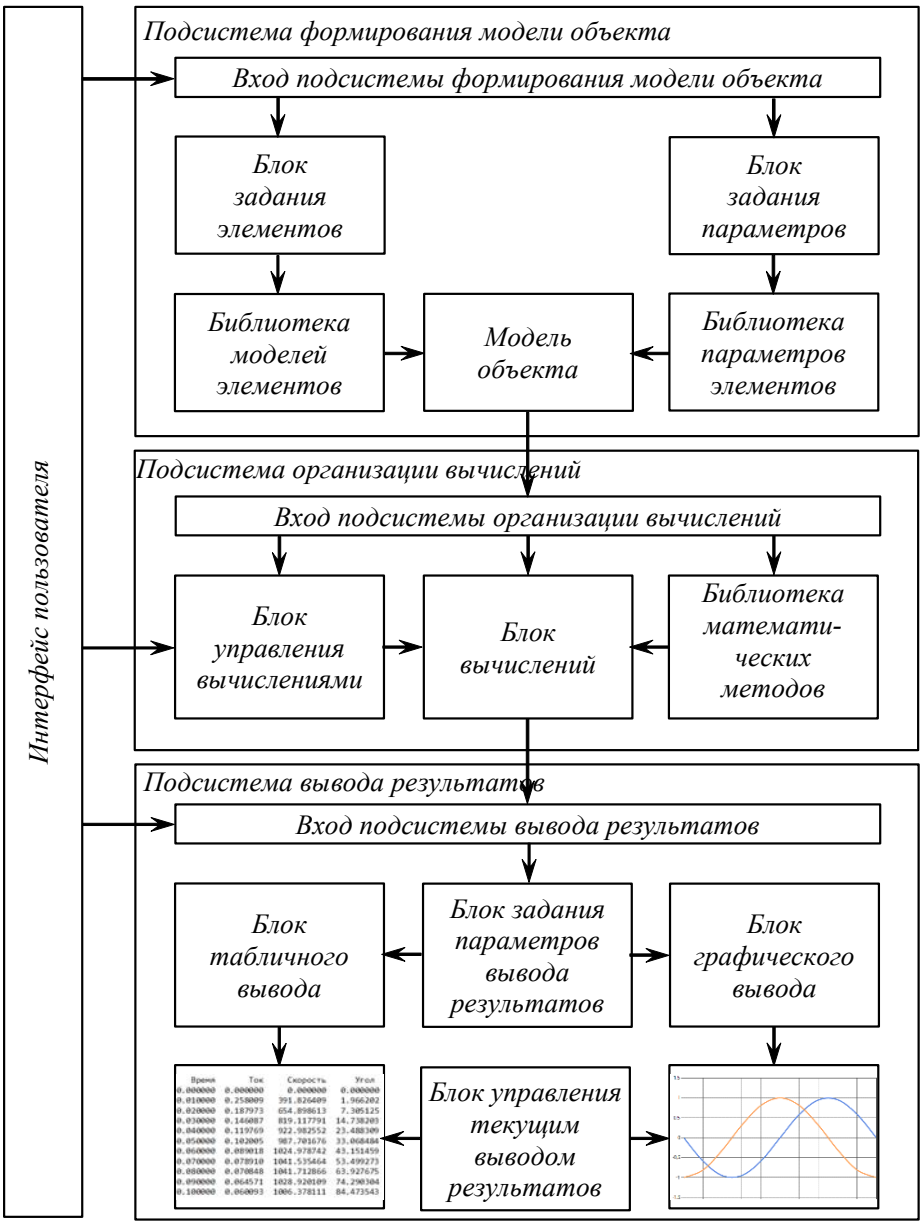


Рис. Структурная схема системы моделирования

Подсистема формирования модели объекта обеспечивает задание структуры объекта в виде комплекса отдельных элементов и связей между ними. Например, применительно к электроприводу это может быть электродвигатель, источник его питания, механическая нагрузка, датчики, регулятор. Программные модели элементов содержатся в Библиотеке моделей элементов. У каждой модели имеются параметры, которые выбираются из Библиотеки параметров элементов. При выборе элементов устанавливаются связи между ними и таким образом формируется модель всего объекта.

Подсистема организации вычислений содержит Библиотеку математических методов с процедурами, реализующими различные математические функции: численное интегрирование, матричные преобразования, интерполяцию и т. п. Блок вычислений обеспечивает синхронную работу моделей и используемых функций при вычислениях.

Подсистема вывода результатов обеспечивает вывод результатов моделирования в табличной и графической форме. Вывод в табличной форме осуществляется в файл. Одновременно может осуществляться вывод в виде графика. В этом случае можно видеть протекание процесса.

Интерфейс пользователя необходим для управления процессом вычислений. Перед началом моделирования задаётся структура объекта моделирования из библиотеки элементов. Для установления связей между элементами используется два режима: автоматический и ручной. В автоматическом режиме выбранные элементы сами находят связи между собой. Например, если выбирается трёхфазный СДПМ и соответствующий источник питания, то связи устанавливаются автоматически, так они могут быть только одного вида. В ручном режиме можно установить или изменить связи. Например, в автоматическом режиме устанавливается последовательность соединений обмоток СДПМ и источника питания a-A, b-B, c-C. Затем в ручном режиме можно изменить порядок чередования фаз, например: a-B, b-A, c-C. Или оставить некоторые фазы неподключенными (аварийный режим). Можно вмешаться в процесс вычислений и во время их выполнения. Например, можно остановить счёт и оборвать фазу СДПМ.

Интерфейс пользователя позволяет также менять параметры процесса вычислений, например, шаг интегрирования и шаг вывода, время окончания счёта и др.

С помощью интерфейса пользователя обеспечивается управление выводом результатов расчётов. Выбираются рассчитываемые кривые, имя файла для сохранения результатов, необходимость вывода на график и его вид, возможность одновременного вывода очередной точки в файл и на график, использование или не использование интерполяции.

Особенность системы моделирования предложенной структуры в том, что интерфейс позволяет контролировать не только ввод исходных данных и вывод результатов моделирования, но также внутренние процессы расчёта, которые могут быть прерваны и изменены с помощью команд мышки или с клавиатуры.

Программная реализация выполнена на языке C++ в Microsoft Visual Studio. Библиотека моделей содержит модели основных двигателей, используемых в исполнительных электроприводах космических аппаратов – синхронных двигателей с постоянными магнитами и синхронных двигателей с электромагнитной редукцией. Имеются модели типовых источников питания в виде транзисторных коммутаторов. В настоящее время все модели разрабатываются путём непосредственного программирования, но имеют типовую структуру, что позволит в будущем автоматизировать их разработку.

Заключение. Новые принципы организации системы моделирования обеспечивают повышение качества моделирования: уменьшение времени и погрешностей расчётов, расширение функциональных возможностей, удобство визуализации результатов. Система моделирования может использоваться также в учебном процессе как при изучении динамических объектов, так и при разработке прикладного программного обеспечения [2].

Список литературы

1. Ковалев И. В., Титовская Н. В., Титовский С. Н. Возможности использования инновационных космических технологий в прогрессивном растениеводстве // Проблемы современной аграрной науки: материалы междунар. науч. конф. КГАУ, 2019. С. 200–204.

2. Титовский С. Н., Титовская Н. В. Методы обучения программированию в вузе // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы междунар. науч.-практ. конф. КГАУ, 2015. С. 144–146.

S. A. Bronov[1], I. A. Zabolotskij[2], A. V. Zaznobina[2], D. V. Lukyanov[2]

[1]Doctor of Technical Sciences, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation

[2]Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

e-mail: nul-sapr@mail.ru

SIMULATION SYSTEM ELECTRIC ACTUATORS IN SATELLITES FOR REMOTE EARTH SENSING

The simulation system developed by the authors and intended for studying processes in dynamic objects, in particular, in the electric drives of satellites for remote sensing of the Earth, is considered. A distinctive feature of the simulation system is the ability to control the simulation process during the calculations themselves. This allows you to change the structure of the object model, the parameters of its constituent elements, external influences and calculations. The system is implemented in C++. New principles of organization of the simulation system provide an increase in the quality of simulation: reduction of time and calculation errors, expansion of functionality, convenience of visualization of results. The modeling system can also be used in the educational process in the study of dynamic objects and in the development of application software.

Keywords: spacecraft, Earth remote sensing, electric drive, simulation system.

УДК 528.837:629.78:621-83:517.938

С. А. Бронов[1], Н. А. Никулин[2], Е. П. Чумакова[3], А. А. Чумаченко[4], М. Е. Вайман[4]

[1]Доктор технических наук, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
[2]Кандидат технических наук, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[3]Магистрант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[4]Аспирант, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
e-mail: nul-sapr@mail.ru

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ СЕРВИСНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Рассмотрены новые принципы проектирования электроприводов для космических аппаратов с учётом высоких требований к их функциональным возможностям и техническим характеристикам. Предложено реализовать систему управления электроприводом как комбинированную позиционную и скоростную с переменными структурой и параметрами. В качестве регулятора используется специализированный контроллер, в котором алгоритмы вычислений реализуются аппаратно. Расчёты управляющих величин осуществляются с помощью математической модели двигателя. Для коррекции параметров модели используется массив информации, который собирается с помощью датчиков, запоминается и обрабатывается по соответствующим алгоритмам. Таким образом, обеспечивается выявление изменений параметров и коррекция модели.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, электропривод, система управления.

Введение. Космические аппараты (КА) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются сложными объектами, содержащими много устройств, обеспечивающих работоспособность КА и операций, связанных с ДЗЗ [1]. Некоторые из этих устройств должны менять своё положение в процессе работы: антенная установка обеспечивает направленность антенны с орбиты за пунктами слежения на Земле, системы поворота солнечных батарей выполняют раскрытие после вывода КА на орбиту и постоянно поворачиваются в сторону Солнца, имеются устройства поворота приборов для фотографирования и др. Для этого используются сервисные исполнительные электроприводы (СИЭП), которые характеризуются тремя компонентами: электродвигателями, способами управления и принципами построения систем автоматического управления ими. Все три компонента связаны между собой и вместе обеспечивают те или иные функциональные возможности и технические характеристики всего электропривода. Но используемые традиционные

© Бронов С. А., Никулин Н. А., Чумакова Е. П., Чумаченко А. А., Вайман М. Е., 2022

подходы к проектированию систем управления электроприводами уже не всегда обеспечивают нужное качество.

Традиционные и новые концепции систем управления сервисных электроприводов. Сервисные системы имеют различное функциональное назначение и, соответственно, различные требования к функциональным возможностям и техническим характеристикам используемых в них электроприводов. Особенностью этих электроприводов является, то, что они являются одновременно позиционными и скоростными системами. В режиме позиционного электропривода обеспечивается отработка поворота вала на требуемый угол, а в режиме скоростного электропривода реализуется плавное вращение при низкой и сверхнизкой постоянной скорости.

Недостатком современных систем управления (СУ) СИЭП является, в частности то, что они строятся или как позиционные, или как скоростные системы. Создают также совмещённые СУ СИЭП, но в этом случае обычно позиционные системы дополняют некоторыми функциями, позволяющими использовать их в скоростном режиме. Но характеристики скоростного режима обычно оказываются недостаточно хорошими.

В качестве двигателей обычно используют синхронные двигатели двух типов – синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) и синхронные двигатели с электромагнитной редукцией (СДЭР). Возможность реализации позиционного или скоростного режимов работы существенно зависит от способа управления двигателем.

Применительно к СДПМ и СДЭР существует три обобщённых способа управления в зависимости от того, какой параметр напряжения переменного тока используется в качестве управляющего: частота, фаза или амплитуда.

Частотный способ предназначен для скоростных систем и обеспечивает вращение вала двигателя с постоянной скоростью, а также плавное изменение скорости. Он соответствует так называемому синхронному режиму работы, при котором скорость вращения равна частоте напряжения питания. В этом режиме резкое изменение скорости может привести к выпаданию из синхронизма и потере управляемости двигателя. Для повышения надёжности удержания двигателя в синхронизме совместно с частотным используют амплитудное управление: увеличение амплитуды обычно способствует удержанию двигателя в синхронизме.

Фазовый режим работы предназначен для позиционных систем и обеспечивает поворот вала двигателя на заданный угол. При этом фаза напряжения питания изменяется в соответствии с изменением угла поворота вала, а частота питания – в соответствии со скоростью вращения. То есть в данном случае не параметры напряжения задают режим работы (как при частотном управлении), а режим работы задает параметры вращения. Скорость двигателя и угол поворота при этом регулируется амплитудой.

Таким образом, частотный и фазовый способы управления являются основными, а амплитудный способ используется вместе с ними.

Предлагается строить комбинированную СУ СИЭП на основе сочетания частотного, фазового и амплитудного способов управления.

Но каждый способ предполагает свою систему управления: соответствующие датчики и регуляторы. Поэтому комбинированная СУ СИЭП должна быть системой с переменными структурой и параметрами.

При проектировании СУ СИЭП рассматриваются варианты для скоростной и для позиционной системы. Затем выявляются общие и различные части (датчики, регуляторы). Анализ структурных схем приводит к тому, что значительная часть устройств оказывается общей.

При изменении структуры меняются связи между отдельными устройствами (двигателем, источником питания, датчиками и регуляторами). В случае микропроцессорного управления все связи оказываются замкнутыми через контроллер, и переход от одной структуры к другой осуществляется программно. При этом меняются направления передачи сигналов и алгоритмы их обработки.

В этом случае необходимо контролировать состояние СИЭП и определять необходимость перехода из одного режима работы в другой. Для этого используются датчики различных физических величин: скорости, угла поворота, токов в обмотках. Эти величины достаточно просто измерить непосредственно. Но для управления могут потребоваться данные о других физических величинах, и тогда эти исходные данные обрабатываются, и на их основе рассчитываются другие величины, например модуль и угол поворота вектора тока, потокосцепления обмоток и т. д.

Эти расчёты производятся по моделям двигателей. Эти модели разрабатываются с использованием различных упрощающих допущений. Поскольку аппаратура для КА является уникальной или мелкосерийной, то для каждого двигателя можно выполнить индивидуальное измерение всех параметров, присутствующих в модели. Таким образом можно повысить адекватность модели. Но в процессе функционирования СИЭП эти параметры могут меняться, например может изменяться сопротивление проводов обмоток, магнитные свойства стали и постоянных магнитов, трение в механических узлах из-за износа и изменения смазки и т. д. Тогда расчёты по этой модели могут оказаться не точными. Возникает необходимость коррекции параметров в процессе работы. Срок активного существования КА на орбите всегда составляет несколько лет, а за это время изменения параметров неизбежны. В прецизионных СИЭП это может быть критично, так как ошибка отработки угла поворота может составлять доли угловых минут, ошибка поддержания заданной скорости (с учётом пульсаций) доли процента.

Но такой объём вычислений будет занимать много времени. Поэтому предлагается использовать в качестве регулятора специализированный контроллер на основе программируемых логических интегральных схем [2], в котором программное обеспечение реализовано на аппаратном уровне.

Информация о текущем состоянии СИЭП запоминается, обрабатывается и используется как для оперативного управления, так и для коррекции параметров модели.

Заключение. Новые предложенные принципы проектирования СУ СИЭП как комбинированных позиционных и скоростных систем с переменными структурой и параметрами позволяет расширить функциональные возможности и улучшить технические характеристики аппаратуры КА для ДЗЗ.

Список литературы

1. Ковалев И. В., Титовская Н. В., Титовский С. Н. Возможности использования инновационных космических технологий в прогрессивном растениеводстве // Проблемы современной аграрной науки: материалы междунар. науч. конф. КГАУ, 2019. С. 200–204.

2. Бронов С. А., Авласко П. В., Поваляев В. А., Непомнящий О. В., Ефимов А. В. Программный модуль автоматизированного комплекса для исследования индукторных электроприводов двойного питания // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 12. С. 1–5.

S. A. Bronov[1], N. A. Nikulin[2], E. P. Chumakova[3],
A. A. Chumachenko[4], M. E. Vajman[4]

[1]Doctor of Technical Sciences, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation

[2]PhD, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

[3]Master student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

[4]Graduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation

e-mail: nul-sapr@mail.ru

ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS FOR SERVICE SYSTEMS OF SPACECRAFT FOR REMOTE EARTH SENSING

New principles for the design of electric drives for spacecrafts are considered, taking into account the high requirements for their functionality and technical characteristics. It is proposed to implement the electric drive control system as a combined positional and speed one with variable structure and parameters. A specialized controller is used as a regulator, in which the calculation algorithms are implemented in hardware. Control values are calculated using a mathematical engine model. To correct the model parameters, an array of information is used, which is collected using sensors, stored and processed according to appropriate algorithms. This ensures the detection of changes in parameters and correction of the model.

Keywords: spacecraft, Earth remote sensing, electric drive, control system.

УДК 528.88

Е. В. Варламова[1], В. С. Соловьев[2]

[1,2]Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия
e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕНДЕНЦИИ НАЧАЛА ВЕГЕТАЦИОННОГО СЕЗОНА ПО ИНДЕКСУ NDVI

Аннотация. Проведено исследование особенностей пространственно-временных вариаций сроков начала сезона вегетации (SOS_G) в Сибири (1982–2015 гг.) на основе данных вегетационного индекса NDVI (продукт GIMMS NDVI3g). Показано, что в целом на территории Сибири за 1982–2015 гг. начало сезона вегетации стало наблюдаться раньше на 5 (±3) суток по отношению к 1982 г. Аналогичное, но более существенное смещение SOS_G наблюдается на севере Якутии, где оно составило 12 (±5) суток. При этом тренд вариаций SOS_G упомянутой области в 1982–2004 гг. был незначителен, а сроки начала сезона вегетации варьировали в пределах третьей декады мая, затем в течение 2004–2013 гг. возникла устойчивая тенденция смещения SOS_G к началу мая. Выявленный сдвиг SOS_G к более ранним датам в этой области, в основном, обусловлен ростом температуры воздуха в мае на 3,4 (±1,6) °С. Следует также отметить, что в этой области за исследуемый период наблюдается тенденция раннего таяния снега на 11 (±6) дней.

Ключевые слова: AVHRR, MODIS, NDVI, SOS, начало сезона вегетации, Сибирь.

Введение. Лесные экосистемы севера вследствие суровых климатических условий обладают низким реабилитационным потенциалом и чутко реагируют на изменение климата, которое в свою очередь, особенно заметно происходит в высоких северных широтах. Динамика показателей растительности и сложная взаимосвязь с климатическими и антропогенными факторами не изучена до конца. Значения вегетационных индексов, получаемых на основе спутниковых данных, позволяют количественно оценивать состояние растительного покрова и описывать сезонную динамику фенологических характеристик. Целью данной работы является исследование особенностей пространственно-временных вариаций сроков начала сезона вегетации (SOS) растительного покрова Сибири за 1982–2015 гг. на основе данных вегетационного индекса NDVI.

Данные и методика. В работе использованы глобальные композиты 15-дневных и 16-дневных NDVI, полученные на основе данных радиометра AVHRR спутников NOAA (продукт GIMMS NDVI3g, 1982–2015 гг. [1]) и данных радиометра MODIS спутников Terra (продукт MOD13C1.v006, 2000–2020 гг. [2]). Глобальные среднемесячные данные по приземной температуре воздуха и атмосферным осадкам за период 1982–2020 гг. взяты из продукта CRU TSv.4.05 [3], основанного на данных

© Варламова Е. В., Соловьев В. С., 2022

наземных метеостанций. Ежедневные данные по высоте снежного покрова за период 1982–2019 гг. получены из массива данных [4], созданного на основе регулярных ежедневных наблюдений за снежным покровом на метеорологических станциях.

На основе значений NDVI для территории Сибири за период 1982–2020 гг. были рассчитаны ежегодные даты начала сезона вегетации SOS (Start Of Season) с использованием порогового метода «$Midpoint_{pixel}$» [5], согласно которому SOS наступает в день года, когда значение $NDVI_{ratio}$ весной превышает пороговое значение 0,5. Таким образом, показатели дат начала сезона вегетации растительного покрова, рассчитанные по данным продуктов GIMMS NDVI3g и MOD13C1.v006 указаны как SOS_G и SOS_M, соответственно. Также были рассчитаны и определены ежегодные даты таяния снега EOS_S (End Of Season of snow cover), усредненные по данным десяти метеостанций, расположенным на севере Якутии на территории региона исследования ROI (Region of Interest). Датой таяния снега считался день года, когда значение высоты снега в окрестности метеостанции опускалось до уровня 0 см. Территория ROI была определена по пороговому значению (> 0,03/год) тренда TIN, как описано в работе [6].

Тренды показателей SOS, EOS_S и метеопараметров за исследуемый период были проанализированы с использованием метода оценочной функции Тейла-Сена [7, 8]. Статистическая значимость трендов оценивалась с помощью критерия значимости Манна-Кендалла [9, 10] на уровне 95 % ($p < 0,05$).

Результаты. Карта распределения тренда SOS_G за 1982–2015 гг. для территории Сибири показана на рис., *а*. Как видно из рис., *а*, в среднем на территории Сибири преобладает отрицательная динамика SOS_G (−5 (±3) дней), что свидетельствует о тенденции более раннего начала вегетационного сезона. При этом изменениям SOS подверглось 45 % территории Сибири. Среди них положительная динамика составляет всего 6 %, а отрицательная – 39 %, в том числе значимые положительные и отрицательные тренды занимают 0,3 % и 12 % территории соответственно. Наиболее высокие значимые тренды SOS_G наблюдаются на севере Якутии, где среднее значение тренда для обозначенного ROI составило −12 (±5) дней. Ежегодные вариации SOS_G (1982–2015 гг.) и SOS_M (2000–2020 гг.), усредненные по территории ROI представлены на рис., *б*. Корреляция между ежегодными вариациями SOS_G и SOS_M за перекрывающийся временной период (2000–2015 гг.) показывает довольно высокое согласие ($R = 0,88$), что дает нам возможность рассматривать изменения этого показателя по данным двух продуктов за более длинный временной период. Однако абсолютные показатели SOS_G и SOS_M ожидаемо отличаются (на ~ 20 дней), поскольку значения NDVI исходных продуктов разные. Такая разница в значениях NDVI связана в основном из-за различий в спектральных диапазонах RED и NIR сенсоров AVHRR и MODIS [11]. Как видно из рис., *б*, показатели SOS в течение 23 лет (1982–2004 гг.) варьируют в среднем на уровне ~ одной декады, затем,

в течение последующих 10 лет (2004–2013 гг.) наблюдается устойчивое смещение SOS к более ранним датам на ~ две декады. Следует отметить, что далее также наблюдается устойчивый положительный тренд на ~ две декады, который аналогично сменяется отрицательным трендом, но за более кратковременные периоды: 2013–2017 гг. и 2017–2020 гг., соответственно. Анализ вариаций метеопараметров показал, что такая особенность в изменениях SOS обусловлена, в основном, изменениями температуры воздуха в мае (T_{May}), что в свою очередь отразилось на изменениях EOS_S. Значения коэффициентов корреляций между SOS_G/SOS_M и вариациями T_{May} и EOS_S составили в среднем −0,85 и 0,91, соответственно. Таким образом, значимый рост T_{May} на 3,4 (±1,6) °C в ROI на севере Якутии за 1982–2015 гг. привел к смещению SOS_G и EOS_S в более ранние даты на 12 (±5) и 11 (±6) дней, соответственно. Среднегодовая температура в этой области за аналогичный период существенно возросла на 1,9 (±0,8) °C, однако значимых изменений в уровне осадков не наблюдается (31 (±27) мм).

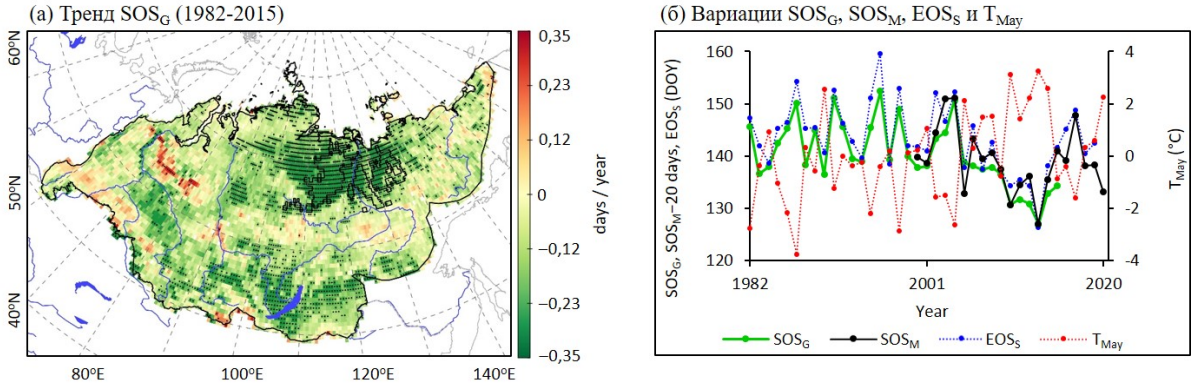


Рис. 1. *а* – карта тренда SOS_G на территории Сибири за 1982–2015 гг. Точками отмечены области с $p < 0,05$. Черной линией выделена область ROI; *б* – межгодовые вариации SOS_G, SOS_M, EOS_S и T_{May} для ROI

Заключение. Показано, что в целом на территории Сибири за 1982–2015 гг. начало сезона вегетации стало наблюдаться раньше на 5 (±3) суток по отношению к 1982 г. Аналогичное, но более существенное смещение SOS_G наблюдается на севере Якутии, где оно составило 12 (±5) суток. При этом тренд вариаций SOS_G упомянутой области в 1982–2004 гг. был незначителен, а сроки начала сезона вегетации варьировали в пределах третьей декады мая, затем в течение 2004–2013 гг. возникла устойчивая тенденция смещения SOS_G к началу мая. Выявленный сдвиг SOS_G к более ранним датам в этой области, в основном, обусловлен ростом температуры воздуха в мае на 3,4 (±1,6) °C. Следует также отметить, что в этой области за исследуемый период наблюдается тенденция раннего таяния снега на 11 (±6) дней.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

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. Didan K. MOD13C1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13C1.006. Accessed 2022-03-02.

3. 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. Vol. 7. P. 109. doi: 10.1038/s41597-020-0453-3.

4. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива данных «Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621201.

5. White M. A. et al. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 // Global Change Biology. 2009. Vol. 15. P. 2335–2359. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x.

6. Варламова Е. В., Соловьев В. С. Пространственно-временная динамика индекса растительного покрова Восточной Сибири по данным ДЗЗ // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVII Междунар. симпозиума [Электронный ресурс]. Томск: ИОА СО РАН, 2021. С. D289–291. 1 CD-ROM.

7. Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis // I, II, and III Nederl. Akad. Wetensch. Proc., Vol. 53. P. 386–92, 521–5 and 1397–412.

8. Sen P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau // Journal of the American Statistical Association. 1968. Vol. 63. P. 1379–1389. doi: 10.1080/01621459.1968.10480934.

9. Mann H. B. Non-Parametric Tests against Trend // Econometrica. 1945. Vol. 13. P. 245–259.

10. Kendall M. G. Rank Correlation Methods // 4th Edition, Charles Griffin, London. U.K. 1975.

11. Gallo Kevin P., Ji Lei, Reed Brad, Dwyer John, Eidenshink Jeffrey. Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 99. P. 221–231. doi:10.1016/j.rse.2005.08.014.

E. V. Varlamova[1], V. S. Solovyev[2]

[1,2]Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

INVESTIGATION OF VEGETATION SPRING PHENOLOGY DYNAMICS USING NDVI

Features of the spatio-temporal variations of vegetation spring phenology (SOSG) in Siberia during 1982–2015 were studied using NDVI data (GIMMS NDVI3g). The negative trends of SOSG prevail over Siberia during 1982-2015: the trend values on average across the study area amounted to −5 (±3) days. At the same time, the high significant trends (−12 (±5) days) of SOSG are observed in the northern part of Yakutia. The trend of SOSG during 1982–2004 was negligible and SOS dates was observed on the end of May. Then, over the next ten years since 2004, there is a strong continuous advance of SOSG to the beginning of May. Shift in spring phenology in this region is mainly due to a significant increase (3.4 (±1.6) °C) of air temperature in May. It should be noted that a strong shift in snowmelt dates by 11 (±6) days earlier was also observed.

Keywords: AVHRR, MODIS, NDVI, SOS, начало сезона вегетации, Сибирь.

УДК 528.8-004.855.5

К. Н. Дубровин[1], А. С. Степанов[2], А. Л. Верхотуров[3]

[1]Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
[2]Доктор фармацевтических наук, ДВ НИИСХ, Хабаровск, Россия
[3]Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия
e-mail: nob_keeper_93@mail.ru, stepanfx@mail.ru, andrey@ccfebras.ru

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Аннотация. Проведена классификация сельскохозяйственных полей Дальневосточного научно-исследовательского института сельского хозяйства (общая площадь более 3000 га) с использованием сезонных рядов индекса NDVI за 2021 г. В качестве определяемых культур выступали соя, гречиха, тимофеевка луговая и овёс. Предварительно производилось обнаружение залежных и парующих земель. Общая точность классификации составила 94,0 % на уровне пикселей спутниковых изображений и 95,3 % на уровне отдельных полей. Разработанный метод может быть применён для классификации сельскохозяйственных полей на уровне муниципальных образований и регионов Дальнего Востока.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, классификация, машинное обучение, сельскохозяйственные культуры, NDVI, Sentinel-2.

Введение. Классификация пахотных земель является одной из важнейших задач в практике сельского хозяйства. Актуальность решения этой задачи непосредственно связана как с необходимостью уточнения севооборота на отдельных полях, так и в целом оценки использования пахотных земель. При этом ежегодное проведение наземной экспертизы на всей территории макрорегиона является весьма трудоёмким и дорогостоящим предприятием. Для Дальнего Востока России эта задача видится особо сложной ввиду большой площади региона и недостаточно развитой транспортной инфраструктуры.

В мире существует успешный опыт создания масштабных карт пахотных земель. Например, агентство NASS ещё в 2008 г. создало карту пахотных земель США с выделенными на ней отдельными культурами CDL [1], в Евросоюзе в 2016 г. была разработана информационная система сельскохозяйственных полей LPIS [2]. В России функционирует единая федеральная система земель сельскохозяйственного назначения (ЕФИС ЗСН), предоставляющая информацию о севообороте на сельскохозяйственных полях муниципальных образований Российской Федерации [3]. Однако в ЕФИС ЗСН полностью отсутствуют данные о культурах, произраставших на полях Хабаровского края в 2021 г., а данные за 2020 г. содержат значительное количество неточностей.

© Дубровин К. Н., Степанов А. С., Верхотуров А. Л., 2022

В настоящее время для восстановления данных о севообороте используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Например, в работах [4–6] представлены алгоритмы автоматизированной классификации пахотных земель на основе анализа временных рядов оптических вегетационных индексов с использованием методов машинного обучения. В ИКИ РАН был создан метод определения пашни по спутниковым снимкам [7], а также созданы маски сельскохозяйственных культур для некоторых муниципальных образований европейской части РФ. Отличные от западных регионов сортовой состав, сроки сева и уборки урожая затрудняют использование существующих критериев разделения сельскохозяйственных культур для регионов Дальнего Востока.

Цель данного исследования – разработка метода классификации земель сельскохозяйственного назначения Хабаровского края с использованием спутниковых данных и методов машинного обучения.

Материалы и методы. Для построения сезонных временных рядов оптического индекса NDVI использовались 23 снимка территории правобережной части Хабаровского района, полученные со спутников Sentinel-2A/B в период с 1 мая по 31 октября 2021 г. В качестве исходных данных выступали размеченные временные ряды NDVI для пикселей 170 полей Дальневосточного научно-исследовательского института сельского хозяйства (общая площадь более 3 000 га). Все пиксели были разбиты на 6 классов: залежь, пар, овёс, соя, гречиха и тимофеевка луговая. Для классификации использовался метод квадратичного дискриминантного анализа, реализованный в библиотеке scikit-learn на языке программирования Python. Для оценки точности метода производилась трёхкратная кросс-валидация, была построена матрица соответствия, вычислены общая точность классификации и значения метрики f1 для каждого класса. После классификации на каждом из 170 полей идентифицировались произрастающие культуры (путём определения самого распространённого класса на принадлежащих полю пикселях).

Результаты. На рис. представлена попиксельная матрица соответствия между исходными данными и выходными данными классификатора. Общая точность классификации составила 94,0 %. Значения метрики f1 для сои составило 0,97; для залежи – 0,96; для гречихи – 0,93; для парующих земель – 0,85; для тимофеевки луговой – 0,71; для овса – 0,17. Таким образом, метод показал очень высокую точность при определении пикселей полей с соей, гречихой и залежных земель. Достаточно высокая точность была достигнута при выделении земель, находившихся под паром. Вследствие малой площади земель, занятых тимофеевкой (всего 2 поля общей площадью 60 га) и относительной схожестью сезонного хода NDVI этой многолетней травы с травами, произраставшими на парующих полях, достаточно много пикселей этих полей были классифицированы как пар. Площадь трёх полей, занятых овсом, составляла всего 27 га. Временные ряды овса также

оказались больше похожи на ряды парующих земель, чем на составляющие основу пахотных земель ряды сои и гречихи. Именно из-за этого поля с овсом были приняты классификатором за неиспользуемые парующие земли.

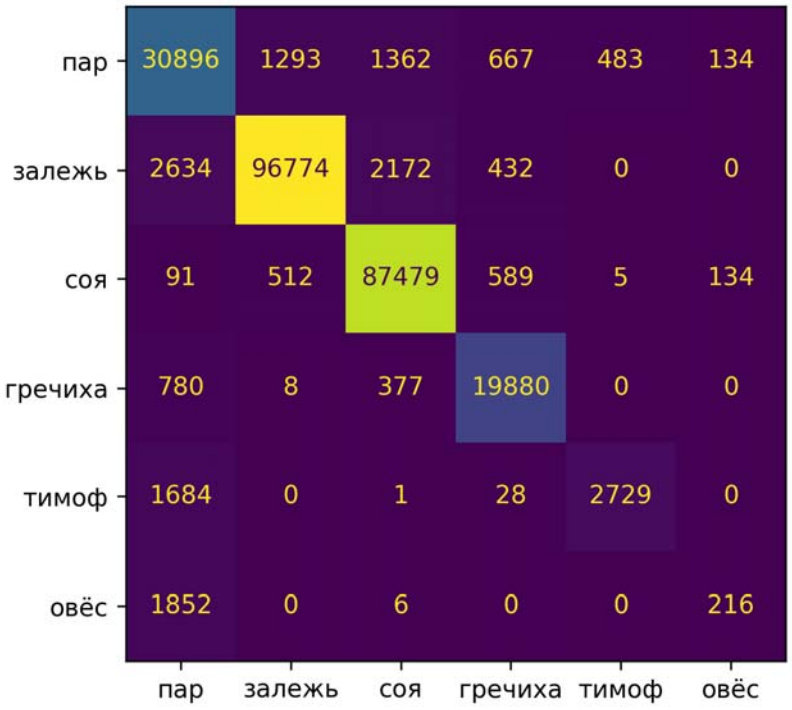


Рис. Матрица соответствия для классификатора

Общая точность идентификации сельскохозяйственных культур на уровне полей составила 95,3 % (162 из 170 полей было идентифицировано верно). Кроме 3 полей с овсом неверно были определены два залежных поля, два парующих поля (как поля с соей) и одно поле с гречихой.

Заключение. Разработанный метод классификации земель сельскохозяйственного назначения показал свою эффективность для основных культур, выращиваемых на полях Дальневосточного научно-исследовательского института сельского хозяйства, а также для определения парующих и залежных земель. Увеличение обучающей выборки положительно влияет на качество классификации. Поэтому использование классификатора для оценки площадей, занятых сельскохозяйственными культурами, на уровне муниципальных образований и регионов, видится весьма перспективным.

Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2021-663.

Список литературы

1. Becker-Reshef I., et al. Prior season crop type masks for winter wheat yield forecasting: a US case study // Remote Sensing. 2018. № 10: 1659.

2. Toth K., Kucas A. Spatial information in European agricultural data management. Requirements and interoperability supported by a domain model // Land Use Policy. 2016. № 57. P. 64–79.

3. Козубенко И. С. Почвенная информация в аналитическом центре Минсельхоза России // Бюл. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 3–15.

4. Chen Y., Lu D., Moran E., et al. Mapping croplands, cropping patterns, and crop types using MODIS time-series data // International Journal of Applied Earth, Observation and Geoinformation. 2018. № 69. P. 133–147.

5. Hao P., Tang H., Chen Z., et al. Early-season crop type mapping using 30-m reference time series // Journal of Integrative Agriculture. 2020. № 19(7). P. 1897–1911.

6. Ouzemou J.-E., El Harti A., Lhissou R., et al. Crop type mapping from pansharpened Landsat 8 NDVI data: A case of a highly fragmented and intensive agricultural system // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2018. № 11. P. 94–103.

7. Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Плотников Д. Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 16(6). С. 143–154.

K. N. Dubrovin[1], A. S. Stepanov[2], A. L. Verkhoturov[3]

[1]Computing Center FEB RAS, Khabarovsk, Russia
[2]FEARI, Khabarovsk, Russia
[3]Mining Institute FEB RAS, Khabarovsk, Russia
e-mail: nob_keeper_93@mail.ru, stepanfx@mail.ru, andrey@ccfebras.ru

CROPLAND CLASSIFICATION USING REMOTE SENSING DATA

The classification of agricultural sites of the Far Eastern Agriculture Research Institute (total area of more than 3000 ha) was carried out using the seasonal series of the NDVI for 2021. Soybean, buckwheat, timothy grass and oat acted as determined crops. Preliminarily, fallow lands were discovered. The overall classification accuracy was 94 % at the pixel level of satellite images and 95.3% at the level of individual fields. The developed method can be applied to the classification of agricultural fields at the level of municipalities and regions of the Far East.

Keywords: remote sensing, classification, machine learning, crops, NDVI, Sentinel-2.

УДК 621.396.67

Д. С. Корляков, С. В. Литвинов
РТУ МИРЭА, Москва, Россия
e-mail: Denis.Korlyakov.RIMO-01-21@yandex.ru, Litvinov_S@mirea.ru

ПРИЕМНЫЕ И ПЕРЕДАЮЩИЕ АНТЕННЫ СОВРЕМЕННОГО ИОНОЗОНДА

Аннотация. В работе рассматриваются передающая и приемная антенная система ионозонда вертикального зондирования (ВЗ) проводится моделирование диаграммы направленности (ДН) в диапазоне частот от 1 до 20 МГц с использованием программы MMANA-GAL basic, приводятся изображения этих ДН. Проводится анализ коэффициентов усиления Ga в Dbi и коэффициента стоячей волны (КСВ). Рассматривается работа таких антенный система на существующих ионозондах серии «Парус-А», показывается целесообразность их применения не только для вертикального, но и для наклонного зондирования (НЗ). Делается вывод о необходимости продолжения работ в данном направлении и модернизации как передающей, так и антенной систем.

Ключевые слова: ионосфера, антенна, передающая антенна, большой и малый ромб, вертикальное зондирование, наклонное зондирование.

Актуальность непрерывного мониторинга состояния ионосферы обуславливается целями обеспечения радиосвязи и радиолокации, а также научными исследованиями. В последние годы заметно развиваются системы космических аппаратов (КА), способные решать широкий спектр задач мониторинга, в том числе проводить радиозатменное зондирование. [1] Тем не менее, одним из самых популярных методов измерения параметров ионосферы является вертикальное и, как разновидность, наклонное зондирование наземными средствами. Они представляют собой радиолокатор, с диапазоном рабочих частот от 1 до 20 МГц, в котором он излучает в зенит импульсы с шагом перестройки 1–200 кГц, принимая отраженные сигналы с высот от 90 до 1 000 км.

Важную роль в этом зондировании играют применяемые антенные системы. Ранее проводились теоретические и практические расчеты целесообразности применения в качестве передающей системы антенн типа «большой и малый ромб» в вертикальной плоскости [2]. Целью данной работы является изучение, расчеты и моделирование передающей и приемной антенны ионозонда. При выполнении компьютерного моделирования применялась общедоступная программа MMANA-GAL basic [3]. Программа предоставляет возможность построить ДН в разных плоскостях, в том числе трехмерное отображение, определить коэффициент стоячей волны (КСВ), полное сопротивление Z на частотах диапазона работы и производить оптимизацию параметров. Авторами

© Корляков Д. С., Литвинов С. В., 2022

проведены расчеты и моделирование ДН ромбических антенн для ионозонда в диапазоне частот от 1 до 20 МГц, с учетом излучения в зенит. Для расчетов примем реальные размеры антенной системы действующего ионозонда, которые представляют собой два асимметричных по высоте ромба: большой и малый. Длина пар проводов составляет для малого ромба 31,2 м и для большого 59,3 м, с разнесением этих пар на 1,5 и на 0,8 м соответственно. Подключение передатчика предполагается следующее: к большому ромбу в диапазоне 1–5 МГц, а к малому в диапазоне 5–20 МГц. Результаты моделирования и расчета ДН большого (наверху) и малого (внизу) ромба на различных частотах в виде трехмерного изображения приведены на рис. 1.

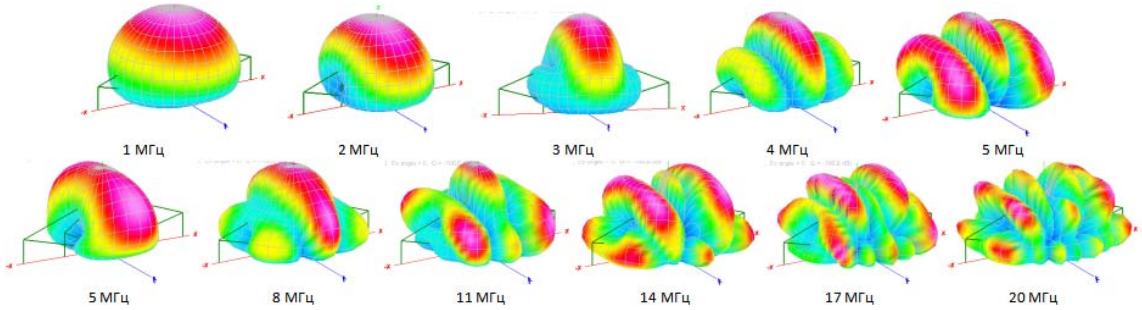


Рис. 1. Трехмерные диаграммы направленности большого ромба на частотах от 1 МГц до 5 МГц (сверху) и малого ромба на частотах от 5 МГц до 20 МГц (снизу)

Из рис. 1 видно, что эффективный диапазон работы малого ромба составляет всего лишь 5–11 МГц, заметно, что на более высоких частотах излучение в зенит резко снижается, то есть эффективность антенны становится малой. Графики коэффициентов усиления (Ga) в Dbi ромбических антенн по диапазону показаны на рис. 2.

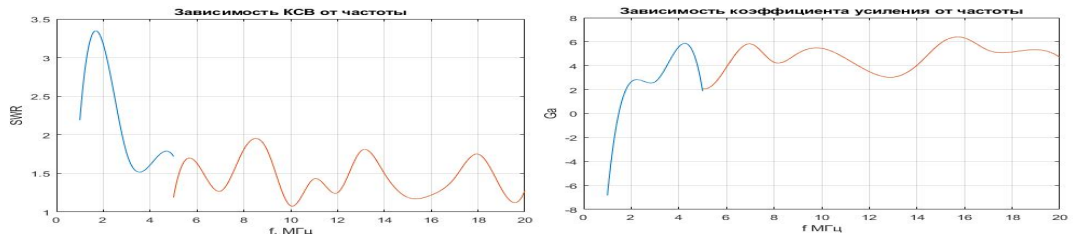


Рис. 2. КСВ стоячей волны (слева) и коэффициент усиления Ga в Dbi (справа) по диапазону частот. Синяя – большой ромб РА, красная – малый

КСВ, вычисленный по диапазону частот для большого ромба, находится в пределах 1.5–3.4. Причем пределы КСВ для малого ромба составляют лишь 1.1–1.9 на всем промежутке рабочей частоты. Из графика можно сделать вывод, что большой ромб РА удовлетворительно работает в диапазоне частот 1.9–4.9 МГц, а малый ромб РА – на всем диапазоне 5–20 МГц, когда Ga больше 2 Dbi.

Поскольку на приемную антенну действует распределенная ЭДС, то непосредственный анализ распределения тока в приемной антенне, а значит, и оценка характеристик и параметров этой антенны являются

сложной задачей. В связи с этим для расчета приемных антенн широко используют принцип взаимности, позволяющий определить характеристики и параметры приемной антенны по соответствующим характеристикам этой же антенны при ее работе в качестве передающей.

Рассмотрим параметры приемной крестообразной антенны на высоте 6 м от земли с длинной проводов 8 м. Из принципа взаимности мы исследуем такие параметры антенны, как коэффициент усиления и коэффициент стоячей волны, а также её диаграмму направленности. Для оценки параметров антенны произведем моделирование её в качестве передающей антенны в диапазоне частот от 1–20 МГц (рис. 3).

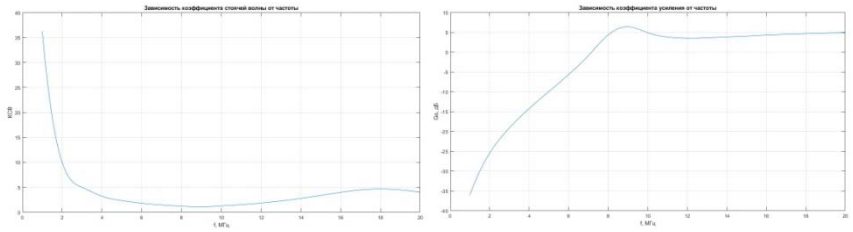


Рис. 3. КСВ стоячей волны (слева) и коэффициент усиления Ga в Dbi (справа) по диапазону частот. Синяя – большой ромб РА, красная – малый

Результаты моделирования и расчета ДН приемной антенны (скрещенный диполь) на различных частотах в виде трехмерного изображения приведены на рис. 4. По графикам ДН видно, что излучение антенны не сильно изменяется с изменением частоты. Антенна работает преимущественно в зенитной области.

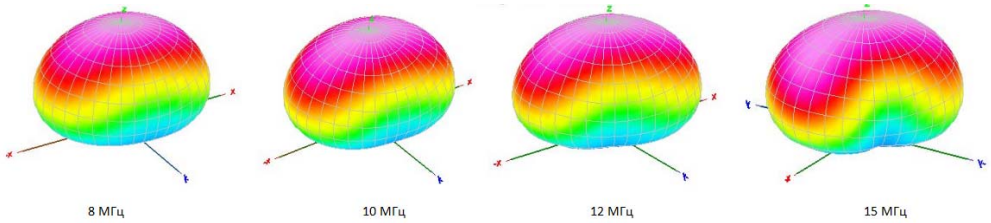


Рис. 4. Трехмерные диаграммы направленности антенны типа скрещенный диполь на частотах от 8 МГц до 15 МГц

Антенная система, подобная проведенному выше моделированию, применяется на отечественных ионозондах серии «Парус-А». Эти ионозонды, ставшими базовыми для сети ВЗ Росгидромета (ФГБУ «ИПГ»), устанавливаются на территории России с 2013 г. и за прошедшие годы показали свою надежность и достоверность данных [4].

Целевая функция ионозонда – излучение сигнала вертикально вверх и прием отраженного сигнала, антенны типа «большой ромб и малый ромб» больше всего подходят для выполнения этой задачи. Ионозонды серии «Парус-А» изначально предназначались исключительно для ВЗ, однако встроенная функция привязки к мировому времени (т. н. секундная метка) позволила в дальнейшем синхронизовать работу нескольких ионозондов и проводить НЗ. Этому также способствовала антенная система: ДН приемных диполей позволяет принимать сигналы с любого направления,

а из рис. 1 видно наличие значительных боковых лепестков передающей антенны. Они не мешают ВЗ, но при этом очень эффективны при НЗ [5].

Дальнейшим развитием антенной системы видится модернизация и приемной и передающей частей. Во-первых, имеет смысл модернизировать передающую антенну для оптимизации боковых лепестков. Во-вторых, видится целесообразным создание некоторой ФАР для приема сигнала, это позволит определять азимут и угол места принимаемого сигнала, также ее возможно применять для приема сигналов специализированных космических аппаратов и проводить трансионосферное зондирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022 г.

Список литературы

1. Генералов А. Г., Гаджиев Э. В., Шмачилин П. А. [и др.] Аспекты построения антенн для радиозатменного метода диагностики ионосферы // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-1. С. 188–189. EDN RSMJGQ.

2. Козлов А. Н., Гарбацевич В. А. Ромбические антенны ионозонда - результаты компьютерного моделирования // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2008. № 10(28). С. 243–249. EDN SJGOLV.

3. Гончаренко И. В. Компьютерное моделирование антенн. Всё о программе MMANA. М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио», 2002. 80 с.

4. Гивишвили Г. В., Крашенинников И. В., Лещенко Л. Н., Власов Ю. М., Кузьмин А. В. Ионозонд «Парус-А»: функциональные возможности и перспективы // Гелиофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 68–74.

5. Литвинов С. В., Паньшин Е. А., Качановский Ю М., Алексеева А. В. Проведение работ по исследованию расширения функциональных возможностей ионозонда «Парус-А» государственной сети Росгидромета // Гелиогеофизические исследования. 2019. № 21. С. 32–39. EDN HBMQBZ.

6. Корляков Д. С., Литвинов С. В., Семенова О. В. Антенная система современного ионозонда комплексного зондирования // Сб. науч. ст. по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф. «Радиоинфоком-2022», г. Москва, РТУ МИРЭА: сб. науч. ст. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 91–95.

D. S. Korlyakov, S. V. Litvinov

RTU MIREA, Moscow, Russia

e-mail: Denis.Korlyakov.RIMO-01-21@yandex.ru, Litvinov_S@mirea.ru

RECEIVING AND TRANSMITTING ANTENNAS OF A MODERN IONOSONDE

The paper considers the transmitting and receiving antenna system of the vertical sounding ionosonde, the radiation pattern (DN) is simulated in the frequency range from 1 to 20 MHz using the MMANA-GAL basic program, images of these DN are given. The analysis of the gain coefficients Ga in Dbi and the standing wave coefficient (SWR) is carried out. The work of such antenna systems on existing ionosondes of the Parus-A series is considered, the expediency of their use not only for vertical, but also for inclined sounding is shown. The conclusion is made that it is necessary to continue work in this direction and modernize both the transmitting and antenna systems.

Keywords: ionosphere, antenna, transmitting antenna, large and small rhombus, vertical sounding, oblique sounding.

УДК 550.388.2

С. В. Литвинов, Г. А. Милорадов, К. В. Авдеев

РТУ МИРЭА, Москва, Россия
e-mail: Litvinov_S@mirea.ru, Miloradov@mirea.ru, Avdeev@mirea.ru

ПОСТРОЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАЗЕМНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ СТАНЦИЙ

Аннотация. В статье рассматривается вопросы формирования сетей ионосферного зондирования наземными средствами. Анализируются существующие сети, такие как сеть высокоширотных ионозондов ААНИИ, сеть ионозондов «Парус-А» (ФГБУ «ИПГ») и сеть ионосферного обеспечения JORN (Австралия). Делается вывод о необходимости продолжения работ по модернизации и расширению российских сетей ионосферного мониторинга, в том числе с применением возможностей космической группировки.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, Парус-А, CADI, JORN.

Радиозондирование ионосферы по-прежнему остается основным методом в системе контроля состояния ионосферы, и, по сути, превращается в метод контроля всей околопланетной среды. Данные, получаемые в результате мониторинга состояния ионосферы крайне важны для прогнозирования погоды, КВ-радиосвязи, обеспечения работы РЛС загоризонтного обнаружения, обнаружения ядерных испытаний и других типов запусков ракет.

В России и во всем мире создаются ионозонды – наземные средства вертикального (реже наклонного) зондирования ионосферы. Существующая мировая сеть ионосферного зондирования, состоящая из 70 дигизондов DPS-4, на данный момент отслеживает ионосферу на отдельных участках. Подобные сети создаются и в нашей стране. Размещение отечественных ионосферных станций ВЗ исходит из принципа создания широтно-долготных цепочек, охватывающих наиболее важные регионы РФ с точки зрения обеспечения их ионосферной информацией [1].

Определение местоположения пункта наблюдения радиотомографической сети и организация его деятельности осуществляются в соответствии с решением Росгидромета (специально уполномоченного федерального органа исполнительной власти в области гидрометеорологии и смежных с ней областях). К критериям отбора местоположения пунктов наблюдения сети относятся:

- возможности и обязательства местных структур Росгидромета в отношении обеспечения непрерывности функционирования станции;
- географическая репрезентативность наблюдений;
- возможности передачи требуемых параметров наблюдения.

В настоящее время зондирование ионосферы, которое возможно проводить силами ионосферной станции представляется следующими

© Литвинов С. В., Милорадов Г. А., Авдеев К. В., 2022

вариантами: наземные исследования (вертикальное и наклонное зондирование) и с применением космических аппаратов (трансионосферное и внешнее зондирование).

При использовании исключительно методов ВЗ и НЗ существует возможность получать информацию о явлениях различной пространственной протяжённости, от размеров, сопоставимых с длиной волны (1 ~ 50 м), до размеров, заметно превышающими размеры первой зоны Френеля, т. е. по горизонтали сопоставимыми с высотой максимума ионосферы (от 200 до 350 км). Если пункт оборудован дополнительно устройствами для приёма сигналов ВнЗ и ТИЗ, то при высоте орбиты ИСЗ порядка 1 000 километров из этого пункта возможно наблюдать за состоянием ионосферы на дистанциях, достигающих 5 000 километров.

Таким образом, становится видна необходимость использования т. н. двухуровневой наземно-космической системы ионосферных исследований, которая функционирует по единой программе измерений, сбора и первичной обработки данных и передачи в соответствующие инстанции и предоставления необходимой информации потребителям. Отсюда ясно, что для совмещения работ наземной и космической техники по программам ВЗ, ВнЗ и ТИЗ необходимо предусмотреть подключение адаптивных режимов зондирования штатных как наземных, так и бортовых измерительных комплексов.

На рис. 1 показана сеть действующих и проектируемых пунктов размещения ионозондов CADI в российском секторе Арктики. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт для исследований ионосферы в высокоширотной области в качестве базового ионозонда выбрал CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) канадского производства [2]. ААНИИ предлагает потребителям ионограммы и табличные формы текущих значений параметров, как в режиме on-line, так и доступ к архивным данным.



Рис. 1. Размещение ионозондов ААНИИ в Арктике

Продолжительный опыт успешной эксплуатации ионозонда CADI в условиях полярных широт, включая его работу в Российской Арктике,

показал полное соответствие получаемых ионограмм техническим и эксплуатационным требованиям, предъявляемым к сетевому ионозонду, предназначенному для непрерывного мониторинга геофизической обстановки в высоких широтах. Отмечается способность CADI работать в автономном режиме в течение нескольких суток.

Новейший ионозонд «Парус-А», создан по заказу ФГБУ «ИПГ» специалистами ИЗМИРАН совместно с предприятием НТЦ «Радикон-М» [3]. Станция Парус-А работает в автоматическом режиме и предназначена для диагностики состояния ионосферы методом импульсного вертикального и наклонного зондирования, прямого (ТИЗ) и обратного (ОТИЗ) трансионосферного зондирования. С 2010 года было изготовлено и запущено 10 ионозондов Парус-А, их размещение показано на рис. 2.

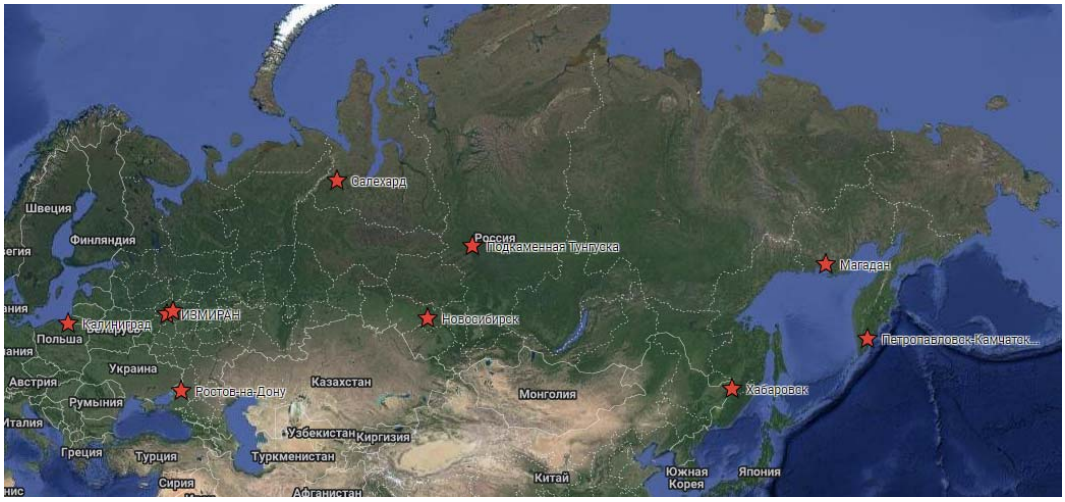


Рис. 2. Размещение ионозондов «Парус-А»

Отдельно для решения задач определения параметров ионосферы в сети загоризонтного обнаружения Австралии JORN (Jindalee Operational Radar Network) создана система ионосферного обеспечения (рис. 3). В систему входит радар рассеяния низкой мощности, КВ-спектральное сканирование, радар ВНЗ, а также подсистему ионосферного зондирования, состоя.



Рис. 3. Размещение ионозондов системы JORN

Подсистема ионосферного обеспечения состоит из 12 собственных вертикально-наклонных ионозондов, 5 ионозондов Департамента Обороны и 7 приемоответчиков (рис. 3) [4]. Все это позволяет контролировать состояние ионосферы в области отражения радиосигналов.

По-прежнему важной задачей является изучение ионосферы и определение параметров для практического использования, в т. ч. в интересах загоризонтного обнаружения. Существующие сети ионосферных станций доказали свою надежность и эффективность и нуждаются в дальнейшем расширении. Выбор места развертывания ионозонда является нетривиальной задачей, помочь решить которую способны программные средства. В том числе разработанная программа моделирования системы станций ионосферного наблюдения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022 г.

Список литературы

1. РД 52.26.817-2015 «Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть I. Ионосферные наблюдения». Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2015. 200 с.

2. Выставной В. М., Макарова Л. Н., Широчков А. В., Егорова Л. В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионозонда CADI // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 4. С. 1–10. EDN RCWNTB.

3. Гивишвили Г. В., Крашенинников И. В., Лещенко Л. Н., Власов Ю. М., Кузьмин А. В. Ионозонд «Парус-А»: функциональные возможности и перспективы // Гелиофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 68–74.

4. Jindalee Over-the-horizon Radar, Nomination for Heritage Recognition, May 2016, p. 79.

5. Литвинов С. В., Авдеев К. В., Корляков Д. С., Бондарь А. А. Особенности моделирования сети наземных ионосферных станций // Сб. науч. ст. по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф. «Радиоинфоком-2022», г. Москва, РТУ МИРЭА: сб. науч. ст. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 96–101.

S. V. Litivnov, G. A. Miloradov, K. V. Avdeev

RTU MIREA, Moscow, Russia

Litvinov_S@mirea.ru, Miloradov@mirea.ru, Avdeev@mirea.ru

DESIGN OF REGIONAL NETWORKS OF GROUND-BASED IONOSPHERIC STATIONS

The article discusses the construction of ionosphere sensing networks by ground-based equipment. The existing networks are analyzed, such as the AARI high-latitude ionosonde network, the Parus-A ionosonde network (IPG) and the JORN ionospheric support network (Australia). It is necessary to continue work on the modernization and expansion of Russian ionospheric monitoring networks, including with the use of space grouping.

Keywords: ionosphere, vertical sounding, Parus-A, CADI, JORN.

УДК 004.8

Н. Г. Марков[1], К. А. Маслов[1], И. А. Керчев[2], О. С. Токарева[1], К. Р. Мачука[1], В. В. Осипова[1]

[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, kristianrodrigo1@tpu.ru, vikosi@tpu.ru

ПОЛНОСВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПОВРЕЖДЕННЫХ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ СИБИРСКОЙ КЕДРОВОЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ С БПЛА

Аннотация. Рассмотрена задача классификации деревьев сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом, на изображениях с беспилотных летательных аппаратов. Для ее решения предложены и реализованы две модели сверточных нейронных сетей, основанные на архитектуре полносверточной сети U-Net. Исследования показали, что обе модели позволяют успешно классифицировать деревья классов «Условно здоровое», «Свежезаселенное», «Старый сухостой» и «Фон». Качество классификации деревьев, находящихся в промежуточных состояниях, несколько ниже.

Ключевые слова: союзный короед, сосна сибирская кедровая Pinus sibirica, классификация изображений, модели полносверточных нейронных сетей U-Net.

Введение. В последние годы все чаще при мониторинге состояния лесных ресурсов применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1, 2]. Использование БПЛА особенно актуально для оперативного выявления деревьев, заселенных насекомыми-вредителями. При этом изображения лесных массивов, получаемые с помощью установленных на БПЛА фото или видеокамер, должны быть оперативно дешифрированы с целью оценки состояния деревьев, пораженных насекомыми-вредителями.

В данной работе предложены и исследуются модели сверточных нейронных сетей (СНС) при решении задачи классификации деревьев сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica* Du Tour, поврежденных союзным короедом *Ips amitinus* Eichh, на изображениях с БПЛА.

Задача классификации пораженных деревьев. В качестве исходных данных использовались фотоснимки, сделанные на штатную камеру БПЛА DJI Phantom 3 Standard. При анализе изображений с БПЛА деревьев *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом, экспертами выделялись пять классов их жизненного состояния [3]: «Условно здоровое», «Свежезаселенное», «С усохшей вершиной», «Свежий сухостой» и «Старый сухостой». Шестым классом являлся «Фон» –

© Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев И. А., Токарева О. С., Мачука К. Р., Осипова В. В., 2022

деревья других пород и иные объекты земной поверхности. Каждое из деревьев экспертом путем визуального дешифрирования относилось к одному из классов. Кроме разметки деревьев по классам осуществлялось оконтуривание их крон. В итоге получены эталонные карты сегментации.

Разведочный анализ карт сегментации показал, что имеется проблема – значительное преобладание пикселей класса «Фон» и слабая представленность некоторых классов деревьев. Также выявлено, что учет только цветовых характеристик пикселей, составляющих сегменты, не позволяет достичь высокой разделимости классов пораженных деревьев *Pinus sibirica*. Все это указывает на необходимость использования сложных моделей СНС, решающих задачи семантической сегментации.

Модели полносверточных сетей. Для решения задачи мультиклассификации деревьев *Pinus sibirica* разработаны две новые модели СНС, каждая из которых основана на известной модели полносверточной сети U-Net [4], позволяющей ввести семантическую сегментацию изображений (попиксельную классификацию). В исходную модель U-Net вносились такие изменения: заменена функция активации на функцию ELU, изменены размеры входных и выходных тензоров и добавлены слои пакетной нормализации, а слои свертки не изменяли широту и высоту карт признаков. В итоге получена модифицированная модель U-Net. Далее на ее основе и предложенной в работе [3] идеи введения вместо модели U-Net ансамбля из трех таких моделей различной глубины была разработана вторая модель полносверточных сетей – multihead-U-Net, сокращенно MH-U-Net. По сравнению с первой предложенной моделью она имеет существенные изменения: вместо одного используются три входа разных масштабов (256×256×3, 128×128×3 и 64×64×3), также имеются три выхода различных масштабов, а процедура Dropout заменена на пространственную процедуру Dropout.

Обучение и исследование разработанных моделей СНС. Для формирования обучающей, валидационной и тестовой выборок исходные изображения деревьев *Pinus sibirica* были нарезаны на фрагменты размером 256 на 256 пикселей путем сдвига предыдущего фрагмента в 128 пикселей. Всего было получено 10 455 обучающих и 2 880 валидационных фрагментов изображений. Отметим, что объемы выборок отличаются от использованных нами при проведении первых исследований изображений деревьев *Pinus sibirica* [3]. При обучении использовалась техника аугментации «на лету», позволяющая расширять обучающую выборку синтезированными фрагментами непосредственно во время обучения.

Для оценки эффективности предложенных моделей СНС использовалась метрика Intersection over Union (*IoU*). Значения *IoU*, превышающие 0,5, соответствуют приемлемому качеству классификации. Использовалась также метрика mean Intersection over Union (*mIoU*), рассчитываемая как среднее значение *IoU* по всем классам деревьев. При поиске оптимальных весовых коэффициентов моделей максимизировалась метрика *mIoU* с использованием алгоритма оптимизации Adam.

На рис. приведены эталонная карта сегментации и результаты сегментации изображения тестового участка, полученные с помощью обученных моделей полносверточных сетей. В табл. показаны значения метрики *IoU* для различных классов деревьев и фона для каждой модели СНС, а также значения *mIoU* для валидационной выборки (столбец val) и для тестовой выборки (столбец test).

Анализ изображений на рис. показывает, что реализованные модели полносверточных сетей способны воспроизводить границы между деревьями и успешно классифицировать значительную часть пикселей.

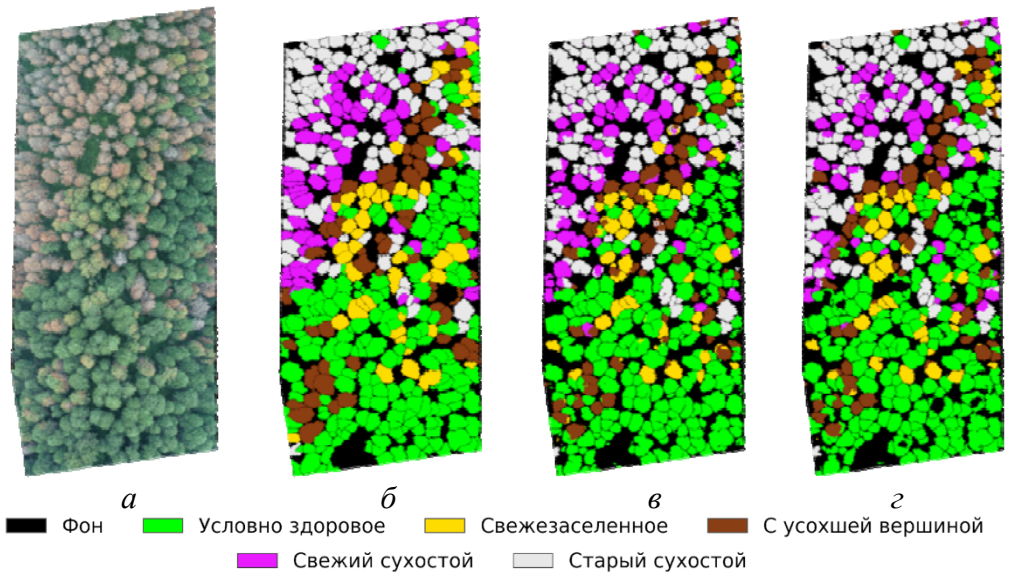


Рис. Результаты сегментации деревьев *Pinus sibirica* на тестовом участке: *а* – изображение тестового участка; *б* – эталонная карта сегментации; *в* – результат сегментации с применением модифицированной модели U-Net; *г* – модели MH-U-Net

Таблица

Значения метрик качества классификации изображений деревьев *Pinus sibirica*

Модель СНС	IoU						mIoU	
	Фон	Условно здоровое	Свежеза-селённое	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	val	test
U-Net	0,76	0,72	0,68	0,63	0,68	0,74	0,69	0,70
MH-U-Net	0,76	0,74	0,70	0,64	0,61	0,72	0,67	0,69

Из табл. видно, что обе модели СНС продемонстрировали высокое качество классификации пикселей классов «Фон», «Условно здоровое», «Свежезаселенное» и «Старый сухостой». Модифицированная модель U-Net показывает невысокое качество классификации деревьев класса «С усохшей вершиной», а модель MH-U-Net – деревьев классов «С усохшей вершиной» и «Свежий сухостой». Однако эти результаты превосходят результаты, изложенные в [3]. Модифицированная модель U-Net по метрике *mIoU* в случае валидационной и тестовой выборок показывает более высокий результат, чем модель MH-U-Net.

Заключение. Предложены и исследованы две модели полносверточных нейронных сетей для классификации изображений деревьев *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом *Ips amitinus* Eichh. Показано, что обе модели успешно распознают на изображениях с БПЛА деревья классов «Условно здоровое», «Свежезаселенное», «Старый сухостой» и «Фон». Качество классификации поврежденных деревьев, находящихся в промежуточных состояниях, несколько ниже.

Мониторинг состояния лесных массивов проводился в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (тема № 121031300226-5).

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.

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 sensing. 2019. Vol. 11. No. 6. 643.

3. Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев И. А., Токарева О. С. Модели U-Net для семантической сегментации поврежденных деревьев сосны сибирской кедровой на снимках с БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 65–77.

4. 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 10.07.2022).

N. G. Markov[1], K. A. Maslov[1], I. A. Kerchev[2], O. S. Tokareva[1], C. R. Machuca[1], V. V. Osipova[1]

[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, kristianrodrigo1@tpu.ru, vikosi@tpu.ru

FULLY CONVOLUTIONAL NETWORKS FOR CLASSIFICATION OF DAMAGED *PINUS SIBIRICA* TREES IN UAV IMAGERY

In this paper the semantic segmentation of images from unmanned aerial vehicles of Siberian pine trees *Pinus sibirica,* damaged by the alien bark beetle, is carried out. Two models of fully convolutional networks based on the U-Net architecture are proposed and implemented. Studies has shown that both models can successfully classify trees of the “Conditionally healthy”, “Recently colonised trees”, “Old deadwood” and “Background” classes. The quality of segmentation of trees in intermediate states in some measure is lower.

Keywords: alien bark beetle, Siberian cedar pine Pinus sibirica, semantic segmentation, fully convolutional network, U-Net models.

УДК 004.042

А. В. Павлов, И. А. Никитин, А. В. Гронь, Т. Ю. Головина

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
e-mail: Pavlov_av@ntsomz.ru

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ФОНД ДАННЫХ ДЗЗ ИЗ КОСМОСА. ОСОБЕННОСТИ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ДЗЗ ФИЗИЧЕСКИМ И ЮРИДИЧЕСКИМ ЛИЦАМ

Аннотация. Определение федерального фонда данных ДЗЗ. Основные нормативные правовые акты. Использование технологии автоматической потоковой обработки информации. Организация предоставления данных ДЗЗ через новый геопортал Госкорпорации «Роскосмос» с акцентом на оказание услуг для физических лиц. Основные преимущества заказа данных ДЗЗ из федерального фонда данных ДЗЗ. Интеграция федерального фонда данных ДЗЗ с другими информационными системами.

Ключевые слова: Федеральный фонд данных ДЗЗ, данные ДЗЗ, геопортал Госкорпорации «Роскосмос».

Оператор Федерального фонда ДЗЗ

В 2018 г. в Закон о космической деятельности Российской Федерации были внесены изменения в части определения федерального фонда данных ДЗЗ (далее – Фонд), его назначения и предоставления данных за плату. Фонд представляет собой совокупность аппаратно-программных средств и технологий, предназначенных для сбора, хранения и выдачи потребителям данных ДЗЗ, полученных с государственных и негосударственных космических аппаратов ДЗЗ, являющихся государственным электронным информационным ресурсом Российской Федерации.

Оператором федерального фонда данных ДЗЗ является Госкорпорация «Роскосмос». На сегодняшний день в Фонде хранится более 4 Пб данных ДЗЗ с различных космических аппаратов ДЗЗ, доступных для заказа потребителям космической информации.

Новый геопортал Госкорпорации «Роскосмос»

Заказ данных ДЗЗ производится с использованием нового геопортала Госкорпорации «Роскосмос» – https://next.gptl.ru.

Геопортал Роскосмоса – ресурс, который сочетает в себе средство просмотра космических снимков земной поверхности, поиска/заказа данных из Фонда.

Обновленный геопортал стал интуитивно понятен пользователям, поиск и заказ данных ДЗЗ выполняются значительно быстрее, появилась возможность «вырезки» необходимого района интереса и, наконец, данные ДЗЗ теперь доступны для физических лиц с возможностью проведения онлайн оплаты.

© Павлов А. В., Никитин И. А., Гронь А. В., Головина Т. Ю., 2022

Хранение данных в облачном объектном хранилище S3 дает возможность потребителям просматривать готовую продукцию в полном разрешении онлайн, непосредственно в геопортале (рис. 1).

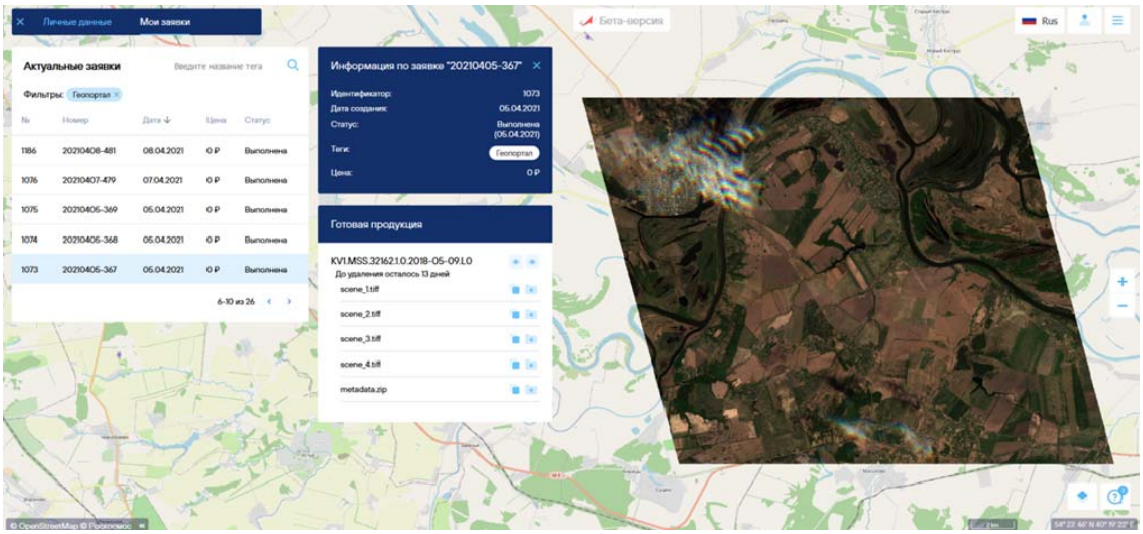


Рис. 1

Особенности заказа данных ДЗЗ из Фонда

Особенностями заказа данных из Фонда являются:

- Удобство поиска, просмотра и заказа архивных данных ДЗЗ.
- Полностью автоматическая обработка данных ДЗЗ новым программным комплексом и возможность получения готовой продукции в личном кабинете.
- Полностью автоматический технологический цикл исполнения заказов.
- Высокая скорость исполнения заказа (от нескольких минут до 10 рабочих дней с момента оформления заявки).
- Возможность заказа данных физическими лицами и оплата онлайн. Оперативное оформление заказа данных юридическими лицами по договору-оферте.

Интеграция Фонда с другими информационными системами

На сегодняшний день одним из оптимальных способов использования данных ДЗЗ является интеграция региональных и ведомственных информационных систем с Фондом посредством API.

Уже сегодня Фонд взаимодействует с:

Банком базовых продуктов межведомственного использования;

Уникальными отраслевыми сервисами на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса;

Единым информационным ресурсом (ЕИР) о земле и недвижимости с участием Росреестра и Министерства цифрового развития;

Единой системой мониторинга реализации нацпроектов с участием федерального казначейства Российской Федерации;

Геоинформационной системой Владимирской области;

Геопорталом Республики Коми;

Югорским НИИ информационных технологий.

Предоставление данных для физических и юридических лиц

Физическим и юридическим лицам обеспечен доступ в Фонд для заказа данных ДЗЗ по ценам, определенным правилами определения размера платы за предоставление данных дистанционного зондирования Земли из космоса и копий данных дистанционного зондирования Земли из космоса. 13 апреля 2021 г. Госкорпорация «Роскосмос» установила стоимость базовой расчетной единицы:

для космического аппарата типа «Ресурс-П» и «Ресурс – ДК» (аппаратура «Геотон») – 22,2 рубля, для космического аппарата типа «Канопус-В» (аппаратура ПСС/МСС) – 16,4 рублей, для космического аппарата типа «Метеор-М» (аппаратура КМСС, МСУ-МР) – 0 рублей, с КА типа «Электро-Л» (аппаратура МСУ-ГС) – 0 рублей. Стоимость данных довольно низкая, что делает их более чем доступными для пользователей.

Плата, получаемая за предоставление данных и копий данных, содержащихся в Фонде, зачисляется в доход федерального бюджета.

A. V. Pavlov, I. A. Nikitin, A. V. Gron, T. Yu. Golovina

JSC «Russian Space Systems», Moscow, Russian Federation
e-mail: Pavlov_av@ntsomz.ru

FEDERAL FUND OF SPACE REMOTE SENSING DATA. DISTINCTIVE FEATURES OF PROVIDING REMOTE SENSING DATA TO THE PHYSICAL AND LEGAL ENTITIES

Determination of the Federal Fund of Space Remote Sensing Data. Basic statutes and regulations. Utilization of the technology of automatic processing of stream information. Organization of the provision of remote sensing data through the new geoportal of the State Space Corporation «Roscosmos» with an emphasis on the provision of services for individuals. The main advantages of ordering remote sensing data from the federal fund of remote sensing data. Integration of the federal fund of remote sensing data with other information systems.

Key words: Federal fund of remote sensing data, remote sensing data, geoportal of the State Space Corporation «Roscosmos».

УДК 504.61:528.913(004.9)

Е. В. Павлова[1], К. С. Алсынбаев[2]
[1]Кандидат географических наук, ФГБОУ ВО ХГУ им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия
e-mail: eve21@yandex.ru
[2]Кандидат технических наук, доцент,ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта», Калининград, Россия
e-mail: alsynbaevkamil@yandex.ru

ГИС-ПРОЕКТ «РАСТИТЕЛЬНОСТЬ РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ» КАК ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО КАРКАСА ТЕРРИТОРИИ

Аннотация. Статья посвящена ГИС-проекту «Растительность Республики Хакасия», который будет основой в формировании его природного каркаса. Основной целью работы стало формирование системы управления рационального природопользования для поддержания экологической стабильности на территории Республик Хакасия по средствам создания ГИС-проекта «Природный каркас Республики Хакасии». В статье изложен первый этап формирования природного каркаса – это создание ГИС-проекта «Растительность Республики Хакасия». В работе использовался геоинформационный метод, с помощью которого проводилась оцифровка растровой карты в программе ArcGis 10.2.1. При создании проекта использовалась растровые карты, космические снимки и векторные слои. В результате оцифровки растрового слоя были получены полигоны с метками, обозначающими растительность. С включением дополнительных элементов и использованием существующих природных каркасов возможно создание ГИС-проекта «Природный каркас Республики Хакасия», который будет способствовать решению комплекса региональных экологических, экономических и социальных проблем региона.

Ключевые слова: ГИС-проект, Республика Хакасия, природный каркас территории, растительность Республики Хакасия.

Картографирование растительного покрова для различных научных направлений, имеет высокую фундаментальную значимость. Знания о пространственно-временной динамике, видовом разнообразии и экологии представляют собой синтез информации являющейся основой экосистем и биосферы в целом.

В настоящее время для территории Хакасии не существуют актуальные геоботанические карты, отражающие современное состояние растительного покрова, несмотря на высокую потребность в них для решения комплекса региональных эколого-экономических, природоохранных и социальных задач. Актуальность данных исследований ориентировано на сохранение фиторазнообразия и создания природного каркаса территории. В результате активного развития информационных технологий появились возможности создания геоинформационных систем (ГИС) в том числе и геоботанических, представляющих собой связанные тематические картографические слои.

© Павлова Е. В., Алсынбаев К. С., 2022

На территории исследования с 1976 г. под руководством А. В. Куминовой комплексного и масштабного картографирования растительности не проводилось, однако были исследования по составлению Ландшафтной карты Республики Хакасия М 1:1 000 000 Семенова Ю. М., Лысановой Г. И. и Максютовой Е. В. Также проводились более детальные исследования других авторов, но, к сожалению, они были разрозненные и не на всю территорию исследования [1–4].

Объектом нашего изучения является карта растительности Республики Хакасия, предметом изучения – формирование природного каркаса Республики Хакасия на основе карты растительности.

Основной целью работы стало формирование системы управления рационального природопользования для поддержания экологической стабильности на территории Республик Хакасия по средствам создания ГИС-проекта «Природный каркас Республики Хакасии».

В настоящее время при грантовой поддержке проводятся полевые исследования для составления серии мелкомасштабных и крупномасштабных картографических материалов для Республики Хакасия. Карты будут составлены с помощью программы ArcGis. Первым этапом работы в этом направлении стало создание ГИС-проекта «Растительность Республики Хакасия», которое положило начало работы по формированию природного каркаса Республики Хакасия.

Природный каркас территории (ПКТ) – это система взаимосвязанных узлов и линий особого геоэкологического значения, функционирование которых обеспечивает экологическое равновесие [5]. По мнению разных авторов, ПКТ выполняет ряд функций: средообразующую; транспортную; средозащитную; ресурсоохранную и др. Выделение структурных компонентов природного каркаса может производиться на основе функций выполняемых территорией и её положения в иерархии геосистем. К структурным компонентам природного каркаса территории (далее – ПКТ) в зависимости от выполняемых функций относятся узлы, транзитные коридоры и буферные территории [6].

ГИС-проект «Растительность Республики Хакасия» будет включать в себя несколько элементов – это крупные и не большие массивы леса, долины и поймы рек, зеленые зоны поселений. Среди объектов узлового статуса можно будет выделить особо ценные территории – ключевые ботанические территории (далее – КБТ) имеющие особое значение для сохранения разнообразия флоры и фауны [7].

Для создания файла ГИС-проекта «Растительность Республики Хакасия» в программе ArcGIS 10.2.1 и формирования базы геоданных необходимо было провести сбор исходных материалов: растровый файл карты растительности Хакасской автономной области 1972 г., составленной по материалам геоботанической экспедиции Центрального Сибирского ботанического сада СО АН СССР; базовая карта «World Imagery» с космическими снимками; мультиспектральный снимок Landsat-7; топографические карты на территорию исследования М 1: 200 000

и 1:100 000; карта растительности Хакасской автономной области М 1:300 000; векторные данные из открытых источников по границам Республики Хакасия, по гидрологии, граница республики населённым пунктам были получены из открытых источников (OpenStreetMap). В рамках сотрудничества с Дирекцией по ООПТ Республики Хакасия были получены векторные данные границ охраняемых территорий данного ведомства «Границы региональных ООПТ.shp». Для более детальной привязки растра была выбрана базовая карта с космическими изображениями разрешений от 15 м до 0,3 м. После сбора данных был сформирован ГИС-проекта «Растительность Республики Хакасия».

Для начала работы с растром была проведена его привязка с подбором рабочей проекции – Transverse_Mercator, система координат: GCS_WGS_1984 зона 46 (WGS_1984_UTM_Zone_46N). Базовая карта имеет проекцию WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere, что соответствует необходимым техническим характеристикам. Были выставлены тики для соответствия соединения и дальнейшего проецирования растра. В свойствах «отображение» растрового слоя растительности, была изменена прозрачность до 80 %. Далее при работе использовались инструменты анализа изображения со шторкой и мерцанием для выставления тиков.

После окончания привязки исходный растр карты растительности был трансформирован в новый файл для оцифровки полигонов. Таким образом, суммарное количество тиков (точек привязки) достигло 692 шт. Порядок пространственной трансформация не превышал третьего полинома. Тики выставлялись для привязки растра на линии ограничивающие полигоны и точки населённых пунктов. Особое значение имели тики, выставленные за пределами основного рисунка карты и на крайних границах, так как они позволили критически не изменять конфигурацию площадей растительных сообществ (рис. 1).

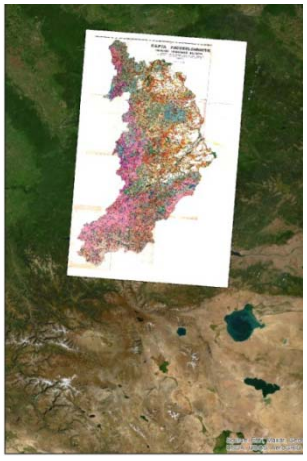


Рис. 1. Карта растительности Хакасской автономной области 1972 г.

После пространственной привязки и трансформации растра мы создали векторный линейный слой на основе растровой карты, после чего

конвертировали его в полигоны. Следующим этапом была проведена конвертация объектов (полигонов) в точку, для обозначения растительных сообществ внутри полигона (рис. 2). На каждом из этапов была проведена верификация данных. Так, при пространственной привязки и трансформации растра были использованы космические снимки Landsat 7 и базовые карты «World Imagery» имеющие пространственную привязку. Созданные точки (метки) были проверены на ошибки с помощью SQL запроса.

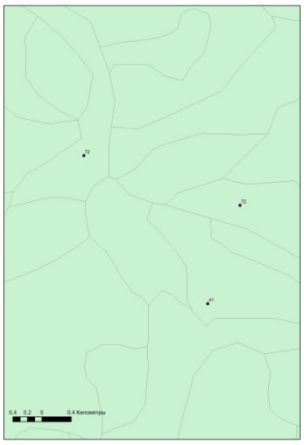


Рис. 2. Фрагмент векторной карты растительности с метками

Таким образом, был проведён сбор и компиляция материала с последующим приведением в единую систему координат данных из фондовых и ведомственных источников. В структуру базы данных проекта были включены: растровые данные, векторные слои, таблица в формате (*.xlsx) с данными растительных сообществ. Описана сформированная база геоданных, содержание и технические характеристики ГИС-проекта «Растительность Республики Хакасия». Спроецирован растр карты растительности, последовательно созданы векторные слои – линейный слой по границам растра, далее полигональный и точечный слой для обозначения растительных сообществ.

Подготовлен материал для разработки рекомендаций по оптимизации природопользования и решения задач по детализации природного каркаса Республики Хакасия, на основе ГИС-проекта «Растительность Республики Хакасия».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-20012, https://rscf.ru/project/22-17-20012/ при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

Список литературы

1. Семенов Ю. М., Лысанова Г. И., Максютова Е. В. Ландшафтный анализ агроприродного потенциала геосистем Минусинской котловины // География и природные ресурсы. 2004. № 2. С. 78–84.

2. Растительный покров Хакасии / под ред. А.В. Куминовой. Новосибирск: Наука, 1976. 421 с.

3. Шуркина А. И., Зоркина Т. М., Шевырногов А. П. Исследование современного растительного покрова Республики Хакасия на основе интеграции спутниковых и наземных данных // Вестник КрасГАУ. 2007. № 5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sovremennogo-rastitelnogo-pokrova-respubliki-hakasiya-na-osnove-integratsii-sputnikovyh-i-nazemnyh-dannyh (дата обращения: 05.02.2022).

4. Лысанова Г. И., Семенов Ю. М., Сороковой А. А. Ландшафтное картографирование Республики Хакасия // Геодезия и картография. 2016. № 12. С. 16–23.

5. Каваляускас П., Лекавичюс А. Формирование сети охраняемых территорий // Экологическая оптимизация агроландшафта. М.: Наука, 1987. С. 212–218.

6. Стоящева Н. В. Экологический каркас территории и оптимизация природопользования на юге Западной Сибири (на примере Алтайского региона). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 140 с.

7. Ключевые ботанические территории Алтае-Саянского экорегиона: опыт выделения / И. А. Артемов, А. Ю. Королюк, Н. Н. Лащинский и др.; Под общ. ред. И. Э. Смелянского, Г. А. Пронькиной. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 260 с.

E. V. Pavlova[1] K. S. Alsynbayev[2]

[1] Candidate of Geographical Sciences, Khakas State University, Abakan, Russia
e-mail: eve21@yandex.ru
[2]Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
FSAOU VO «BFU named after I. Kant», Kaliningrad, Russia
e-mail: alsynbaevkamil@yandex.ru

GIS-PROJECT «VEGETATION OF THE REPUBLIC OF KHAKASSIA» AS THE BASIS FOR THE FORMATION OF THE NATURAL FRAMEWORK OF THE TERRITORY

The article is devoted to the GIS project «Vegetation of the Republic of Khakassia», which will be the basis for the formation of its natural framework. The main purpose of the work was the formation of a management system of rational nature management to maintain environmental stability in the territory of the Republics of Khakassia by means of creating a GIS project «Natural framework of the Republic of Khakassia». The article describes the first stage of the formation of a natural framework – the creation of a GIS project «Vegetation of the Republic of Khakassia». The geoinformation method was used in the work, which was used to digitize the raster map in the ArcGIS 10.2.1 program. When creating the project, raster maps, satellite images and vector layers were used. As a result of digitizing the raster layer, polygons with labels denoting vegetation were obtained. With the inclusion of additional elements and the use of existing natural frameworks, it is possible to create a GIS project «Natural Framework of the Republic of Khakassia», which will contribute to solving a complex of regional environmental, economic and social problems of the region.

Keywords: GIS-project, Republic of Khakassia, natural framework of the territory, vegetation, vegetation of the Republic of Khakassia.

УДК 629.78

В. О. Скрипачев, К. В. Авдеев, Т. Э. Гельфман

МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия
e-mail: skripatchevv@inbox.ru

УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РТУ МИРЭА – ИОНОСФЕРНЫЙ МОНИТОРИНГ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Аннотация. В работе рассмотрены возможности созданного в РТУ МИРЭА Учебно-научного центра космического мониторинга, его цели и задачи, а также перспективы его развития в целях мониторинга окружающей среды и космического пространства. Направления дальнейших научных исследований рассмотрены на примерах возможностей исследования ионосферы посредством приема и анализа сигналов от радиопередатчиков ОНЧ частотного диапазона и глобальных навигационных спутниковых систем, а также поверхности Земли посредством бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов. Приведены сведения о разрабатываемом РТУ МИРЭА малом космическом аппарате Cubesat 3U.

Ключевые слова: анализ сигналов, аппарат космический малый, ионосфера, мониторинг, очень низкие частоты, система глобальная навигационная спутниковая, Центр учебно-научный.

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в настоящее время осуществляется с привлечением множества разнообразных космических аппаратов (КА) со сложной бортовой научной аппаратурой, а также наземных радиотехнических комплексов для управления КА, приема и обработки поступающих от них данных. Разработка многофункциональной и сложной специальной бортовой и наземной радиоэлектронной аппаратуры предъявляет высокие требования к подготовке специалистов, что в свою очередь обусловливает актуальность внедрения в учебный процесс новых методов и технических средств обучения студентов.

Учебно-научный центр космического мониторинга РТУ МИРЭА

В целях проведения научных исследований и подготовки студентов к решению практических задач в РТУ МИРЭА создан Учебно-научный центр космического мониторинга (УНЦ Космоцентр), который позволяет осуществлять мониторинг околоземного космического пространства, ионосферы и поверхности Земли посредством применения наземных радиотехнических средств, а также приема и обработки данных от КА ДЗЗ. Средства Космоцентра предполагается применять как в интересах учебного процесса, так и для организации проведения НИОКР в интересах различных потребителей, в том числе и зарубежных [1], по следующим направлениям:

– освоение существующих и разработка новых технологий и технических средств автоматизированного приема и обработки данных многодиапазонной космической съемки океана и земной поверхности, выполняемой бортовыми специальными комплексами КА ДЗЗ;

© Скрипачев В. О., Авдеев К. В., Гельфман Т. Э., 2022

– наблюдение и диагностика процессов на поверхности Земли на предмет обнаружения границ и степени проявления природных и техногенных чрезвычайных ситуаций, параметров поверхности Земли в зависимости от климатических и метеорологических условий;

– мониторинг состояния литосферы, атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли посредством бортовой научной аппаратуры (БНА) КА, в том числе с целью исследования причин и морфологии искажений радиосигналов в атмосфере и ионосфере при прохождении по трассе «борт КА-Земля».

Антенные посты, входящие в состав Космоцентра, позволяют обеспечить прием информации с различных КА. Также Космоцентр РТУ МИРЭА включает следующие учебные и научные лаборатории: мониторинга окружающей среды и космического пространства, радиолокации и радионавигации, космических информационных систем, систем космической связи, научно-исследовательскую и студенческую учебно-научную лаборатории.

Сосредоточенный в Космоцентре научно-технический потенциал для выполнения научных исследований и обеспечения учебного процесса необходим и, в общем, достаточен для проведения НИОКР в области радиотехники и исследования ионосферы, как среды распространения радиоволн и в которой функционируют низкоорбитальные КА с высотами орбит до 1 000 км, а также для подготовки студентов названных выше специальностей. Интерес представляют изучение и научные исследования структуры ионосферы, свойств и динамики вариаций ее параметров, что дает будущим инженерам возможность решать разного рода прикладные задачи, имеющие отношение к процессам распространения радиоволн и мониторингу околоземного пространства, в том числе процессам, связанным с мониторингом сейсмической активности и обусловленным знанием физики взаимосвязи ионосферы с иными сферами Земли. В Космоцентре РТУ МИРЭА на настоящем этапе внимание сосредоточено на таких способах наблюдения ионосферы и диагностики ее состояния как: прием и анализ параметров сигналов ОНЧ-радиопередатчиков в частотном диапазоне 10…50 кГц; прием и анализ параметров сигналов от КА существующих и перспективных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС); анализ данных БНА КА.

В условиях ресурсных, в том числе финансовых, ограничений целесообразно рассматривать малобюджетные средства мониторинга состояния ионосферы. К таким средствам можно отнести, например, аппаратно-программные средства, позволяющие реализовать метод оценки состояния ионосферы посредством приема и анализа сигналов практически постоянно действующих радиопередатчиков ОНЧ диапазона (около 10…50 кГц).

Физический принцип такой диагностики состояния ионосферы заключается в приеме наземным радиоприемником сигналов известного множества (сегодня их около 30) пространственно разнесенных ОНЧ-радиопередатчиков. Распространение таких сигналов осуществляется

в своего рода «волновом канале», образованном земной поверхностью и E- или D-слоем ионосферы [2]. Вариации высоты слоя отражения ионосферы, а также коэффициента ее отражения/поглощения, приводят к изменениям амплитуды и фазы принимаемых сигналов. Анализ характеристик принимаемых сигналов и выявление аномалий в их поведении позволяет судить о воздействии на ионосферу ряда естественных или антропогенных факторов [3]. Авторами изготовлен и применяется аппаратно-программный комплекс (АПК), где в качестве аналого-цифрового преобразователя используется звуковая карта с частотой дискретизации не менее 96 кГц. Экспериментальный АПК, структурная схема которого приведена на рис. 1, включает в себя антенну, антенный усилитель, разработанный приёмник ОНЧ сигналов и персональный компьютер [3].

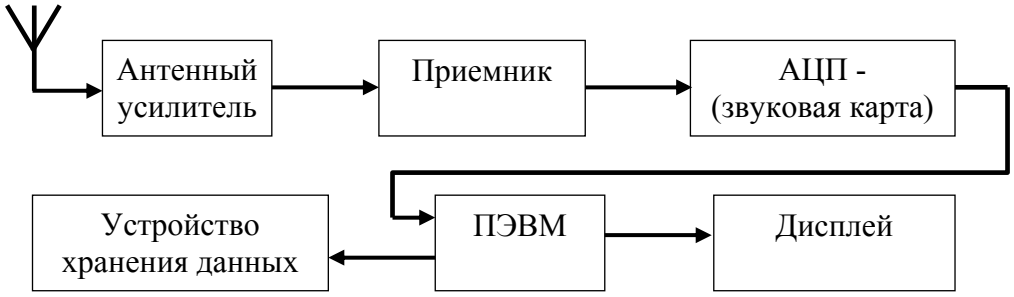


Рис. 1. Структурная схема экспериментального АПК

Различными исследователями в последние десятилетия активно разрабатываются технологии диагностики ионосферы, основанные на приеме и анализе характеристик сигналов от КА ГНСС (ГЛОНАСС, GPS и др.). Прием может осуществляться не только наземными навигационными приемниками, но и приемниками, установленными на борту низкоорбитальных КА с помощью метода радиозатменного зондирования ионосферы, где по характеристикам принятых сигналов от КА ГНСС выносится суждение о состоянии ионосферы вдоль трассы распространения сигнала, что позволяет исследовать морфологию естественных и искусственных возмущений полного электронного содержания в ионосфере и иные ее свойства.

Малые КА в мировой практике стали занимать особое место. При этом разрабатываются как одиночные малые КА, так и их кластеры, позволяющие решать широкий спектр задач мониторинга окружающей среды. Получившие широкое распространение малые КА класса Cubesat в настоящее время применяются либо как средство приобретения опыта в создании и эксплуатации космической техники, либо как инструмент для отработки новых инженерных и технологических решений. Однако, возможности КА типа Cubesat по размещению БНА ограничены, как правило, одним-тремя бортовыми приборами.

В настоящее время в РТУ МИРЭА ведется работа по созданию КА формата Cubesat 3U на базе платформы ГЕОСКАН, в том числе с возможностью использования радиозатменного метода зондирования ионосферы. Помимо бортового навигационного приемника сигналов ГНСС

на борт разрабатываемого КА предполагается установка оптической камеры, пространственное разрешение которой весьма редко применяется для выполнения прикладных задач, но на наш взгляд, данные с этой камеры могут быть использованы для уточнения метеорологических карт-схем погоды.

Заключение

Представляется актуальным на базе УНЦ Космоцентра РТУ МИРЭА создание прообраза регионального центра ДЗЗ и мониторинга окружающей среды, деятельность которого основана на применении новых моделей и методов обработки данных ДЗЗ, а также центра управления малыми КА в интересах решения хозяйственных и научных задач.

Создаваемое аппаратное оснащение УНЦ Космоцентр позволяет обеспечить подготовку студентов радиотехнических специальностей, востребованных на предприятиях ракетно-космической отрасли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022 г.

Список литературы

1. Программа разработки, создания и эксплуатации учебно-научного центра космического мониторинга «Космоцентр» на базе Московского технологического университета / А. С. Сигов, С. А. Кудж, А. В. Рагуткин [и др.] // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем: сборник научных трудов III Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 13–17 ноября 2017 года / Московский технологический университет (МИРЭА). М.: Моск. технол. ун-т (МИРЭА), 2017. С. 7–18.

2. Nathan Blaunstein, Eugeniu Plohotniuc. Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar. CRC Press, 2008. 600 p.

3. Скрипачев В. О., Пирхавка А. П., Полушковский Ю. А. Выявление внезапных ионосферных возмущений, обусловленных солнечными вспышками по сигналам наземных СДВ-радиопередатчиков // Фундаментальные проблемы системной безопасности: материалы II школы-семинара молодых ученых (02–04 июня 2015). Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина. Елец, 2015. С. 260–265.

V. O. Skripachev, K. V. Avdeev, T. E. Gelfman
MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
e-mail: skripatchevv@inbox.ru

EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC CENTER OF RTU MIREA - IONOSPHERIC MONITORING AND REMOTE SENSING OF EARTH

The paper considers the possibilities of the Educational and Scientific Center for Space Monitoring, created at RTU MIREA, its goals and objectives, as well as the prospects for its development in order to monitor the environment and space environment. Directions for further scientific research are considered on the examples of the possibilities of studying the ionosphere by receiving and analyzing signals from VLF radio transmitters and global navigation satellite systems, as well as the Earth's surface using onboard scientific equipment of small satellite. Information about the Cubesat 3U small satellite being developed by RTU MIREA is given.

Keywords: signal analysis, small satellite, ionosphere, monitoring, very low frequencies, global navigation satellite system, educational and scientific center.

УДК 519.6

Т. О. Шелопут

Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук, Москва, Россия
e-mail: t.sheloput@inm.ras.ru

МЕТОДИКА ПОСТАНОВКИ УСЛОВИЙ НА ОТКРЫТЫХ БОКОВЫХ ГРАНИЦАХ НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИОННОЙ АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ

Аннотация. В работе рассматривается методика постановки граничных условий на открытых границах в моделях гидротермодинамики морских акваторий, основанная на вариационной ассимиляции данных. Идея подхода состоит в том, чтобы в предположении о наличии данных наблюдений за характеристиками состояния акватории рассматривать задачу как обратную, в которой дополнительными неизвестными являются функции потоков через открытую границу. Приводятся результаты численного эксперимента по использованию описанного подхода для моделирования большого балтийского затока. Показано, что использование алгоритмов ассимиляции приводит к лучшему воспроизведению повышения солености в придонном слое по сравнению с использованием метода ньютоновской релаксации.

Ключевые слова: вариационная ассимиляция данных, открытые границы, Балтийское море, моделирование гидротермодинамики морской акватории, данные наблюдений.

Описание методики постановки граничных условий на открытых боковых границах. Математическое моделирование гидротермодинамики отдельных морских акваторий и прибрежных территорий является актуальной научной задачей, имеющей прикладное значение. Однако, при создании моделей таких акваторий необходимо не только учитывать специфику водного объекта, но и решать проблему задания граничных условий на открытых границах. Основная трудность заключается в отсутствии точной информации, характеризующей обмен массой и энергией с окружающими водами. Остроту проблемы можно снизить, если использовать методы вложенных сеток [1], задавать релаксацию к усредненным сезонным, среднемесячным, климатическим данным, использовать условия излучения и их модификации [2]. При наличии данных наблюдений за характеристиками состояния акватории (температурой, соленостью, уровнем) можно формулировать различные алгоритмы ассимиляции данных. Обзор известных методов ассимиляции данных в применении к задачам моделирования открытых акваторий приведен в работах [3, 4].

В настоящей работе рассматривается подход, основанный на методах решения обратных задач и вариационной ассимиляции данных. Идея

© Шелопут Т. О., 2022

данного подхода была предложена в работах [4, 5] и состоит в том, чтобы, в предположении о наличии данных наблюдений за характеристиками состояния акватории, рассматривать задачу как обратную, в которой дополнительными неизвестными являются функции потоков через открытую границу.

Рассмотрим данный подход на примере задачи о восстановлении потока через открытую границу для задачи переноса диффузии солености (S) [5]. Изменение поля солености в море описывается уравнением конвекции-диффузии в трехмерной области D. Это уравнение дополняется начальными и граничными условиями. Рассмотрим следующее граничное условие на открытой границе $\Gamma_{w,op}$:

$$U_n^{(-)} S + \frac{\partial S}{\partial N} = d_S,$$

где $U_n^{(-)} \equiv (|U_n| - U_n)/2$, U_n – нормальная составляющая скорости; d_S – дополнительная неизвестная функция потока соленой воды через открытую границу. Пусть имеются данные наблюдений S_{obs} на некотором участке Γ_{obs} границы области D на интервале времени (t_{j-1}, t_j). Задача вариационной ассимиляции данных о солености формулируется как задача минимизации функционала:

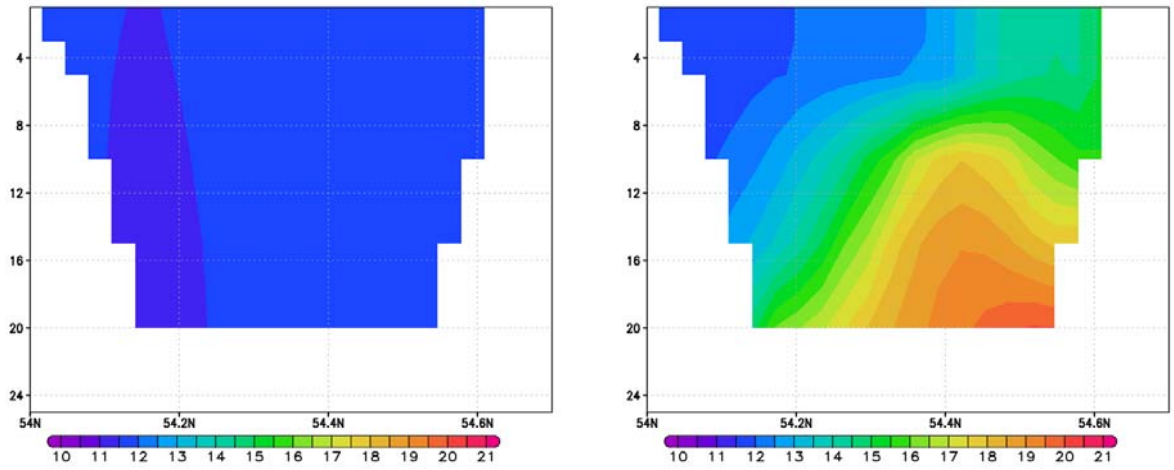
$$d_S = \arg\inf_{d_S} J_\alpha, \quad J_\alpha = \frac{\alpha}{2} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \int_{\Gamma_{w,op}} (d_S - d_S^{(0)})^2 d\Gamma dt + \frac{1}{2} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \int_{\Gamma_{obs}} (S - S_{obs})^2 d\Gamma dt,$$

Для решения задачи минимизации функционала используется метод градиентного спуска, в котором для нахождения градиента функционала применяются сопряженные уравнения.

Описанный подход был использован также при формулировке алгоритмов ассимиляции данных о температуре [4], уровне [4], скорости [6]. Данные алгоритмы ассимиляции были реализованы в модели гидротермодинамики Балтийского моря [7], разработанной в ИВМ РАН на базе INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Модель INMOM основана на системе уравнений, записанных в приближениях Буссинеска и гидростатики, в обобщенной σ-системе координат на сфере. Для аппроксимации модели по времени используется метод расщепления по физическим процессам. Алгоритмы ассимиляции реализовывались на соответствующих шагах схемы расщепления, причем решение прямых и сопряженных задач производилось в рамках одного шага по времени.

Результаты численных экспериментов. Рассмотрим результаты численного эксперимента по воспроизведению большого балтийского затока (ББЗ), произошедшего в декабре 2014 г., с использованием описанной методики постановки граничных условий на открытых боковых границах, реализованной в модели гидротермодинамики Балтийского моря. Сетка модели – 336×394 точки по поверхности (шаг сетки – около 3,5 км) и 25 σ-уровней, неравномерно распределенных по глубине.

Интегрирование по времени производилось с шагом $\Delta t = t_j - t_{j-1} = 300c$. Начальные данные брались из осредненных за несколько лет результатов расчетов на 1 ноября 2014 г. Атмосферный форсинг был получен с использованием данных ERA-Interim. Граница раздела Северного и Балтийского морей (открытая граница) проходила по широте 57,7° между мысом Гренен и устьем реки Гета-Эльв.



а *б*

Рис. Значения солености (е.п.с.) в проливе Фемарн-Бельт на долготе 11,4°: *а* – на 28.12.2014, результат расчета с использованием ньютоновской релаксации к данным наблюдений; *б* – на 28.12.2014, результат расчета с использованием вариационной ассимиляции

Как показали численные эксперименты, в расчете без использования алгоритма вариационной ассимиляции увеличения солености в придонном слое не наблюдалось. В расчете с использованием ньютоновской релаксации к данным наблюдалось увеличение значений придонной солености только в проливе Каттегат. Увеличения значений солености в проливе Фемарн-Бельт, как видно из рис., *а*, не наблюдалось. При использовании алгоритмов вариационной ассимиляции происходило увеличение значений солености в придонном слое в проливах Каттегат, Большой и Малый Бельт, Фемарн-Бельт (см. рис., *б*) и в районе полуострова Дарс. Однако существенных отличий в распределениях солености в районе южной части пролива Эресунн не наблюдалось – это может быть связано с использованием слишком грубой сетки и недостаточно детальной топографии дна. Тем не менее, на основе результатов численных экспериментов можно сделать вывод, что использование предложенной методики постановки граничных условий на открытых боковых границах в модели Балтийского моря для моделирования ББЗ является целесообразным.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 20-11-20057).

Список литературы

1. Mason E., Molemaker J., Shchepetkin A. F., Colas F., McWilliams J. C., Sangrà P. Procedures for offline grid nesting in regional ocean models // Ocean Modelling. 2010. Vol. 35. № 1. P. 1–15.
2. Marchesiello P., McWilliams J. C., Shchepetkin A. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models // Ocean modelling. 2001, Vol. 3. N. 1-2. P. 1–20.
3. Edwards C. A., Moore A. M., Hoteit I., Cornuelle B. D. Regional ocean data assimilation // Annual review of marine science. 2015. Vol. 7. P. 21–42.
4. Агошков В. И., Залесный В. Б., Шелопут Т. О. Вариационная ассимиляция данных в задачах моделирования гидрофизических полей в открытых акваториях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 1–16.
5. Шелопут Т. О., Гусев А. В. Методика постановки условий на открытых боковых границах в модели гидротермодинамики Балтийского моря на основе вариационной ассимиляции данных о солености // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 20–31.
6. Агошков В. И., Лезина Н. Р., Шелопут Т. О. Восстановление граничных функций на внешних и внутренних жидких границах в задаче гидродинамики открытой акватории // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60. № 11. С. 1915-1932.
7. Zalesny V. B., Gusev A. V., Chernobay S. Yu., Aps R., Tamsalu R., Kujala P., Rytkönen J. The Baltic Sea circulation modelling and assessment of marine pollution // RJNAMM. 2014. Vol. 29. № 2. P. 129–138.

T. O. Sheloput

Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: t.sheloput@inm.ras.ru

METHOD FOR SETTING CONDITIONS AT OPEN LATERAL BOUNDARIES BASED ON VARIATIONAL DATA ASSIMILATION

In the paper a method for setting boundary conditions at open boundaries in models of hydrothermodynamics of marine areas based on variational data assimilation is considered. The idea of the approach is the following: under the assumption of the availability of observational data on the water state characteristics the problem is considered inverse, where the additional unknowns are the functions of open boundary flows. The results of the numerical experiment on reproducing the major Baltic inflow using the described approach are presented. It is shown that the use of assimilation algorithms leads to a better reproduction of the salinity increase in the bottom layer compared to the relaxation method.

Keywords: variational data assimilation, open boundaries, Baltic Sea, modeling of a sea hydrothermodynamics, observational data.

УДК 528.8

В. Ю. Ширшова

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

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ КАК ОСНОВНОЙ ФАКТОР ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ПАРЫ

Аннотация. Выбор радиолокационных изображений (РЛИ), подходящих для использования в интерферометрии, является первым шагом, который необходимо выполнить для любой интерферометрической обработки. Это ключевой шаг, поскольку выбранные РЛИ и критерии выбора оказывают существенное влияние на конечный результат. Критерии – угол визирования, виток съемки, геометрическая и временная базовые линии, метеорологические условия и когерентность – зависят от конкретной задачи, для которого требуются интерферометрические информационные продукты. Выбор пары РЛИ требует предварительного последовательного физико-географического анализа территории, потому как основные параметры съемки связаны именно с географическими особенностями. В связи с возрастающей востребованностью и доступностью интерферометрических данных вопрос подбора данных крайне актуален для решения задач различного профиля: геология, строительство, геодезия и др.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиолокация, интерферометрия, ЦМР, смещения.

Наиболее востребованными информационными продуктами интерферометрической обработки являются цифровые модели рельефа и карты смещений. Методы обработки для получения этих продуктов можно разделить на классическую интерферометрию и дифференциальную интерферометрию, которая открывает целый раздел методов получения высокоточных смещений [1]. Интерферометрическая обработка начинается с выбора пары РЛИ, пригодных для создания одного из информационных продуктов. Одним из основных вопросов интерферометрической обработки является подбор пары на исследуемую территорию с соответствующими параметрами, потенциально обеспечивающими наилучший результат:

− Угол визирования и виток (восходящий/нисходящий);
− Геометрическая базовая линия (перпендикулярная);
− Временная базовая линия;
− Когерентность;
− Метеорологические условия.

Подбор пары РЛИ для интерферометрической обработки на практике напрямую связан с географией изучаемой территории – *физико-географической характеристикой*. Физико-географическая характеристика

© Ширшова В. Ю., 2022

представляет собой совокупность параметров позволяющих сформировать представление об изучаемой территории. К таким параметрам относятся: географическое положение, рельеф, почва, климат, флора и фауна, геологическое строение. Так когерентность между двумя РЛИ зависит от таких параметров как временная базовая линия, сезон и метеорологические параметры, а выбор угла визирования и витка съемки от рельефа местности [2].

1.1 Выбор пары РЛИ для формирования ЦМР

В целом для создания цифровых моделей рельефа на основе интерферометрических пар следует придерживаться следующих рекомендаций:

• Для минимизации временной декорреляции лучше использовать данные тандемной съемки [3].

• Развёртка фазы интерферограмм с очень малыми значениями перпендикулярной базовой линии (< 30 м) выполняется не трудоемко, однако является малоэффективной из-за ее высокой чувствительности к фазовому шуму и атмосферным воздействиям [4].

• Развертка фазы интерферограммы с нормальной базовой линией (значения выше ~ 450 м) обычно практически невозможна, если нет априорной ЦМР, и рельеф местности не очень ровный. Более того, когерентность, как правило, невелика из-за высокой геометрической и объемной декорреляции рассеяния [5–7].

• Оптимальная перпендикулярная базовая линия находится в диапазоне от 150 до 300 метров. Однако наилучший результат достигается при использовании более одной интерферограммы: интерферограммы с небольшими базовыми линиями могут быть использованы для развертки фазы интерферограмм с высокими базовыми линиями (за счет расчета периода неоднозначности по высоте для малых базовых линий и переноса критерия на высокие базы). Кроме того, различные интерферограммы могут быть объединены для уменьшения атмосферных артефактов.

• Значения когерентности зависят от погоды в конкретной местности. Не стоит использовать данные съемки во время дождя, снега или сильного ветра, а также полученные в очень жаркие дни: горячий воздух может содержать гораздо больше водяного пара, чем холодный воздух (основная причина атмосферных артефактов на интерферограммах SAR) [8]. Эти явления обычно приводят к потере фазовой когерентности.

• Ночные наблюдения обычно меньше подвержены влиянию атмосферных воздействий [8].

• Обычно тандемные пары, полученные на участках с растительностью в сухой сезон, показывают более высокие значения когерентности, чем те, которые были получены во время сезона дождей.

1.2 Выбор пары РЛИ для построения карты смещений

• Виток съемки (восходящий, либо нисходящий) определяется с учетом необходимости избежать увеличения переналожения (*foreshortening*) в интересующей области.

• Применяются пары РЛИ с наименьшей перпендикулярной базовой линией в требуемом диапазоне дат. Чем меньше базовая линия, тем меньше вклад топографической составляющей в интерферометрическую фазу. Как следствие, для вычитания топографической составляющей интерферометрической фазы потребуется менее точная ЦМР. Более того, чем меньше базовая линия, тем выше ожидаемая когерентность.

Список литературы

1. Энтин А. Л., Михайлюкова П. Г., Кедич А. И. и Харченко С. В. Современный опыт использования радиолокационной интерферометрии для регистрации изменений высотных отметок поверхности суши // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 2. С. 27–42.

2. Бадак Л. А., Захаров А. И., Костюк Е. А. и Ширшова В. Ю. Методические рекомендации по проведению радиолокационной интерферометрической съемки с целью формирования цифровой модели рельефа земной поверхности // Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. Сб. тр. X Всерос. науч.-техн. конф. 2021. С. 139–147.

3. Sansosti E., Lanari R., Fornaro G., Franceschetti G., Tesauro M., Puglisi G., and Coltelli M. Digital elevation model generation using ascending and descending ERS-1/ERS-2 tandem data // International Journal of Remote Sensing. 1999. Т. 20. №. 8. С. 1527–1547.

4. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F. and Massonnet D. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation // ESA Publications – 2007. URL: https://re.public.polimi.it/handle/11311/550055

5. Gatelli F., Guamieri A. M., Parizzi F., Pasquali P., Prati C. and Rocca F. The wavenumber shift in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Т. 32. №. 4. С. 855–865.

6. Zebker H. A. and Villasenor, J. Decorrelation in interferometric radar echoes // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 1992. Т. 30. № 5. С. 950–959.

7. Rodriguez E., Martin J. M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars // IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing). IET Digital Library, 1992. Т. 139. № 2. С. 147–159.

8. Hanssen R. F. Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry. Delft University Press, 1998.

V. Yu. Shirshova

Research Center for Earth Operative Monitoring, Moscow 127490, Russia
e-mail: shirshova_vu@ntsomz.ru

PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL CHARACTERISTICS OF THE TERRITORY AS THE MAIN FACTOR IN SELECTING THE PARAMETERS OF THE INTERFEROMETRIC PAIR

Selecting of radar images for one of interferometry application is the key step of Interferometric processing. Due to the growing demand and availability of interferometric data, the issue of data selection is extremely relevant for solving problems of various profiles: geology, construction, geodesy, etc. The criteria for data require a consistent physical and geographical analysis of the territory, because the main parameters are associated precisely with geographical features. Criteria – view angle, passes, survey revolution, geometrical and temporal baselines, meteorological conditions and coherence – depend on the specific application for which interferometric information products are required.

Key words: remote sensing, radar, InSAR, DEM, displacements.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 519.6

В. И. Агошков[1,2], В. П. Шутяев[1,3], Е. И. Пармузин[1], Н. Б. Захарова[1], Т. О. Шелопут[1,3], Н. Р. Лёзина[1]

[1]Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[3]Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
e-mail: parm@inm.ras.ru

ВАРИАЦИОННОЕ УСВОЕНИЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СО СПУТНИКОВ ДЛЯ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Аннотация. Рассмотрен алгоритм вариационного усвоения данных для модели динамики моря, разработанной в Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук. Подход основан на методе расщепления и минимизации функционала стоимости, связанного с данными наблюдений, путем решения системы оптимальности, которая включает сопряженные уравнения, а также наблюдения со спутников и ковариации фоновой ошибки. Представлены численные эксперименты с реальными данными наблюдений о температуре поверхности моря для модели динамики Черного моря с вариационным усвоением данных для восстановления потоков тепла на поверхности моря.

Ключевые слова: вариационная ассимиляции, температура поверхности моря, система оптимальности, функционал стоимости, данные наблюдений со спутника.

Введение. В последние годы методы исследования и численного решения задач вариационного усвоения данных, представляющих собой конкретные задачи оптимального управления, получили большое развитие в метеорологии и океанографии, где данные наблюдений усваиваются в моделях атмосферы и океана с целью получения начальных, граничных условий или других параметров модели для последующего моделирования и прогноза. Цель усвоения данных – получить лучшую оценку состояния конкретной физической системы, используя как информацию, полученную из наблюдений системы, так и математическую модель системы.

В данной работе представлены результаты решения задач вариационного усвоения данных, полученные в ИВМ РАН. В качестве приложения рассматривается математическая модель динамики Черного моря с блоком вариационного усвоения данных о температуре поверхности моря [1]. На основе вариационного усвоения данных

© Агошков В. И., Шутяев В.П., Пармузин Е. И. и др., 2022

наблюдений предложены алгоритмы решения обратных задач восстановления тепловых потоков на поверхности моря. Источником данных в предлагаемом исследовании выступают спутники Aqua и Terra со спектрометром MODIS и спутник SNPP со спектрометром VIIRS. Эти данные в формате, пригодном для использования в численной модели, были предоставлены сервисом «See the Sea», входящим в состав ЦКП «ИКИ Мониторинг» [2], который занимается сбором и обработкой различных данных о состоянии земной поверхности и ориентируется на работу со спутниковыми наблюдениями. Отметим, что в основном эти данные не покрывают всю исследуемую акваторию, и в процедуре ассимиляции используется характеристическая функция, определяющая наличие данных на момент усвоения.

Описание постановки задачи. Рассматривается трехмерная модель динамики моря, разработанная в ИВМ РАН [3]. Модель основана на системе уравнений, записанных в приближении Буссинеска и гидростатики. Система уравнений дополняется начальными и граничными условиями. Для аппроксимации модели по времени используется метод расщепления, для этого весь интервал времени разделяется на подынтервалы (t_{j-1}, t_j), $j = 1, ..., J$. На каждом подынтервале решение полной системы уравнений заменяется решением подзадач (шагов метода расщепления):

Шаг 1. Задача конвекции-диффузии для температуры (T).

Шаг 2. Задача конвекции-диффузии для солености (S).

Шаг 3. Задача о нахождении вектора горизонтальной скорости и функции уровня моря.

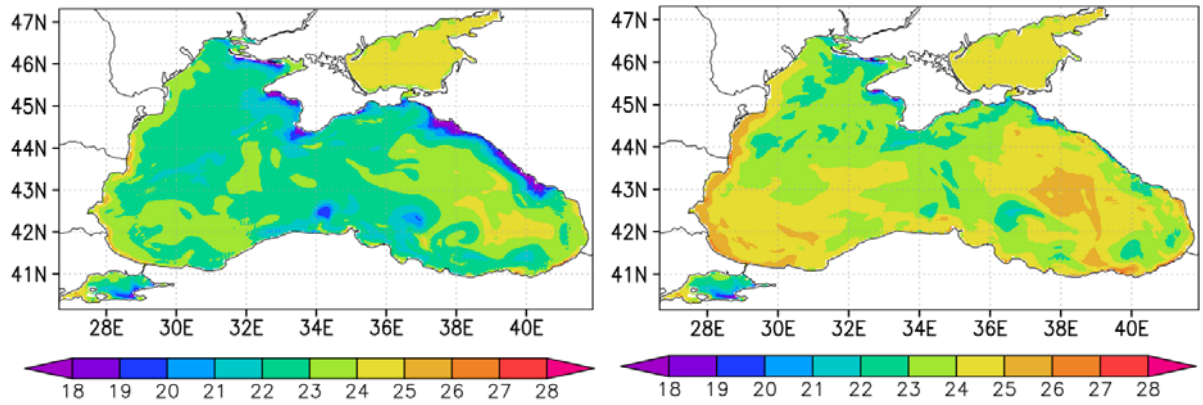
Полученная таким образом полудискретная модель является приближением к изначальной версии модели. Далее в Шаг 1 модели добавляется блок ассимиляции данных наблюдений температуры поверхности моря со спутников. В качестве дополнительной неизвестной (управления) выбирается функция потока тепла на поверхности моря и записывается функционал стоимости, характеризующий близость температуры, полученной при расчете по модели, и наблюдаемой температуры моря. Таким образом, формулируется обратная задача: найти решение уравнений модели и функцию управления такие, что на них минимизируется функционал стоимости. Данная задача рассматривается как задача вариационной ассимиляции данных наблюдений. Используя необходимое условие минимума функционала, приходим к системе оптимальности, состоящей из основного уравнения, сопряженного уравнения, ковариации фоновой ошибки и условия на управление, т. е. потока тепла на поверхности.

Численные эксперименты.

Численные расчеты были проведены для акватории Черного и Азовского морей. Шаг сетки по пространственным переменным был 0.05° по долготе и 0.036° по широте. Шаг по времени – 2 минуты 30 секунд. Расчет производился на период равный одному году (2019) с начального состояния, соответствующего среднеклиматическому значению параметров

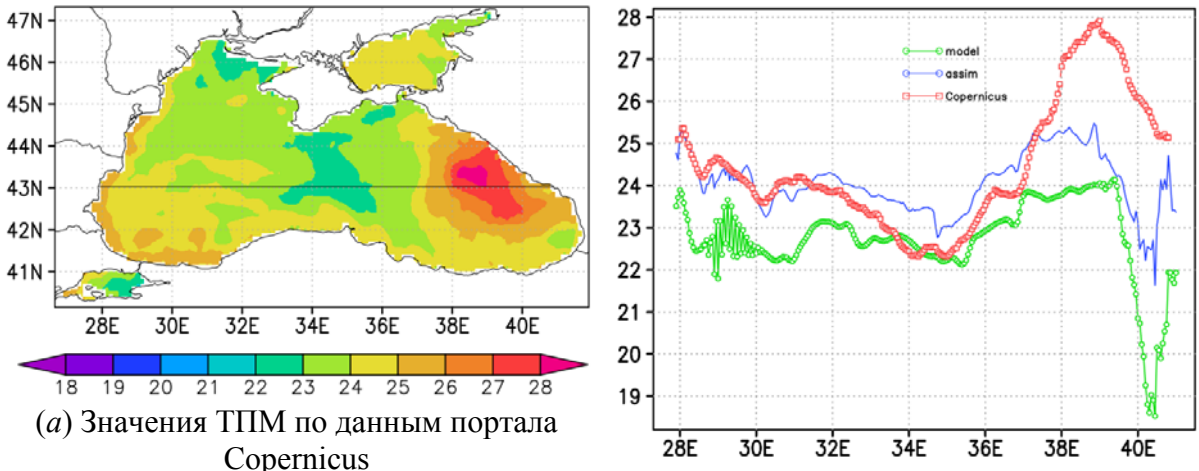
на январь месяц. Было произведено 2 расчета, вначале по модели без блока ассимиляции данных, и потом с использованием блока ассимиляции данных. Некоторые из результатов расчетов представлены на рис. 1 и 2.

Так, на рис. 1, *а* представлено среднее поле температуры поверхности моря (ТМП) на 1 июля 2019 г. при расчете без процедуры ассимиляции, а на рисунке 1(б) поле ТПМ на 1 июля 2019 г., посчитанное с блоком ассимиляции данных. Результаты расчетов можно сравнить со среднесуточными данными ТПМ за указанную дату, полученными с европейского портала Copernicus [4], которые представлены на рис. 2, *а*.



(*а*) ТПМ без блока усвоения данных (*б*) ТПМ с блоком усвоения данных

Рис. 1. Среднесуточные значения ТПМ на 1 июля 2019 года, рассчитанные по модели, °С



(*а*) Значения ТПМ по данным портала Copernicus

(*б*) ТПМ. Разрез по 43° с.ш.

Рис. 2. Среднесуточные значения ТПМ на 1 июля 2019 года, °С

Заметно, что практически на всей акватории моря модель несколько занижает ТПМ и разность с наблюдаемым значением ТПМ может в некоторых местах достигать 3–4 °С. Применение процедуры ассимиляции позволяет уменьшить эту разницу до 1.5–2.5 °С. На рис. 2, *б* представлен разрез по 43° северной широты для ТПМ на поверхности моря. Здесь красной линией с точками показано среднесуточное значение ТПМ по данным сервиса Copernicus, зеленая линия – среднесуточная ТПМ при расчете по модели без блока ассимиляции, и синяя линия – среднесуточная ТПМ при расчете с блоком ассимиляции.

Заключение. В работе рассмотрено применение алгоритма вариационной ассимиляции данных наблюдений в модели динамики Черного и Азовского морей, в том числе в случае, когда данные известны на части исследуемой акватории. Показано, что введение процедуры ассимиляции данных в модель позволяет получать результаты расчета ТПМ более близкие к наблюдаемым, что улучшает прогностические свойства численной модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-71-20035).

Список литературы

1. Agoshkov V. I., Zalesny V. B., Shutyaev V. P., Parmuzin E. I., Zakharova N. B. Variational data assimilation for a sea dynamics model // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2022. Vol. 37, No. 3. P. 1–16. DOI:10.1515/rnam-2022-0011.

2. Proshin, A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Loupian E. A., Radchenko N. V., Sychugov I. G. «IKI-Monitoring» shared use center support and development – possible solutions // Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2020. Vol. 17, No. 6. P. 51–55.

3. Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V., Moshonkin S. N., Demyshev S. G. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. Vol. 27, No. 1. P. 95–111. DOI:10.1515/rnam-2012-0006.

4. Buongiorno Nardelli B., Colella S., Santoleri R., Guarracino M., Kholod A. 2009: A re-analysis of Black Sea Surface Temperature // J. Mar. Sys. 2009. Vol. 79, No. 1–2. P. 50–64. DOI:10.1016/j.jmarsys.2009.07.001.

V. I. Agoshkov[1,2], V. P. Shutyaev[1,3], E. I. Parmuzin[1], N. B. Zakharova[1], T. O. Sheloput[1,3], N. R. Lezina[1]

[1]Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[1]Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

e-mail: parm@inm.ras.ru

VARIATIONAL DATA ASSIMILATION OF SATELLITE OBSERVATIONS FOR THE BLACK SEA DYNAMICS MODEL

The algorithm of variational data assimilation for the model of sea dynamics developed at the Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences is considered. The approach is based on splitting and minimizing the cost functional associated with observational data by solving an optimality system that includes adjoint equations as well as satellite observation and background error covariance. Numerical experiments with real sea surface temperature observations for the Black Sea dynamics model with variational data assimilation to reconstruct heat fluxes on the sea surface are presented.

Keywords: variational assimilation, sea surface temperature, optimality system, cost functional, satellite observation data.

УДК 537.86

Е. Н. Васильев[1], Д. С. Макаров[2], В. Г. Подопригора[2], М. Ю. Реушев[2], А. В. Сорокин[2]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН,
[2]Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
Красноярск, Россия
e-mail: ven@icm.krasn.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛЬДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТЕОДАННЫХ И РЕФЛЕКТОМЕТРИИ СИГНАЛАМИ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ L1-ДИАПАЗОНА

Аннотация. Представлена теплофизическая модель динамики ледового покрова с использованием локальных метеоданных. Проведена серия измерений амплитудно-временных зависимостей интерференционного поля сигналов навигационных спутников вблизи поверхности снежно-ледового покрова пресноводного озера в зимне-весенний период. Выявлена возможность использования ГНСС-рефлектометрии в мониторинге динамики состояния снежно-ледового покрова.

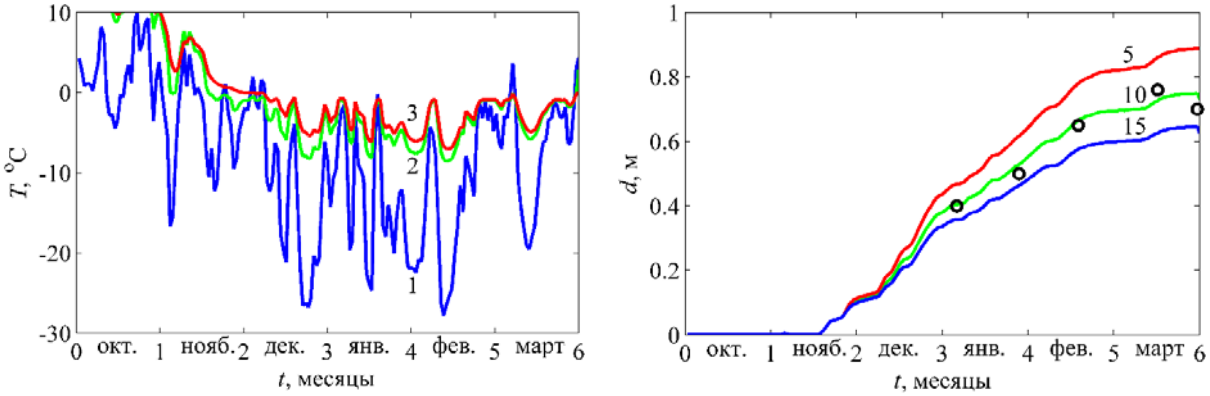
Ключевые слова: вычислительное моделирование, метеоданные, ледовые покровы, ГНСС-рефлектометрия.

Мониторинг земных покров с использованием сигналов Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС) позволяет в реальном времени получать геофизическую информацию о зондируемом объекте. Метод ГНСС-рефлектометрии основан на регистрации амплитудно-временной зависимости (АВЗ) интерференционного поля, сформированного суперпозицией прямой (от спутника) и рассеянно-отраженных слоем льда радиоволн [1]. Восстановление сезонной динамики электрофизических характеристик ледового покрова предполагает разработку его теплофизической модели в период от ледостава до таяния.

Моделирование основано на численном решении задачи Стефана в обобщенной формулировке. Теплота фазового перехода «лед-вода» учитывается в величине эффективной теплоемкости среды [2]. Температурный перепад на слое снега определяется на каждом временном шаге задачи из численного решения нелинейного уравнения теплового баланса. Учитываются поступающий и уходящий радиационные потоки на снежной поверхности, а также вертикальные тепловые потоки в направлении атмосферы и льда. Величина термического сопротивления слоя снега рассчитывается по значениям толщины снежного покрова и коэффициента теплопроводности снега. В расчетах использованы климатические данные холодного времени года (октябрь 2021 г. – март 2022 г.) метеостанции Минино (широта 56.07, долгота 92.73), которая находится в непосредственной близости от озера Бугач.

© Васильев Е. Н., Макаров Д. С., Подопригора В. Г., Реушев М. Ю., Сорокин А. В., 2022

Температурный режим водоема и динамика нарастания ледового покрова определяется балансом тепловых потоков. Соотношение этого баланса в значительной степени зависит от наличия снега, его толщины и плотности, скорости ветра. На рис. 1, *а* представлены результаты вычислительного моделирования при толщине снега 10 см. Временные зависимости отображают температуру атмосферного воздуха (1), поверхности льда (2) и на глубине 10 см (3) слоя льда. Рассчитанные временные зависимости толщины льда $d(t)$ приведены на рис. 1, *б*, численные значения на графиках указывают толщину снежного покрова в сантиметрах. Кругами на графиках отмечены значения $d(t)$, полученные в ходе прямых измерений ледового покрова озера Бугач в период январь-март 2022 г. Наличие слоя снега на ледовом покрове существенно влияет на тепловой баланс водоема из-за изменения значений альбедо и степени черноты поверхности водоема, а также низкой теплопроводности снега, приводящей к дополнительной теплоизоляции льда.



а) *б*)

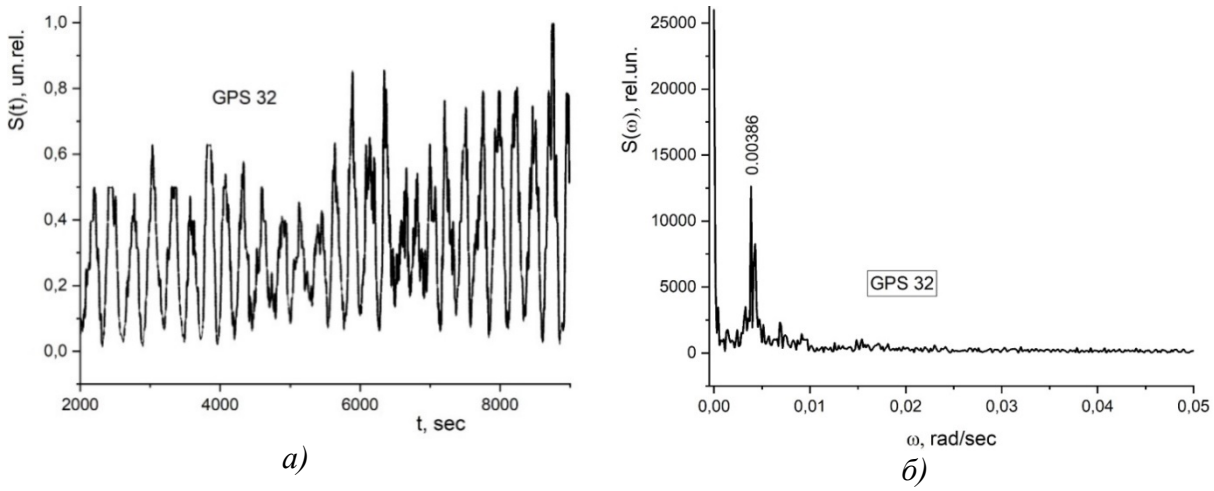
Рис. 1. Временные зависимости температуры (*а*) и толщины слоя льда (*б*)

Вычислительное моделирование дает возможность непрерывно и оперативно получать информацию о динамике ледового покрова с учетом всего комплекса метеорологических факторов, влияющих на тепловые процессы ледостава.

ГНСС-рефлектометрия льда пресноводного озера Бугач вблизи Красноярска проведена в период январь-март 2022 г. Использовалась классическая схема регистрации [2] антеннами приема сигналов с правой круговой и линейной поляризациями специализированным приемником-регистратором. Антенны размещались на поверхности льда на удаленной от берега площадке на высотах 1,6–3,2 м. Проведены 5 сеансов регистрации АВЗ с длительностью до 4 часов. Каждый сеанс сопровождался измерениями температур воздуха, снега, льда и воды на границе лед-вода. На рис. 1, *б* приведены данные измерений толщины льда в период с 4.01.2022 до 30.03.2022. В процессе увеличения толщины льда на поверхности появлялся слой снега. Толщина в плотность слоя в период измерений изменялись в интервалах 10–15 см и 0,15–0,3 г/см^3. Локальные шероховатости поверхности снега и льда не превышали 1,5 см, отражение

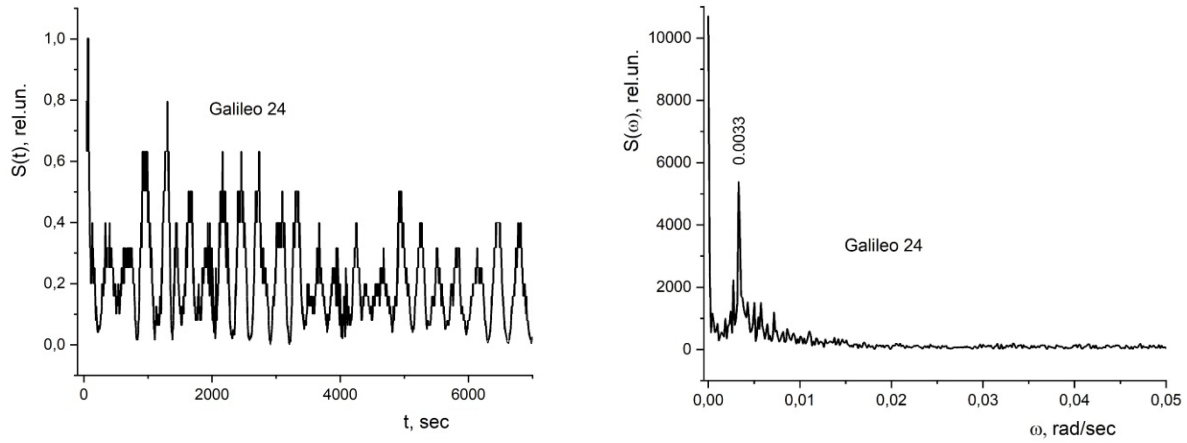
сигналов L1-диапазонаГНСС с длиной волны ~19 см можно считать зеркальным. В период весенних потеплений и похолоданий к 30.03.2022 на поверхности льда сформировался объемно неоднородный слой льда.

Математическая обработка АВЗ проведена с использованием стандартного пакета программ Origin 8.5. Получены нормированные амплитудно-временные зависимости $S(t)$ и Фурье спектры $S(\omega)$ [3] с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Нормированные амплитудно-временные зависимости $S(t)$ и $S(\omega)$ для конкретных навигационных спутников (НС) представлены на рис. 2 и рис. 3 для льда толщиной 42 см и 76 см соответственно.



а) *б)*

Рис. 2. Зависимости $S(t)$ – *а)*, $S(\omega)$ – *б)*; НС GPS – 32, толщина льда 42 см



а) *б)*

Рис. 3. Зависимости $S(t)$ – *а)*, $S(\omega)$ – *б)*; НС Galileo – 24, толщина льда 76 см

Обработанные АВЗ на рис. 2 и рис. 3 для льда с разной толщиной заметно различаются, содержат информацию о состояние его поверхности и объема.

Метод ГНСС-рефлектометрии достаточно чувствителен к электрофизическим характеристикам снежно-ледовых покровов. Изменения угловых координат НС, регистрируемые с частотой в 1 Гц, и возможность размещения приемной антенны на высотах до 3,2 м позволяют зондировать участки ледового покрова с координатной

привязкой относительно антенны на площади до 300 м^2. Чувствительность метода может быть увеличена путем использования усредненных значений АВЗ сигналов от нескольких спутников систем ГЛОНАСС, GPS и Galileo.

Изменения структуры весеннего льда в процессе прогрева связаны с его увлажнением, увеличением комплексной диэлектрической проницаемости. Выявленные ранее [2] зависимости отражательной способности ледового покрова и изменения контраста интерференционных полос влияют на Фурье спектры АВЗ.

Комплексное применение метода ГНСС-рефлектометрии и вычислительного моделирования позволяет сочетать результативность обоих подходов. Это обеспечит достоверность и оперативность мониторинга, а также возможность прогноза состояния ледовых покровов. Создание программного обеспечения оперативной обработки данных ГНСС-рефлектометрии имеет реальную перспективу разработки устройства диагностики льда для практического использования.

Список литературы

5. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing, New York, London: Springer Ddrecht Heidelberg, 2014. 286 p.

6. Васильев Е. Н., Макаров Д. С., Сорокин А. В. Моделирование динамики ледовых покровов и ГНСС рефлектометрия в мониторинге состояния льда // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2022. 15(2). С. 261–271.

7. 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.

E. N. Vasil'ev[1], D. S. Makarov[2], V. G. Podoprigora[2],
M. U. Reushev[2], A. V. Sorokin[2]

[1]Institute of computational modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
[2]Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: ven@icm.krasn.ru

INVESTIGATIONS OF THE STATE ICE COVERS WITH USINGMETEO DATA AND L1-BAND NAVIGATIONAL SATELLITE SIGNALS

A thermophysical model of the dynamics of the ice cover using local weather data is presented. A series of measurements of the amplitude-time dependences of the interference field of navigation satellite signals near the surface of the snow-ice cover of a freshwater lake in the winter-spring period was carried out. The possibility of using GNSS-Reflectometry in monitoring the dynamical state of the snow – ice cover is revealed.

Keywords: computational modeling, weather data, ice covers, GNSS reflectometry.

УДК 630*556.5*528

И. В. Данилова[1], Т. А. Буренина[2]

[1]Кандидат технических наук, Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[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, burenina@ksc.krasn.ru

ОЦЕНКА ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ ДЛЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ БАССЕЙНА РЕКИ ПОДКАМЕННАЯ ТУНГУСКА

Аннотация. Ландшафтная дифференциация исследуемой территории была проведена с целью оценки влияния типов лесных насаждений на суммарное испарение в бассейне реки Подкаменной Тунгуски. В работе были использованы карты растительного покрова и показатели эвапотранспирации MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16), полученные посредством облачной платформы Google Earth Engine. Для учета климатической характеристики территории использовали данные с восьми метеостанций. Исследования показали, что эвапотранспирация различных лесных насаждений характеризуется значительной изменчивостью как в пространстве, так и во времени, которая прежде всего связана с изменением температуры воздуха и количеством выпавших осадков. В результате анализа данных в районе исследований была выявлена тенденция к снижению показателя годовой суммарной эвапотранспирации с 2000 по 2014 гг.

Ключевые слова: эвапотранспирация, MOD16 ET, лесные экосистемы, Подкаменная Тунгуска.

Введение. Леса – самые распространенные наземные экосистемы нашей планеты, которые оказывают влияние на все составляющие суммарного испарения. Суммарное испарение или эвапотранспирация включает в себя испарение осадков, задержанных кронами деревьев, транспирацию лесной растительности, испарение с почв и поверхности снега.

Определение испарения земной поверхности, покрытой лесной растительностью, в настоящее время является довольно сложной задачей, прежде всего, в силу зависимости эвапотранспирации не только от параметров внешней среды (температуры, влажности, солнечной радиации, скорости ветра), но также и от биофизических параметров растительности, регулирующих транспирационный расход влаги растениями [1]. С появлением облачной платформы Google Earth Engine появилась возможность получать расчетные тематические изображения, в том числе и эвапотранспирацию, на основе данных дистанционного зондирования в глобальном масштабе и за длительный период.

© Данилова И. В., Буренина Т. А., 2022

Цель данной работы: на основе ландшафтной дифференциации территории и данных об эвапотранспирации оценить вклад различных лесных экосистем в суммарное испарение в бассейне реки Подкаменной Тунгуски.

Район исследования и используемые материалы. Исследования проводились в бассейне реки Подкаменная Тунгуска на участке от истоков реки до населенного пункта Кузьмовка (92°5'3,7" в.д., 62°22'2,5" с.ш.). Площадь района исследования составляет 223 тыс. км^2.

Бассейн реки расположен в зоне средней тайги Средней Сибири. Климат изучаемой территории относится к резко-континентальному. Самым холодным месяцем (по данным метеостанции Байкит) является январь со средней температурой –30,4 °С, самыми теплым – июль со средней температурой +16,8 °С. На территории исследования наблюдается тенденция к уменьшению осадков с запада на восток (с 666 до 292 мм в год) из-за ослабления влияния преобладающего западного влагопереноса.

Значительная протяженность реки с юго-востока на северо-запад (~1 700 км) обуславливает разнообразие природных условий, что выражается в различном режиме увлажнения и представленности растительных сообществ. На востоке преобладают лиственничные леса, в качестве примеси встречается сосна. На западе высокую долю в составе древостоя составляют темнохвойные породы. В устьевой части бассейна руки обширные участки заняты кедрово-еловыми лесами.

Для расчета эвапотранспирации были использованы данные Terra MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16) (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006), пространственное разрешение 500 м. Продукт MOD16 представляет собой 8-суточный растр потоков эвапотранспирации с поверхности суши, по которым рассчитывалась суммарная эвапотранспирация для каждого месяца, а затем суммировалась по сезонам и годам.

Данные метеорологических станций из архива ВНИИГМИ-МЦД (http://www.meteo.ru) использовались с целью анализа климатических условий территории. Ландшафтная дифференциация исследуемой территории была выполнена на основе анализа карт растительного покрова (www.siberia2.uni-jena.de) [2] и цифровой модели рельефа SRTM.

Геопространственный анализ данных MODIS (эвапотранспирация) выполнялся с использованием облачной платформы Google Earth Engine (GEE). Для совместного анализа карт растительного покрова, метеорологических данных и данных по эвапотранспирации было использовано программное обеспечение ArcGIS 10.6.01.

Методика исследования. Основной акцент в работе был сделан на оценке суммарного испарения, зависящего как от сочетания типов лесной растительности и почв, так и от соответствующего климата и рельефа. На основе анализа карт растительного покрова была выполнена дифференциация водосбора Подкаменной Тунгуски на лесные (лиственничные, сосновые, темнохвойные, березовые, смешанные

темнохвойные с лиственничными и лиственными породами, смешанные темнохвойно-сосновые насаждения) и нелесные (нелесные земли, гари) типы земной поверхности. Для дальнейшего исследования были выделены более крупные единицы – районы (I-IV), характеризующиеся сходством географических явлений, сочетанием типов земной поверхности, а также относительно однородные по климатическим условиям и показателям рельефа. Оценка климатических условий территории выполнялась на основе месячных значений температур воздуха и сумм атмосферных осадков по шести станциям Красноярского края (Кузьмовка, Байкит, Усть-Камо, Кербо, Стрелка, Чемдальск) и двум метеостанциям Иркутской области (Ика, Токма).

Для каждого типа земной поверхности в границах выделенных регионов по данным MOD16 были рассчитаны месячная и сезонная суммарная эвапотранспирация за 2000–2014 гг. с использованием облачной платформы Google Earth Engine. В работе были определены следующие сезоны: «зимний» сезон с 1 ноября по 31 марта соответствует продолжительности залегания устойчивого снежного покрова; «летний» сезон включает июнь-июль-август; «переходный» – с 1 сентября по 31 октября.

Результаты исследования. На основе комплексного анализа ЦМР, карт растительного покрова, почвенной карты Красноярского края и Иркутской области [3], а также данных метеорологических станций на территории бассейна реки были выделены регионы (рис.), относительно однородные по климатическим и лесорастительным условиям.

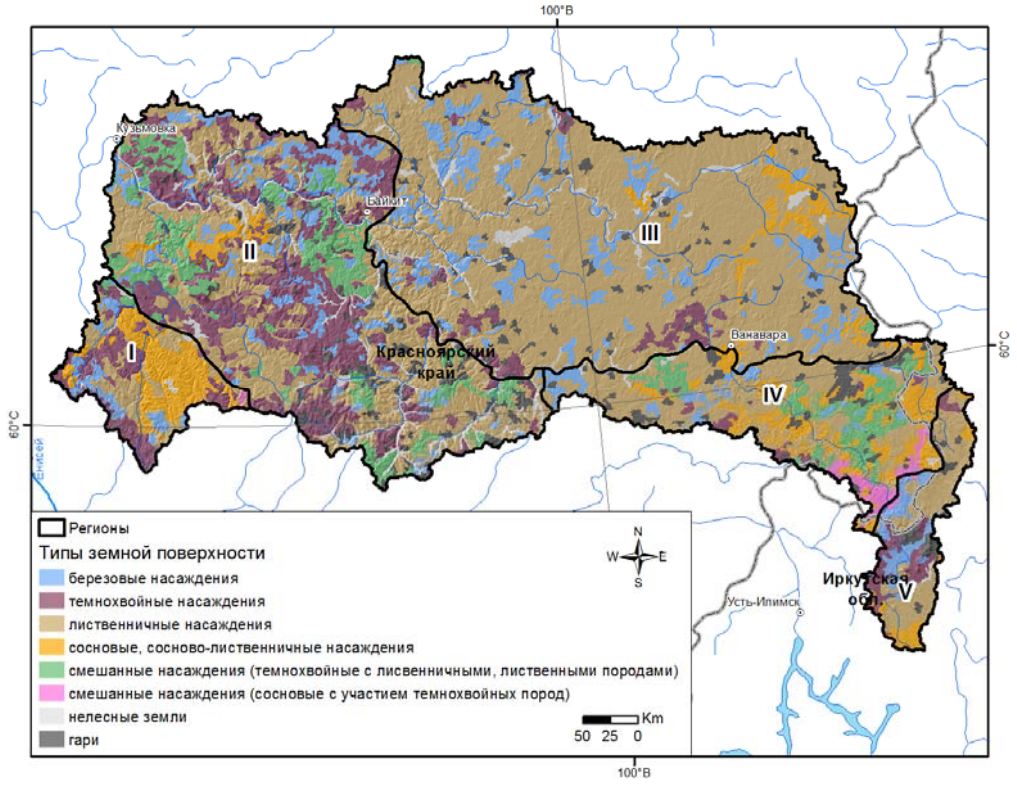


Рис. Распределение типов земной поверхности и регионов в бассейне реки Подкаменная Тунгуска

Для каждого типа земной поверхности внутри регионов и для регионов в целом на основе данных MOD16 были получены количественные показатели эвапотранспирации.

Исследования показали, что значения годовой эвапотранспирации различаются как по регионам, так и по типам земной поверхности. В «зимний» сезон испарение в листопадных насаждениях практически не отличается от темнохвойных и светлохвойных насаждений. В «летний» сезон наблюдаются значительные различия в расходах влаги на испарение в зависимости от породного состава и особенностей кроны древостоев.

В результате анализ данных по эвапотранспирации было определено, что березовые насаждения имеют самые высокие значения суммарного испарения во всех регионах независимо от метеоусловий. Для лиственничников и сосновых насаждений прослеживается тенденция увеличения значения эвапотранспирации с запада на восток.

Сравнительный анализ трендов годовой суммарной эвапотранспирации с трендами средней температуры воздуха и суммой годовых осадков показал, что из-за изменения климатических условий наблюдается тенденция к снижению эвапотранспирации за период исследования с 2000 по 2014 гг. Данная тенденция была определена как для отдельных регионов, так и для всего бассейна.

Таким образом, исследования показали, что эвапотранспирация различных лесных насаждений характеризуется значительной изменчивостью как в пространстве, так и во времени, которая прежде всего связана с изменением температуры воздуха и количеством выпавших осадков. Вариабельность эвапотранспирации выделенных регионов зависит как от погодных условий, так и от ландшафтной структуры территории.

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. Ольчев А. В., Новенко Е. Ю. Испарение лесных экосистем центральных районов Европейской территории России в голоцене // Материалы второй национальной конф. «Математическое моделирование в экологии». 2012. Т. 7. № 1. С. 284–298.

2. Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 285–302.

3. Rozhkov V. A. GIS-model of the forest cover dynamics in landscapes of Russia // Productivity and resistance of forest soils. III International forest soil science conference. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2009. P. 24–27.

I. V. Danilova[1,2], T. A. Burenina[1]
[1]Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia
[2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: tiv80@mail.ru,burenina@ksc.krasn.ru

EVAPOTRANSPIRATION ASSESSMENT FOR FOREST ECOSYSTEMS IN THE PODKAMNAYA TUNGUSKA RIVER BASIN

Landscape differentiation of the study area was carried out in order to assess the impact of forest types on total evaporation in the basin of the Podkamennaya Tunguska. Vegetation maps and evapotranspiration of the MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16) obtained using the Google Earth Engine were used in the work. To take into account the climatic characteristics of the territory, data from eight weather stations were used. Studies have shown that the evapotranspiration of various forest types is characterized by significant variability both in space and in time, which is primarily associated with changes in air temperature and the amount of precipitation. As a result of data analysis, a reduction trend in the annual evapotranspiration in the river basin from 2000 to 2014 was revealed.

*Keywords**:** evapotranspiration, MOD16 ET, forest ecosystems, Podkamennaya Tunguska.*

УДК 519.24

Б. С. Добронец[1], А. Р. Кемельбаева[2]

[1]Доктор физико-математических наук, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: bdobronets@yandex.ru, kemelbaevaar@gmail.com

НОВЫЕ ПОДХОДЫ В РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ ДЗЗ

Аннотация. В данной статье рассматриваются подходы регрессионного анализа. Дается краткое описание следующих подходов: квантильная регрессия, the GAMLSS, регрессия в символьном анализе данных, регрессия в функциональном анализе данных. Целью статьи является изучения новых подходов в регрессионном анализе данных. Данные подходы являются параметрическими и используются, когда известна математическая модель исследуемого объекта и требуется определить в ней неизвестные параметры. В статье предложено дальнейшее изучение подходов, не являющиеся параметрическими, а именно методов вероятностного статистического анализа.

Ключевые слова: квантильная регрессия, символьная регрессия, функциональная регрессия, регрессионная модель.

Применение искусственных спутников Земли быстро развивается. Вместе с увеличением спутников ДЗЗ, увеличиваются данные с них. Эти данные широко применяются для решения задач с помощью методов машинного обучения.

Регрессионный анализ данных – это раздел машинного обучения, который используется для изучения статистической взаимосвязи между одной зависимой переменной (переменной отклика) и одной или несколькими независимыми переменными (предикторы) [1].

Регрессионный анализ данных часто применяется для задач прогнозирования. Для того чтобы предсказать значение той или иной величины, необходимо построить регрессионную модель. В зависимости от анализируемых данных применяются различные подходы регрессионного анализа.

В данной статье рассматриваются новые подходы регрессионного анализа данных.

Линейный регрессионный анализ

Линейная регрессия является одним из базовых методов машинного обучения. Ее модель предполагает, что переменная отклика представляет собой линейную комбинацию весов, умноженных на набор переменных-предикторов. [2] Модели линейной регрессии представляют собой статистическую процедуру, помогающую прогнозировать будущее. Она применяется в научных сферах и в бизнесе, а в последние десятилетия используется в машинном обучении.

© Добронец Б. С., Кемельбаева А. Р., 2022

Квантильная регрессия

Множественная линейная регрессия – основной и стандартный подход, который применяется, чтобы объяснить или предсказать средние значения количественных результатов. Однако во многих обстоятельствах наибольший интерес представляет медиана или определенный квантиль масштабированного результата.

Квантильная регрессия моделирует взаимосвязь между набором переменных предикторов и определенными процентилями (или «квантилями») переменной отклика, чаще всего медианой. У нее есть два главных преимущества по сравнению с обычной регрессией наименьших квадратов:

- квантильная регрессия не основывается на предположениях о распределении целевой переменной.
- квантильная регрессия более устойчива к наблюдениям-выбросам [3].

Квантильная регрессия широко используется для исследований в практических областях, таких как экология, здравоохранение и финансовая экономика.

The GAMLSS

Квантильная регрессия предсказывает медианное значение результата или определенный квантиль, однако существуют модели регрессии распределения, которые обеспечивают полную вероятностную характеристику распределения ответов в одной объединенной модели. На рис. 1 показан для смоделированных данных из нормального распределения.

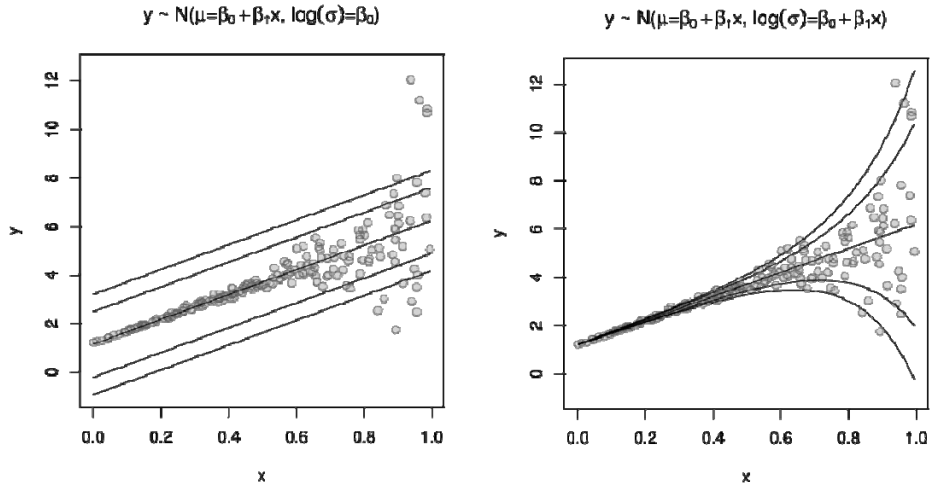


Рис. 1. Пример смоделированных данных, показаны расчетные 2.5 %, 10 %, 50 %, 90 % и 97.5 % квантилей гомоскедастической нормальной модели слева и гетероскедастической нормальной модели справа

Исходя из рис. 1 видно, что не только среднее значение, но и дисперсия увеличиваются с большими значениями ковариаты, так что данные становятся неоднородными. Тенденция среднего значения достаточно хорошо аппроксимируется, но несмотря на это интервалы

прогнозирования, полученные на основе модели, будут сильно вводить в заблуждение [4].

Методы для построения подобных моделей представлены в платформе статистического моделирования GALMSS.

Обобщенная **аддитивная модель местоположения, масштаба и формы (GAMLSS)** представляет собой подход к статистическому моделированию и обучению. GAMLSS – это современный подход к регрессии, основанный на распределении. Платформа статистического моделирования GAMLSS реализована в виде ряда пакетов в R.

Регрессия в символьном анализе данных

Символьная регрессия – метод построения регрессионных моделей путем перебора различных произвольных суперпозиций функций из некоторого заданного набора. Суперпозиция функций при этом называется «программой», а стохастический оптимизационный алгоритм построения таких суперпозиций называется генетическим программированием [5].

Генетический алгоритм – это метод оптимизации, в основе которого лежит идея естественного отбора как средства достижения наилучшего результата.

Цель в оптимизации с помощью генетического алгоритма состоит в том, чтобы найти лучшее возможное решение или решения задачи по одному или нескольким критериям.

Символьная регрессия становится всё важнее и важнее в областях науки из-за того, что сложность задач в мире вокруг нас со временем увеличивается.

Регрессия в функциональном анализе данных

Функциональная регрессия – это вариант регрессионного анализа, когда переменная отклика и предикторы включают функциональные данные. Функциональный анализ данных имеет дело с анализом и теорией данных, которые представлены в виде функций, изображений или более общих объектов.

Функциональный анализ данных в целом используются во многих приложениях (климатология, дистанционное зондирование, лингвистика, точное земледелие и т. д.), где данные собираются путем наблюдения за непрерывным явлением во времени или пространстве.

Рассмотрим ещё один пример, изображённый на рис. 2. В левой части рис. 2 содержатся результаты моделирования исходных данных, а в правой части – аппроксимация функций плотности вероятности максимальных значений.

Эти две ситуации описывают распределенную и временную агрегацию соответственно. В каждом случае временной ряд распределений будет предлагать более информативное представление, чем другие формы агрегированных временных рядов. Поэтому возникает необходимость в изучении подходов, которые имеют дело с распределениями напрямую.

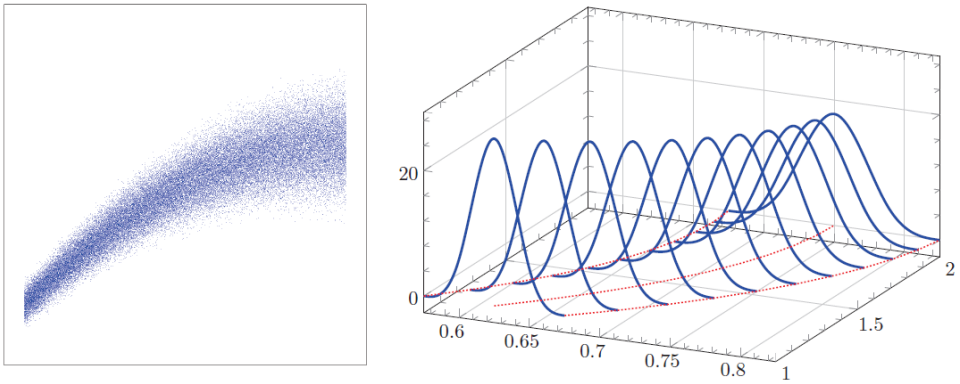


Рис. 2. Модель исходных данных слева и график аппроксимации функций плотности вероятности максимальных значений

В данной статье были рассмотрены новые подходы в регрессионном анализе данных. Данные подходы являются параметрическими и используются, когда известна математическая модель исследуемого объекта и требуется определить в ней неизвестные параметры. В дальнейшем планируется изучение вероятностного статистического анализа, который предназначен для решения практических задач, связанных с исследованиями сложных систем в условиях различных видов неопределенности и типов эмпирических данных. Применение методов и процедур вероятностного статистического анализа позволяет представить выходное распределение вероятностей как функцию входных распределений и использовать методы анализа неопределенностей, чтобы оценить влияние входных неопределённостей, привносимых входными характеристиками, на неопределенность выходных параметров модели.

Список литературы

1. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия = AppliedRegressionAnalysis. 3-е изд. М.: «Диалектика», 2007. 912 с. ISBN 0-471-17082-8.

2. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессия. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.

3. Добронец Б. С., Попова О. А. Вычислительный вероятностный анализ: модели и методы: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 236 с.

4. Umlauf N., Kneib T. A primer on Bayesian distributional regression // Statistical Modelling. 2018. 18(3-4): 219–247. doi:10.1177/1471082X18759140

5. Allamanis M., Chanthirasegaran P., Kohli P., and Sutton C. Learning continuous semantic representations of symbolic expressions // In International Conferenceon Machine Learning. PMLR. 2017. P. 80–88.

B. S. Dobronets, A. R. Kemelbaeva

Siberian State University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: bdobronets@yandex.ru, kemelbaevaar@gmail.com

NEW APPROACHES IN REGRESSION ANALYSIS OF ERS DATA

The paper discusses the approaches in regression analysis for various data.

Keywords: quantile regression, symbolic regression, functional regression, regression model.

УДК 519.634

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

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

ВИЗУАЛЬНАЯ АНАЛИТИКА В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. В статье рассматривается использование визуальной аналитики в задачах обработки данных дистанционного зондирования земли с целью повышения ее качества. Предлагается использовать метод главных компонент для визуализации и снижения размерности данных. Эффект многомерности достигается за счет выбора многообразий, использования метода динамических сечений и возможностей стереоскопического зрения.

Ключевые слова: визуальная аналитика, метод главных компонент, метод динамических сечений.

Анализ достижений в области дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) позволяет утверждать, что в области обработки данных ДЗЗ формируется новая парадигма. Ее суть состоит в переходе от методов первичной обработки данных ДЗЗ к данным готовым для анализа (analysis-ready data – ARD), то есть «данным с аналитикой», предоставляющим заказчикам и потребителям «готовую» аналитику и дающую возможность генерировать необходимые знания для принятия инновационных решений, в том числе в режиме реального времени [1].

Можно утверждать, что будущее отрасли ДЗЗ, как других отраслей народного хозяйства, зависит не только от предоставления данных, но также от аналитики на основе этих данных. Важно также отметить, что в настоящее время для лиц принимающих решения на всех уровнях управленческой деятельности актуализировалась потребность в получении качественной, достоверной аналитики и понимание финансовых, социально-экономических, природно-пользовательских, экологических и других выгод, получаемых от анализа данных ДЗЗ.

В роли одного из средств получения достоверных аналитических знаний из «сырых» данных выступает визуальная аналитика, которая представляет собой совокупность методов и подходов анализа данных с использованием современных способов представления, обработки и моделирования, а также визуального интерфейса, усиливающего человеческие аналитические способности. Область применения визуальной аналитики чрезвычайно велика. На рис. 1 представлены сферы деятельности, где применяется данный подход.

© Добронец Б. С., Попова О. А., Мерко А. М., 2022

Существует несколько методов уменьшения размерности. Рассмотрим основные из них.

Метод главных компонент, Principal Component Analysis (PCA) – один из основных способов уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации.



Рис. 1. Области применения визуальной аналитики

Анализ независимых компонент, Independent Component Analysis (ICA). Суть метода ICA заключается в нахождении такого подпространства, где компоненты проекций векторов статистически независимы.

Линейный дискриминантный анализ, Linear Discriminant Analysis (LDA). В LDA производится попытка максимизировать разброс проекций векторов различных классов, минимизируя одновременно разброс проекций внутри классов.

Один из основных подходов в визуальной аналитике – уменьшение размерности, основанное на методе главных компонент. Этот метод применялся ко многим задачам, несколько раз трансформировался и открывался заново, и теперь известен как метод главных компонент (МГК) или ортогональная декомпозиция. Основная идея: мы аппроксимируем набор данных ортогональной системой с наименьшей потерей информации. МГК позволяет нам заменить многомерный вектор его проекцией на наилучшим образом подобранное линейное многообразие малой размерности [2].

Если заменить линейные многообразия МГК на алгебраические кривые и многообразия, то появится ветвь алгебраической статистики [2, 3]. Алгебраические кривые и многообразия гораздо более гибкие, чем линейные, но остаются жесткими в следующем смысле: алгебраическое многообразие нельзя изменить локально.

Еще одним большим продвижением в визуальном анализе данных является система машинного обучения, в частности многообразное

обучение (Manifold learning). Многообразное обучение – это подобласть обучения без учителя, целью которой является проецирование входных данных в новое пространство, которое в определенном смысле проще, чем исходное пространство, или в котором распределение данных является более регулярным, чем исходное. Таким образом, нелинейный МГК расширяет геометрическую интерпретацию МГК за счет явного построения вложенного многообразия [4].

Таким образом, основной подход визуализации многомерных данных заключается в следующем.

Размерность исходных многомерных данных уменьшается с помощью МГК. Как правило, размерность преобразованных данных выбирается не больше трех.

Для визуального представления преобразованных данных используется метод динамических сечений в стерео представлении. Смысл динамических сечений – представлять в динамике только часть данных. Например, первая главная компонента x_1 которых удовлетворяет соотношению

$$x(t) - h < x_1 < x(t) + h,$$

где t – параметр; $x(t)$ – центр сечения; h – ширина сечения.

Рассмотрим модельный пример использования МГК для визуальной аналитики. Исходный массив данных представляет набор S векторов из R^n. После применения МГК проектируем множество S на первые три главные компоненты, получаем множество векторов S_1 из R^3. На рис. 2 показаны первые 100 элементов множества S_1 в стерео проекции. Заметим, что хотя мощность множества S_1 относительно небольшая, даже в стерео представлении структура множества и ее особенности просматриваются с трудом. На рис. 3 показано сечение множества S_1 при $x(t) = 0.2$, $h = 0{,}1$, на рис. 4 показано сечение множества S_1 при $x(t) = 0.7$, $h = 0{,}1$. В этих случаях в сечения попадет до 20 элементов множества и структура в стерео представлении просматривается значительно лучше.

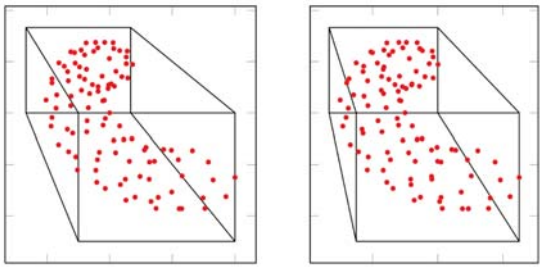


Рис. 2. Множество S_1 в стерео проекции

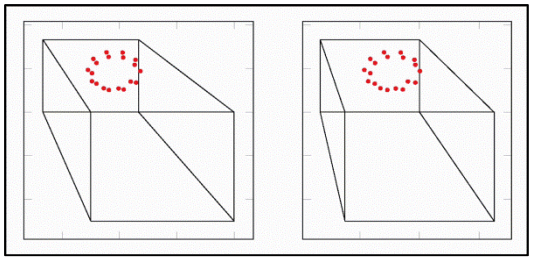


Рис. 3. Сечение $x(t) = 0.2$ в стерео проекции

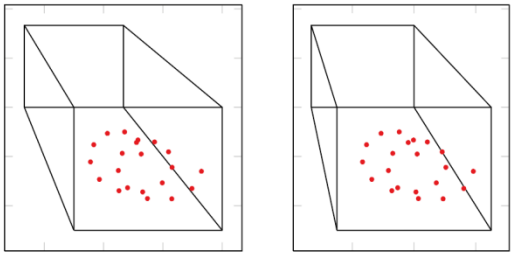


Рис. 4. Сечение $x(t) = 0.7$ в стерео проекции

Качество восприятия визуализации усиливается при динамическом просмотре в стерео режиме. В этом случае $x(t)$ меняется динамически с некоторой скоростью $x'(t)$.

Входными параметрами при динамической визуализации являются:

- $x'(t)$ – скорость центра сечения,
- h – ширина сечения,
- положение глаз при стерео проекции.

В заключении можно отметить, что сочетание уменьшения размерности данных с помощью различных вариантов МГК и дальнейшая визуализация на основе метода динамических сечений является важным элементом визуальной аналитики и позволяет эффективно представлять многомерные данные для их дальнейшего визуального анализа.

Список литературы

1. Narain A. Data analytics to shape the future of earth observation // https://www.geospatialworld.net/blogs/future-of-earth-observation/

2. Gorban A., Kegl B., Wunsch D., Zinovyev A. (Eds.) Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

3. Pachter, L., Sturmfels, B. (eds): Algebraic Statistics for Computational Biology, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom (2005).

4. Hastie T. and Stuetzle W. Principal curves // Journal of the American Statistical Association. 84. 502–516 (1989).

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

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

VISUAL ANALYTICS IN THE PROCESSING OF EARTH REMOTE SENSING DATA

The use of visual analytics in the problems of processing data from remote sensing of the earth is considered. It is proposed to use the principal component analysis to reduce the data dimension. The effect of multidimensionality is achieved through the choice of manifolds, the use of the method of dynamic sections and the possibilities of stereoscopic vision.

Keywords: visual analytics, principal component analysis, dynamic sections method.

УДК 004.932.2

А. В. Дунаева[1,2]

[1]Институт математики и механики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
[2]Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
e-mail: maryanova.av@yandex.ru

ОБЗОР ОБЩЕДОСТУПНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

Аннотация. В работе рассмотрены инструменты для выделения объектов на спутниковых снимках в популярных ГИС с открытым исходным кодом: *QGIS, Orfeo ToolBox*, *Grass GIS* и *Saga GIS*. Как правило, они содержат классические алгоритмы машинного обучения, и поддерживают возможность запуска плагинов от сторонних разработчиков. К настоящему времени наибольшее количество плагинов для работы со сверточными нейронными сетями было разработано для QGIS. Также для расширения функционала QGIS был разработан плагин выделяющий водные объекты на снимках и основанный на нейронной сети DeepLabV3+.

Ключевые слова: семантическая сегментация, классификация, машинное обучение, нейронные сети, спутниковые снимки, ГИС.

Распознавание объектов на спутниковых снимках востребовано в различных отраслях народного хозяйства, и по этой причине в популярные геоинформационные системы (ГИС) активно добавляются новые инструменты, предназначенные для автоматической разметки снимков (сегментации) по заранее заданным пользователем классам объектов. Целью данной работы является обзор функций, предназначенных для сегментации объектов на аэрокосмоснимках в наиболее популярных ГИС с открытым исходным кодом: *QGIS* [1], *Grass GIS* [2], *Orfeo ToolBox* [3] и *Saga GIS* [4]. Стоит отметить, что в каждой из них реализован почти один и тот же набор алгоритмов машинного обучения: *SVM*, бустинг, решающие деревья, случайный лес, байесовский классификатор, k-ближайших соседей, полносвязные нейронные сети и др. Однако к настоящему времени эти алгоритмы уступают по качеству сверточным нейронным сетям в задачах распознавания на спутниковых снимках сложных объектов, таких как здания, дороги, водные объекты и др. Коммерческие ГИС например такие как *ArcGIS Pro* [5], уже содержат в себе инструменты для обучения и применения сверточных нейронных сетей к снимкам, в то время как ГИС с открытым исходным кодом практически не имеют такого функционала и требуют разработки дополнительной плагинов.

1. QGIS. Эта ГИС имеет встроенный инструмент – калькулятор растров. В нем достаточно легко производить вычисления со слоями проекта, что удобно при вычислении различных индексов, применяемых для классификации пикселей снимка. Инструменты машинного обучения

© Дунаева А. В., 2022

в *QGIS* реализованы сторонними разработчиками в виде плагинов, список которых представлен в табл.

Таблица

Плагины сегментации и классификации для программы QGIS

Плагин	Назначение
Awesome Neural Networks – Сегментация [7]	Выделение водных объектов за счет использования сверточной нейронной сети DeepLabV3+ [8] с энкодером Efficient Net-B7 [9], которая была обучена на наборе LandCover.ai [10]. На проверочной части набора обученная модель показала меру объединения на пересечение равную 94.89 %
buildSeg [11]	Выделение зданий на снимках путем применения сверточных нейронных сетей. Пользователь может выбрать одну из моделей нейронных сетей, показывающих разную скорость работы – от 7 до 60 с на фрагменте 512×512 пикселей. Также полезной функцией плагина является загрузка в проект QGIS карт с сервиса Mapbox [12]
Semi-Automatic Classification Plugin [13]	Позволяет скачивать снимки, снятые со спутников ASTER, GOES, Landsat, MODIS, Sentinel-1, Sentinel-2, and Sentinel-3, выполнять ряд операций предобработки и постобработки снимков, включая паншарпенинг. В плагине реализован функционал для метрической классификации, классификации алгоритмом случайный лес, кластеризации данных методами главных компонент, k-средних, ISODATA
dzetsaka : Classification tool [14]	Полуавтоматическая классификация следующими моделями: смесь Гауссовых распределений, случайный лес и SVM из библиотеки scitkit-learn [15]
Neural Network MLPClassifier [16]	Классификация при помощи полносвязных нейронных сетей
EnMAP-Box 3 [17]	Предоставляет интерфейс к библиотеке scitkit-learn для запуска алгоритмов SVM, случайный лес, алгоритмов регрессии и кластеризации
Deep Learning Datasets Maker [18;19]	Позволяет сформировать обучающий набор данных из векторных и растровых слоев путем разбиения их на фрагменты заданного размера

2. Orfeo ToolBox. В этом программном комплексе реализована возможность запуска алгоритма машинного обучения *SVM* из библиотеки *LibSVM* [20], алгоритмов из модуля *ML* библиотеки *OpenCV* [21]: бустинг, решающие деревья, случайный лес, нормальный байесовский классификатор, k-ближайших соседей, полносвязные нейронные сети, а также алгоритмы случайный лес и метод k-средних из библиотеки *Shark* [22]. *Orfeo ToolBox* содержит два инструмента предназначенных для обучения моделей классификации: *TrainVectorClassifier* и *TrainImagesClassifier*. Первый инструмент предназначен для обучения моделей машинного обучения на объектах одного из слоев проекта, а второй обучает на наборе размеченных изображений.

Для возможности обучения сверточных нейронных сетей в *Orfeo ToolBox* сторонними разработчиками был реализован модуль *OTBTF* [10], позволяющий вызывать методы для обучения нейронных сетей из библиотеки машинного обучения *TensorFlow* [24]. Авторы продемонстрировали примеры работы модуля [25] для таких задач как семантическая сегментация и восстановление частей снимка, закрытых облаками, а также для решения задачи повышения разрешения [26]. Использование модуля *OTBTF* возможно только через скрипт на языке программирования *Python*, что сужает круг потенциальных пользователей этого инструмента.

3. Grass GIS. Алгоритмы машинного обучения в *Grass GIS* представлены в виде расширений *r.learn.ml* и *r.learn.ml2* являющихся интерфейсом для библиотеки машинного обучения *scikit-learn*, и расширением *i.ann.maskrcnn,* которое позволяет обучать и запускать обученные модели нейронной сети *Mask R-CNN*.

4. Saga GIS. В данной ГИС для выделения интересующих классов объектов сначала выполняется автоматическое разбиение снимка на покрывающие его сегменты инструментом *Object Based Image Analysis*, затем для части сегментов пользователь указывает название классов, после чего инструментом *Supervised Classification for Shapes* запускается обучение модели метрической классификации и автоматическая разметка оставшихся неразмеченных сегментов. Помимо этого, в *Saga GIS* реализованы алгоритмы кластеризации *ISODATA* и k-средних, а также интерфейс для библиотеки *LibSVM*.

Заключение. В работе были рассмотрены наиболее популярные инструменты для сегментации и классификации снимков. Наибольшее число инструментов для сегментации и классификации разработано для *Orfeo ToolBox* и *QGIS*, которые также предоставляют удобный интерфейс для подключения сторонних плагинов.

Список литературы

1. QGIS. URL: https://qgis.org.
2. GRASS GIS. URL: https://grass.osgeo.org/.
3. Orfeo ToolBox. URL: https://www.orfeo-toolbox.org/.
4. Saga GIS. URL: https://saga-gis.sourceforge.io.
5. ArcGIS Pro. URL: https://pro.arcgis.com.
6. He K. et al. Mask r-cnn // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017. С. 2961–2969.
7. Плагин для QGIS «Awesome Neural Networks». URL: https://www.awsnn.com.
8. Chen L. C. et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation // Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). 2018. С. 801–818.
9. Tan M., Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks // International conference on machine learning. PMLR, 2019. С. 6105–6114.
10. Boguszewski A. et al. LandCover. ai: Dataset for automatic mapping of buildings, woodlands, water and roads from aerial imagery // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021. С. 1102–1110.

11. Плагин для QGIS buildSeg. URL: https://github.com/deepbands/buildseg.
12. Картографический сервис Mapbox. URL: https://www.mapbox.com.
13. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS // Journal of Open Source Software. 2021. Т. 6. №. 64. С. 3172.
14. Плагин для QGIS «dzetsaka: Classification tool». URL: https://github.com/nkarasiak/dzetsaka.
15. Библиотека scikit-learn. URL: https://scikit-learn.org/stable/index.html.
16. Плагин для QGIS «Neural Network MLPClassifier». URL: https://mlp-image-classifier.readthedocs.io/en/latest.
17. Плагин для QGIS «EnMAP-Box 3». URL: https://www.enmap.org/data_tools/enmapbox.
18. Плагин для QGIS «Deep Learning Datasets Maker». URL: https://github.com/deepbands/deep-learning-datasets-maker.
19. Плагин для QGIS «Produce Training Data For Deep Learning». URL: https://github.com/PratyushTripathy/QGIS-Plugin-Produce-Training-Samples-For-Deep-Learning.
20. Библиотека LibSVM. URL: https://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm.
21. Модуль ML библиотеки OpenCV. URL: https://docs.opencv.org/2.4/modules/ml/doc/ml.html.
22. Библиотека Shark. URL: http://image.diku.dk/shark/index.html.
23. Модуль «OTBTF: Orfeo ToolBox meets TensorFlow». URL: https://github.com/remicres/otbtf.
24. Библиотека TensorFlow. URL: https://www.tensorflow.org.
25. Примеры использования модуля OTBTF для задач обработки аэрокосмоснимков. URL: https://github.com/remicres/otbtf_tutorials_resources.
26. Проект на языке Python предназначенный для повышения разрешения спутниковых снимков. URL: https://github.com/remicres/sr4rs.

A. V. Dunaeva[1,2]

[1]N. N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, RAS, Ekaterinburg, Russia
[2]Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia
e-mail: maryanova.av@yandex.ru

OVERVIEW OF OPEN-SOURCE TOOLS FOR SEMANTIC SEGMENTATION IN SATELLITE IMAGERY

The paper reviews tools for segmenting objects on satellite images in popular open-source GIS: QGIS, Grass GIS, Orfeo ToolBox and Saga GIS. The considered software packages contain tools for training machine learning models, as well as extensions for working with convolutional neural networks and creating data sets for model training. The largest number of tools for segmentation and classification of image pixels was developed for Orfeo ToolBox and QGIS. Orfeo ToolBox contains classic machine learning algorithms: SVM, boosting, decision trees, random forest, normal bayes classifier, k-nearest neighbors and fully connected neural networks. Similar algorithms can be run in QGIS using open-source plugins from third parties. In addition, plugins have been developed for QGIS that use convolutional neural networks to extract building footprints and water surfaces in images.

Keywords: semantic segmentation, classification, machine learning, neural networks, satellite imagery, GIS.

УДК 629.78

С. В. Литвинов, Ю. А. Полевода, В. Ю. Салеев, Р. В. Горбунов

РТУ МИРЭА, Москва, Россия
e-mail: Litvinov_S@mirea.ru, Polevoda@mirea.ru, v.u.saleev@yandex.ru, romaniy11052001@yandex.ru

ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ РАДИОЗАТМЕННЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГНСС

Аннотация. В данной работе был рассмотрен Радиозатменный метод с применением глобальной навигационной спутниковой системы, физическое описание метода радиозатмения, алгоритм определения высоты тропопаузы. Рассмотрены современные методы анализа тропопаузы на основе изучения температура ионосферы. Анализируется целесообразность использования сигналов ГНСС для радиозатменного зондирования ионосферы с малого космического аппарата (МКА).

Ключевые слова: ионосфера, зондирование, радиозатмение, ГНСС.

Радиозатменный метод исследования ионосферы является одним из наиболее значимых метеорологических инструментов глобальной навигационной спутниковой системы. В данной статье описано применение радоизатменного метода глобальной навигационной спутниковой системе для расчёта высоты тропопаузы. Расчёт высоты тропопаузы является одним из наиболее важных параметров для определения погоды и атмосферных явлений. Метод радиозатменного измерения позволяет получать атмосферные параметры с высоким разрешением и делает пространственное распределение данных более однородным.

Радиозатменный метод с использованием глобальной навигационной спутниковой системы является новым и недостаточно изученным методом дистанционного зондирования для исследования атмосферы земли. Он позволяет анализировать такие свойства атмосферы, как давление и температура. Радиозатменный метод основан на анализе радиосигналов, изучаемых спутниками глобальной навигационной спутниковой системы. Лучи глобальной навигационной спутниковой системы, проходя через атмосферу Земли, преломляются и принимаются другим спутником. Радиозатменный метод глобальной навигационной спутниковой системы (рис. 1) впервые был продемонстрирован в 1995-м г. NASA. Именно с этого момента радиозатменный метод стал широко применяться для анализа атмосферы, поскольку он является недорогим, точным и обладающим долгосрочной стабильностью и высоким разрешением.

С физической стороны радиозатменный метод можно описать формулой Бугерра, которая представляет собой уравнение, описывающее траекторию луча в сферически симметрично мы поля преломления:

$$n * r * \sin(\phi) = \text{const} = a,$$

© Литвинов С. В., Полевода Ю. А, Салеев В. Ю., Горбунов Р. В., 2022

где $r * \sin(\phi)$ представляет собой расстояние по перпендикуляру от начала координат до касательной к траектории луча.

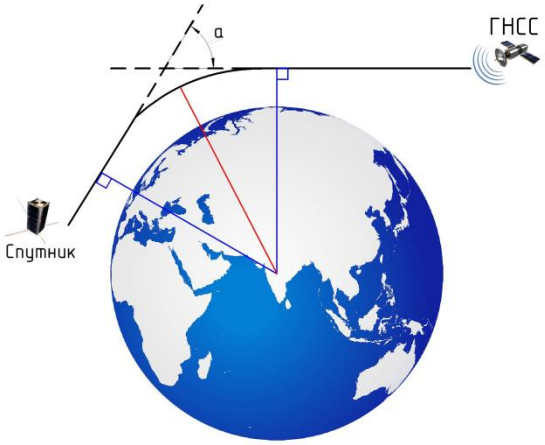


Рис. 1. Геометрическое определение затмения сигналами спутников ГНСС

Поскольку r уходит в бесконечность (стремится к прямой линии), n стремится к единице, таким образом переменная предыдущей формулы будет стремиться к параметру воздействия (a).

ϕ – угол между радиус-вектором и траекторией луча и на рис. 1, ϕ равен 90° в точке касания, поэтому $\sin\phi = 1$ (единица), что приводит к

$$a = n\,(r_t) * r_t = n * r_t,$$

где r_t – радиус точки касания, который представляет собой расстояние между центром кривизны и точкой касания, как показано на рис. 1. С другой стороны, a – это так называемый параметр воздействия, который определяется в единицах дальности и является постоянным вдоль траектории луча.

Радиозатменный метод работает на анализе этого параметра т. е. $\frac{dL}{dt}$ в мс-1 или доплеровский сдвиг fD в Гц является ключевым наблюдаемым параметром:

$$f_D = -\frac{f}{c}\frac{dL}{dt},$$

где fD – избыточный доплеровский сдвиг на несущей частоте fi, вызванный нейтральной атмосферой и ионосферой; c – скорость света в вакууме; t – время.

Сигналы $L1$ и $L2$ проходят по разным путям, поскольку изгиб ионосферы зависит от частоты. Линейная комбинация приводит к устранению ионосферного эффекта первого порядка:

$$\Delta L_c = \frac{f_1^2 \Delta L_1 - f_2^2 \Delta L_2}{f_1^2 - f_2^2},$$

ΔL_c содержит особые фракции нейтральной атмосферы. Воробьев и Красильникова (1994) предложили использовать комбинацию двух углов изгиба (α1 и α2) при одинаковых ударных факторах:

$$\alpha_c(a) = \frac{f_1^2 \alpha_1(\mathrm{a}) - f_2^2 \alpha_2(a)}{f_1^2 - f_2^2}.$$

$\alpha_1(a)$ и $\alpha_2(a)$ – углы изгиба (без коррекции) для сигналов $L1$ и $L2$. Этот метод известен как коррекция угла изгиба коррекция угла и является более предпочтительным, чем первый метод. Используя абелево преобразование (обратная задача), можно получить показатель преломления.

На данный момент существует множество способов для определения местоположения тропопаузы. Среди них наиболее распространённым является определение тропопаузы по скорости затухания сигнала.

Тропопаузы, согласно всемирной метеорологической организации, определяется через самый низкий уровень сигнала, на котором скорость распространения сигнала уменьшается до 2 км или менее, при условии, что средняя скорость распространения между этим уровнем и всеми более высокими уровнями находится в пределах 2 км и выше.

Данный метод определения разработан для вычисления температуры тропопаузы в соответствии с четырьмя различными способами:

- на основе изгиба угла,
- на основе преломления,
- двух определений тропопаузы на основе температуры.

Определение тропопаузы на основе температуры возможно из данных Всемирной метеорологической организации, либо могут быть получены из определения точки холода. Этот метод использует тепловое определение тропопаузы. Для расчета тропопаузы температуры, необходимо интерполировать данные между вертикальными уровнями.

Системы, состоящие из малых космических аппаратов, позволяют решать широкий спектр задач мониторинга. На сегодняшний день цена выведения КА на орбиту сопоставима, а порой превышает стоимость его создания, что обосновывает особую актуальность разработки малых КА, в том числе мини- и микро-классов.

В настоящее время заметное распространение получили космические аппараты типа Cubesat, появившиеся как опытные образцы университетских разработок. Как правило, они используются либо в качестве инструмента отработки новых технологических или инженерных решений, либо как возможность приобретения опыта создания и эксплуатации космической аппаратуры. КА типа Cubesat, в силу своих малых размеров, также имеют весьма жесткие ограничения, именно поэтому состав бортовой научной аппаратуры (БНА), как правило, ограничивается одним, максимум тремя бортовыми приборами. Например, для решения задач мониторинга ионосферы и ряда дополнительных прикладных задач школьниками и студентами, в состав БНА целесообразно включить бортовой навигационный приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS/Galileo/Beidou. Вообще, использование малых КА позволяет улучшить пространственно-временной охват, что имеет

решающее значение для изучения нижней ионосферы из-за существенных и сложных суточных вариаций, а также взаимного влияния нижней атмосферы и верхней ионосферы.

Реализация метода требует разработки малогабаритных бортовых антенн с диаграммой направленности в азимутальной плоскости порядка 60°…90° и в вертикальной плоскости 20°…30°. При этом антенна должна иметь высокий коэффициент усиления и возможность принимать опорные сигналы от десяти или более навигационных КА. В целом бортовой навигационный приемник должен обеспечивать получение следующих параметров сигналов ГНСС: псевдодальность, псевдофаза, доплеровский сдвиг и мощность сигнала или значения сигнал/шум, измеряемые приемником для выполнения фазовых измерений. Помимо разработки самого приемника требуется разработка специального программного обеспечения обработки данных, с целью получения параметров ионосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022 г.

Список литературы

1. Steiner A. K., Kirchengast G., Ladreiter H. P. Inversion, error analysis, and validation of gps/met occultation data // Annales Geophysicae. 1998. Т. 17. № 1. С. 122–138.

2. Gavrik A. L., Kolomiets S. F., Ilyushin Ya. A., Bondarenko M. I., Lukanina L. A., Kopnina T. F. Radiolocation radio occultation on the venera-d mission: a concept of radio frequency subsystem and radio science technique // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2019. Т. 11. № 1. С. 5–12.

3. Полевода Ю. А., Литвинов С. В., Милорадов Г. А. О современном состоянии зондирования ионосферы радиозатменным методом // Сб. науч. ст. по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2022»), г. Москва, РТУ МИРЭА: сб. науч. ст. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 102–104.

4. Павельев А. Г., Матюгов С. С., Яковлев О. И., Павельев А. А., Лиу Й., Губенко В. Н. Спутниковая радиоголография и глобальный мониторинг ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2017.

S. V. Litivnom, Yu. A. Polevoda, V. Yu. Saleev, R. V. Gorbunov

РТУ МИРЭА, Москва, Россия
e-mail: Litvinov_S@mirea.ru, Polevoda@mirea.ru, v.u.saleev@yandex.ru, romaniy11052001@yandex.ru

IONOSPHERIC SOUNDING BY RADIO OCCULTATION TECHNIQUES USING GNSS

In this paper, a radio-occultation method using a global navigation satellite system, a physical description of the radio-occultation method, and an algorithm for determining the height of the tropopause were considered. Modern methods of tropopause analysis based on the study of the ionosphere temperature are considered. The expediency of using GNSS signals for radio-exchange sensing of the ionosphere from a small spacecraft is analyzed.

Keywords: ionosphere, vertical sounding, Parus-A, CADI, JORN.

УДК 528.88;613.41

Е. А. Мамаш[1], И. А. Пестунов[1], С. Я. Кудряшова[2], А. С. Чумбаев[2]

[1]Кандидат физико-математических наук, ФИЦ ИВТ, Новосибирск, Россия
[2]Кандидат биологических наук, ИПА СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: elenamamash@gmail.com, pestunov@ict.sbras.ru,
sya55@mail.ru, chumbaev@issa-siberia.ru

ВАЛИДАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОДУКТОВ MODIS/(TERRA+AQUA) LST С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ

Аннотация. В статье приводятся результаты валидации данных MODIS/(Terra+Aqua) LST на основе наземных (in situ) данных для территории Новосибирской области, характеризующейся общей приподнятостью и сильной расчлененностью. Наземный автоматизированный мониторинг воздуха и почв был организован с использованием регистраторов температуры типа «Thermochron» в теплое время года. Показано, что, несмотря на небольшой объем выборки и не всегда точное совпадение по времени спутниковых данных и данных insitu, полученные результаты (среднее смещение, среднеквадратичная ошибка и коэффициент детерминации) хорошо согласуются с результатами аналогичных исследований для других территорий и типов почвенного покрова.

Ключевые слова: температура земной поверхности, MODIS, Terra, Aqua, склоновые земли, Предсалаирье Новосибирской области.

Введение. Оценка теплообеспеченности земельного фонда является актуальной научно-практической задачей. Построение картографических моделей температурных полей земной поверхности позволяет выделить климатические особенности регионального почвенного климата, выявить уникальность климата почв и указать степень возможного сельскохозяйственного и производственного назначения земельного фонда.

Температура земной поверхности может быть определена как с помощью наземных измерительных устройств, так и с помощью данных космической съёмки в тепловом инфракрасном диапазоне. В качестве таких данных могут быть использованы, например, снимки, получаемые на регулярной сетке помощью спектрорадиометра MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua четыре раза в сутки.

Температура поверхности Земли (LST – Land Surface Temperature) является одним из стандартных информационных продуктов MODIS. Для практического применения этих продуктов требуется валидация их на полигонах, представляющих различные типы подстилающей поверхности.

В настоящее время известно несколько работ, посвященных этой проблеме. В работе [1], например, описываются результаты сравнения данных MODIS различных коллекций с данными, полученными in situ на нескольких площадках, представляющих различные типы почвенно-

© Мамаш Е. А., Пестунов И. А., Кудряшова С. Я., Чумбаев А. С., 2022

растительного покрова, расположенных в США, Португалии, Намибии и Китае. В результате авторами получены диаграммы рассеивания для спутниковых и наземных данных и их основные статистические оценки, такие как смещение (bias) и среднеквадратическая ошибка (RMSE). Отрицательные значения смещений, полученные для большинства станций, авторы связывают с различием в геометрии съемки со спутника и in situ. Показано, что в большинстве случаев абсолютные значения смещений и RMSE составляют менее 2 °C.

В работе [2] представлена комплексная оценка данных Aqua/MODIS LST на основе шести измерительных станций, аналогичных [1], расположенных на территории США. Анализируются данные за 10 лет (19 735 значений) и делается вывод о хорошем качестве продукта Aqua/MODIS LST(среднее смещение равно –0,93 °C, RMSE = 2,65 °C.

Альтернативным измерительным станциям источником получения наземных данных является использование наземных регистраторов температуры типа «Thermochron». Опыт совместного использования спутниковых измерений MODIS/Terra LST и датчиков типа «Thermochron» приведен в работе [3] для исследования поверхности Арктики (Гренландия). Показано, что температура поверхности, измеренная с помощью термохронов была примерно на 3 °C выше, чем полученная по данным MODIS (RMSE = 3,1 °C, bias = –3,4 °C).

Таким образом, несмотря на наличие и доступность большого объема спутниковых данных, накопленных к настоящему времени, крайне важным является предварительная оценка возможности их использования для анализа температурных режимов поверхности с учетом особенностей исследуемых территорий.

Целью данной работы является валидация продуктов MODIS/(Terra+Aqua) LST для территории Новосибирской области, характеризующейся сильной вертикальной и горизонтальной расчлененностью.

Объект исследования. Задача оценки теплообеспеченности земельного фонда является актуальной не только для равнинной части Новосибирской области [4], но и для территорий, характеризующихся общей приподнятостью и сильной расчлененностью. Поэтому в качестве объекта исследования было выбрано Предсалаирье, расположенное в предгорьях Салаирского кряжа. Несмотря на значительную вертикальную и горизонтальную расчлененность (до 1–1,2 км/км^2) территория Предсалаирья характеризуется высокой степенью сельскохозяйственной освоенности (72 %), из которых 50 % площади используется под пашни. Необходимо учитывать, что формирование почвенного климата в значительной степени зависит от физико-географических условий среды [5]. Возможность совместного использования спутниковых и наземных данных позволит провести анализ температурных полей почв склоновых земель и определить их пространственное распределение в зависимости от степени хозяйственной освоенности земельного фонда.

Материалы и методы. Изначально в качестве объектов исследования на склоновых землях Предсалаирской лесостепи были выбраны восемь ключевых участков с различным типом подстилающей поверхности, однако в результате последующего сбора данных, к большому сожалению, удалось собрать данные только с двух: точка 2 – сенокос на разнотравно-злаковом лугу (55°00'56.0''N; 83°43'47.0''E) и точка 3 – пахотные земли (55°02'11.6''N; 83°51'45.7''E), в прошлом также занятые лугово-степной растительностью. Наземный автоматизированный мониторинг воздуха и почв был организован с использованием специализированного регистратора температуры DS-1921G «Thermochron». Динамика изменения температур воздуха и на поверхности почвы в течение теплого периода года фиксировалась с интервалом в 3 часа. Спутниковый мониторинг предполагал анализ температурных продуктов LST (MOD11A1, MYD11A1), для извлечения и обработки спутниковых данных в исследуемых точках использовалась система Google Earth Engine.

Результаты и обсуждение. Наземные измерения проводились с 09.06.2021 г. по 20.09.2021 г. Датчики – термохроны располагались в точках, где влияние рельефа поверхности было сведено к минимуму, поверхность можно считать однородной. Число извлеченных из архива соответствующих спутниковых измерений (N) составило порядка 21–27 за весь исследуемый период. Для валидации была проведена отбраковка данных на основе идентификатора Хампеля, который считается надежным методом обнаружения выбросов [1, 6].

В результате проведенного совместного анализа наземных и спутниковых данных для всех полученных наборов данных построены соответствующие графики динамики температур и диаграммы рассеяния. Примеры графиков представлены на рис. Итоговая статистика для исследуемых точек приведена в табл.

Из табл. видно, что для исследуемых точек, также как и в работах [1–3], характерным является наличие отрицательных значений смещений в интервале от –0,09 °С до –2,3 °С. Из условий эксперимента следует, что это не может быть связано с различием в геометрии съемки, о чем говорилось в работе [1], поскольку датчики типа «Thermochron» ее не учитывают. Наиболее четко смещение прослеживается на рис., *а*, где представлены графики LST для точки 3, хорошо повторяющие форму друг друга и смещенные относительно друг друга примерно на 2 °С. Среднеквадратичная ошибка более 2 °С (в среднем 2,6 °С для КА Terra и 2,68 °С для КА Aqua) в нашем случае может быть связана с достаточно большим различием по времени съемки между спутниковыми и наземными измерениями, а также с влиянием различных климатических факторов, таких как влажность воздуха, количество водяного пара в воздухе, скорость ветра, излучательная способность поверхности и т. д. [2]. Как видно, эти значения RMSE, достаточно близки к значению RMSE, полученному в работе [2] на основе выборки из 19 735 измерений.

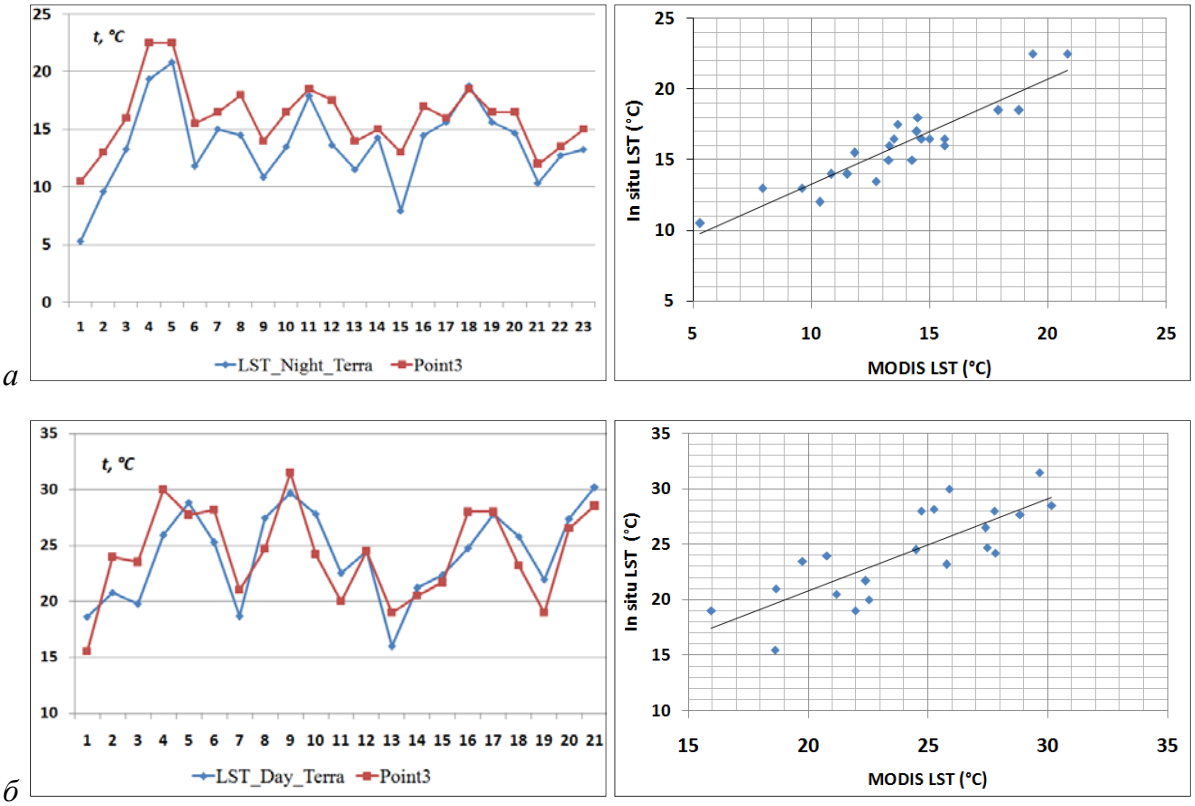


Рис. Примеры графиков динамики ночных (*а*) и дневных (*б*) температур и диаграмм рассеяния, полученных на основе наземных и спутниковых измерений (MODIS/Terra) в точке 3 за период 09.06.2021 г. по 20.09.2021 г.

Таблица

Оценка смещения (bias), среднеквадратичная ошибка (RMSE) и коэффициент детерминации (R^2) между MODIS /(Terra+Aqua)LST и LST in situ в дневное и ночное время

	Terra/MODIS				Aqua/MODIS			
	N	bias (°C)	RMSE (°C)	R^2	N	bias (°C)	RMSE(°C)	R^2
Точка 2 (день)	22	–0,92	2,47	0,64	27	–1,65	3,36	0,37
Точка 3 (день)	21	–0,09	2,53	0,63	21	–1,50	2,45	0,73
Точка 2 (ночь)	21	–1,82	2,70	0,61	24	–0,80	2,84	0,53
Точка 3 (ночь)	23	–2,30	2,71	0,84	22	–0,85	2,09	0,73
Среднее		–1,28	2,60			–1,20	2,68	

Из табл. видно, что для КА Terra наибольшие абсолютные значения смещений и среднеквадратичных ошибок характерны для ночных измерений, а для Aqua наоборот для дневных. Однако их средние значения для КА Terra и КА Aqua примерно одинаковые. Также из табл. видно, что именно время съемки играет более значимую роль в величине смещений и ошибок, чем тип почвенного покрова (точка 2 или 3). Коэффициенты детерминации между данными почти во всех случаях достаточно высокие, что говорит, в целом, о тесной связи между наземными и спутниковыми данными.

Заключение. Таким образом, впервые для территории Новосибирской области проведена валидация данных MODIS/(Terra+Aqua) LST для теплого времени года. Несмотря на небольшой объем выборки и не всегда точное совпадение по времени данных термохронов и спутниковых

данных получены хорошие результаты (смещение в среднем равнялось –1,2 °С для данных с КА Terra и –1,28 °С для данных с КА Aqua; RMSE составило 2,6 °С для данных с КА Terra и 2,68 °С для данных с КА Aqua, $R^2 > 0{,}6$ в 75 % случаев), согласующиеся с результатами аналогичных исследований для других территорий и стран, приведенных в работах [1–3]. Вследствие достаточно короткого периода наблюдения (июнь-сентябрь 2021 г.) нами не рассматривались факторы сезонного влияния, а также влияние атмосферы и излучательной способности поверхности на точность совпадения наземных и спутниковых данных. Исследования в этом направлении будут продолжены.

Список литературы

1. Duana S., LibZ., Lic H., Göttsched F., Wue H., Zhaof W., Lenga P., Zhangb X., Col C. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 225. P. 16–29.

2. Lia S., Yub Y., Suna D., Tarpleyb D., Zhanb X., Chiuc L. Evaluation of 10 year AQUA/MODIS land surface temperature with SURFRAD observations // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35, No. 3. P. 830–856.

3. 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.

4. Воронина П. В., Пестунов И. А., Кудряшова С. Я. Картографическое моделирование температурных полей поверхности Новосибирской области по данным спутникового зондирования // Сб. Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 4. № 1. С. 45–51.

5. Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние, 1978. 121 с.

6. Davies P. L., Gather U. The identification of multiple outliers // Journal of the American Statistical Association. 1993. Vol. 88. № 423. P. 782–792.

E. A. Mamash[1], I. A. Pestunov[1], S. Ya. Kudryashova[2], A. S. Chumbaev[2]

[1]PhD in Physics and Mathematics, FRCICT, Novosibirsk, Russia

[2] PhD in Biology, SSA SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: elenamamash@gmail.com, pestunov@ict.sbras.ru, sya55@mail.ru, chumbaev@issa-siberia.ru

VALIDATION OF TEMPERATURE PRODUCTS MODIS/(TERRA+AQUA) LST USING IN SITU DATA

The results of validation of MODIS/(Terra+Aqua) LST data based on in situ data for the territory of the Novosibirsk region, which is characterized by general elevation and strong dissection, are presented in the article. Ground-based automated monitoring of air and soils was organized using temperature recorders of the Thermochron type in the warm season. It is shown that despite the small sample size and not always exact coincidence in time of satellite data and in situ data, the results obtained (average bias, standard error RMSE, coefficient of determination R^2) are in good agreement with the results of similar studies for other territories and soil cover types.

Keywords: land surface temperature, MODIS, Terra, Aqua, sloping lands, Cis-Salairye, Novosibirsk region.

УДК 004.4, 912.4

А. К. Матузко

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения
Российской академии наук, Красноярск, Россия
e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ НАБОРОВ ДАННЫХ LANDSAT 8 C2L2 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация. Точность данных дистанционного зондирования Земли влияет на результаты анализа городской среды. Таким образом, обработке спутниковых данных необходимо уделять особое внимание, чтобы не снижалась их точность. В начале 2021 г. были опубликованы новые данные Landsat 8 Collection 2 Level 2 (C2L2), с учетом атмосферной коррекции, но при анализе данных, авторами была обнаружена потеря данных около 25 % на территории города Красноярска. Потери данных обнаружены в четырех городских зонах: городской лес, особо-охраняемые природные территории, новая жилая застройка, промышленная зона. Такая потеря данных привела к необходимости воспроизведения самостоятельного расчета температуры поверхности Земли на исследуемую территорию. Самостоятельная методики расчета позволяет проводить анализ территории, сохраняя новые методы атмосферной коррекции данных Landsat 8 C2L2.

Ключевые слова: тепловые космические снимки, Landsat, температура поверхности Земли.

Введение. Применения спутниковых данных для анализа исследуемой территории позволяет решать задачи по анализу городских территорий. Использование данных тепловой съемки решает задачи по поиску тепловых особенностей, нахождению территориальных изменений (например, незаконная рубка лесных территорий, образование стихийных мусорных свалок). Эффективность решения задач по анализу территории зависит от качества обработки спутниковых данных [1].

Материалы и методы. Данные Landsat стали свободно доступными в декабре 2009 г. для широкого круга пользователей [2]. Запуск спутника Landsat 8 состоялся в феврале 2013 г. Спутник Landsat 8 получает данные с использованием двух разных датчиков – Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Изображения Landsat 8 состоят из 11 спектральных каналов, где 10-й и 11-й являются дальними инфракрасными полосами с пространственным разрешением 100 м, что позволяет анализировать энергию поверхности Земли, а не отражение солнечного света [3].

В начале 2021 г. стали доступны новые алгоритмы для расчета температуры земной поверхности спутниковых данных Landsat 8, которые получили название Collection 2 Level 2 (C2L2). В них включены новые алгоритмы атмосферной коррекции, что позволило увеличить точность полученной температуры земной поверхности.

© Матузко А. К.., 2022

Параметры атмосферы (высота, температура и удельная влажность) упакованы в файлы, которые передаются в новом наборе данных. Параметры атмосферы получены из сторонних источников данных, для их получения необходима такая информация о снимке как широта, долгота, давление и время снимка. Все эти параметры скрыты от пользователя и напрямую пользователь получает файл с температурой земной поверхности.

Исследование новых данных выявило значительную потерю на территорию города Красноярска, которая составляют около 25 % по административной границе города. Такая потеря произошла из-за частичного отсутствия данных для расчета коэффициента эмиссии, которые были использованы представителями Landsat 8.

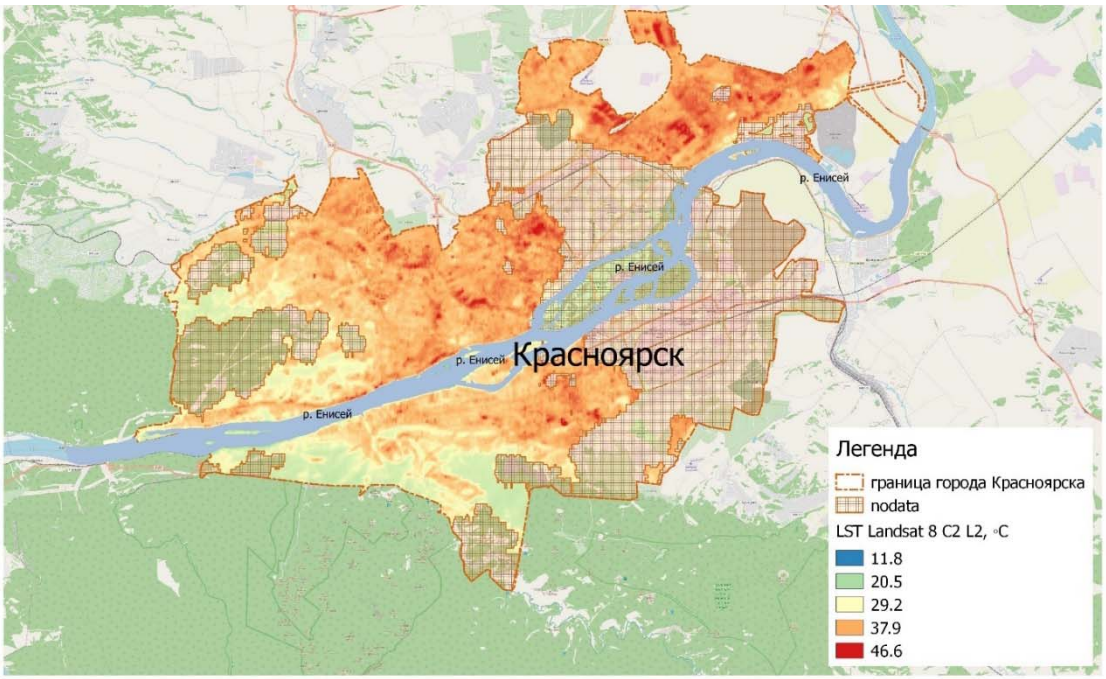


Рис. 1. Частичная потеря данных на территорию города Красноярска

Подробное изучение алгоритма, используемого при расчете температуры земной поверхности [4], позволило самостоятельно рассчитать потерянные данные при этом сохранить важные показатели атмосферной коррекции и точность полученных значений. Для вычисления коэффициента эмиссии были использованы красный и инфракрасный спектральные каналы Landsat 8. Новый алгоритм основывается на предоставленных значениях Landsat 8 Collection 2 Level 2 теплового излучения (ST_TRAD), восходящего излучения (ST_URAD), прозрачности атмосферы (ST_ATRAN), попадающего излучения (ST_DRAD), как показано в формулах (1,2):

$$SurfRad = \frac{ST_TRAD - ST_URAD}{ST_ATRAN}; \quad (1)$$

$$Radiance = SurfRad - (1.0 - \varepsilon) \bullet ST_DRAD. \quad (2)$$

Результаты. Используя алгебру карт, выполняем вычитание из значений температуры поверхности земли Landsat 8 C2L2, значения Landsat 8 вычисленные по формулам (1), (2). Таким образом, получены средние значения между разницами значений температуры, они находятся в статистике результирующего слоя и представлены в табл.

Таблица

Разница между значениями температур Landsat 8 L2C2
и вычисленными значениями

Дата	Среднее значение
23.04.2019	1.28586
29.08.2019	1.25417
07.09.2019	1.22280
20.05.2020	1.32062
12.06.2020	1.30020
15.08.2020	1.23397
08.06.2021	1.23024
10.07.2021	1.18741
26.07.2021	1.23870
27.08.2021	1.20452

Проведено сравнение разницы между полученными температурами по типу подстилающей поверхности. Для этого основными типами было выделено четыре: вода, почва, лес (растительность), строения. На рис. 2 представлена диаграмма, где отображено, что наибольшее совпадение значений соответствует типу подстилающей поверхности – вода, а максимальное расхождение в классе строений. Учитывая эту закономерность в работах требующих максимальной точности значений, можно учитывать эту погрешность. Для исследований температуры поверхности воды эти поправки будут минимальными, и можно ими пренебречь.

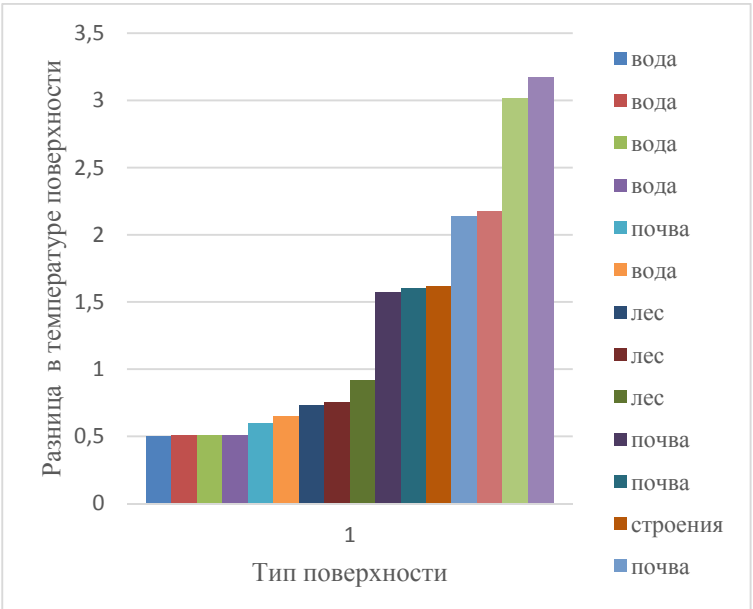


Рис. 2. Соотношение разницы температур к типу подстилающей поверхности

Выводы. Полученные данные позволяют проводить анализ территории, на которую были получены данные. города Красноярска. Принимая во внимание особенности территории, подобраны бесснежные и безоблачные сцены. Учитывая, что новый алгоритм вычислений, состоит из 7 шагов, было принято решение о необходимости написания программного продукта для их реализации. Автоматизация процесса позволяет ускорить получение карты температуры земной поверхности на любую территорию, а не только на территорию города Красноярска. Внедрение алгоритма снижает ошибки, которые могут быть выявлены при ручной обработке.

Список литературы

1. Хомич В. А. Экология городской среды: учеб. пособие для вузов. Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. 267 с.

2. Сайт Геологической службы США [Электронный ресурс]: USGS. Landsat Missions. Landsat8. Режим доступа: URL: http://landsat.usgs.gov/landsat8.php.

3. Frey C. M., Parlow E. Flux measurements in Cairo. Part 2: On the determination of the spatial radiation and energy balance using aster satellite data // Remote Sens. 2012. 4. P. 2635–2660.

4. Laraby K. Landsat surface temperature product: Global Validation and Uncertainty Estimation. Rochester Institute of Technology: RIT Scholar Works, 2017.

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

PROCESSING OF LANDSAT 8 C2L2 SATELLITE DATA SETS FOR SURFACE TEMPERATURE DETERMINATION

The accuracy of Earth remote sensing data affects the results of the analysis of the urban environment. Thus, special attention must be paid to the processing of satellite data in order not to reduce their accuracy. At the beginning of 2021, new Landsat 8 Collection 2 Level 2 (C2L2) data were published, taking into account atmospheric correction, but when analyzing the data, the authors found a data loss of about 25 % on the territory of the city of Krasnoyarsk. Data loss was found in four urban areas: urban forest, specially protected natural areas, new residential development, industrial zone. Such a loss of data led to the need to reproduce an independent calculation of the temperature of the earth's surface for the study area. An independent calculation method allows you to analyze the territory while maintaining the new methods of atmospheric correction of Landsat 8 C2L2 data.

Keywords: thermal space images, Landsat, land surface temperature.

УДК 004.932.2

Д. А. Перфильев

Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, 660074, г. Красноярск Россия
perfilyev7775@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ СЕГМЕНТАЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Аннотация. В статье предлагается технология управления сегментацией изображения функции на основе результатов интерпретации. Технология управления основана на анализе и классификации динамики частотной характеристики показателей изображения. В статье приведен пример управляемой сегментацией агрохимических показателей сельскохозяйственных земель Восточной зоны Красноярского края.

Ключевые слова: сегментация изображения, правило сегментации и интерпретации агрохимических показателей.

Введение

В области анализа изображения задачи сегментации и интерпретации физических свойств объектов по-прежнему остаются ключевыми [1–3, 6, 7].

В реальных условиях объект постоянно изменяет свои свойства. По этой причине цель сегментации и интерпретации представляет анализ динамики плотности распределения сегментируемых областей изображения [6, 7].

В этом случае сегментация рассматривается как непрерывный итерационный процесс отображения динамики изображения $f(a_i)$:

$$\text{Seg: } f(a_i) \xleftarrow{Lp(s_i^{Sem.})} n_i^{(Sem.)}, \qquad (1)$$

где $s_i^{Sem.}$ – имя области; Lp – правило интерпретации; $n_i^{(Sem.)} \in N$ – семантическое отношение (имя класса), ограниченное радиусом $r_i^{(Sem.)}$.

Сложность интерпретации в условиях высокой скорости изменения свойств объекта определяется рядом концептуальных аспектов:

- цель интерпретации – (феноменология процесса);
- адекватностью отображения – (феноменологических свойств принятой модели: $f(a)$).

Первым шагом по трансформации традиционной технологии интерпретации является модернизация правила Lp семантической составляющей: $[s_i: \nabla f(a) - Lp(s_i^{Sem})] < r_i^{Sem}$ и $s_i \cap s_j = 1$, где $s_{i\,j} \in S$, r_i^{Sem} – радиус однородности для s_i^{Sem}.

Очевидно, что оценка однородности класса, может быть изменена в процессе сегментации.

© Перфильев Д. А., 2022

1 Особенность информационно-аналитической технологии

Каждый класс с центром a_i^* и радиусом однородности r_i^{Sem} перемещается в направлении заданного правилом интерпретации значения плотности сегментированных результатов на данный момент. Установка значения $Lp(s_i^{Sem})$, позволяет системе находиться в оптимальном состоянии: величины сектора обзора, направления и глубины перемещения.

Сужение сектора обзора и глубины анализа изображения обычно приводит к значительному перемещению класса и наоборот.

Повысить уровень устойчивости системы можно за счет управления классами. Например:

1) за определенный период в памяти каждого класса выделяется подмножество новых данных о состоянии $f(a)$;

2) на основе подмножеств новых данных формируется общий массив данных: $N^S=\{n_1, n_2, n_3, \ldots, n_i\}$, где i – идентификатор класса.

Закономерна ситуация, при которой часть новых данных в общей памяти будут повторяться. Появление и рост повторений (цикличности) приводит к общему сужению сектора сегментации и далее к сокращению избыточного количества задействованных классов;

3) повторения удаляются, оставшиеся оригинальные данные распределяются по классам;

4) после завершения распределения текущий массив данных удаляется.

Отличительной особенностью информационно-аналитической технологии является то, что определение направления движения, глубины и величины сектора сегментации ограничиваются за счет текущего массива данных, что существенно снижает требования к необходимому вычислительному ресурсу.

2 Анализ результатов

Ключевыми показатели определяющими энергетическое состояние плодородия сельскохозяйственных земель следует признать; кислотность, влажность, содержание гумуса, подвижных форм фосфора и обменного калия (рис. 1) [4, 5].

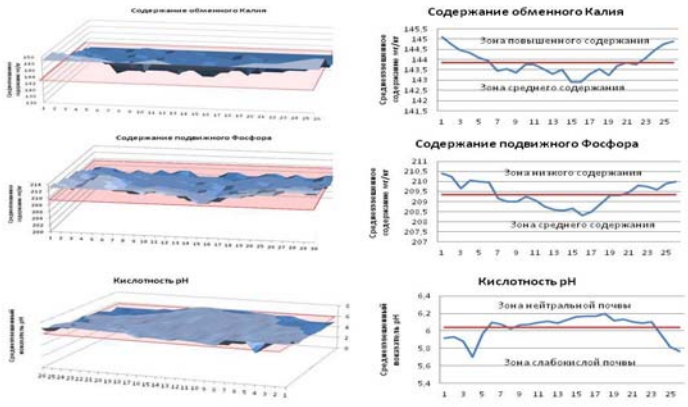


Рис. 1. Сегментация изображения средневзвешенных показателей обменного калия, подвижного фосфора и кислотности

Вычисление радиуса r_i^{Sem} однородности для i-го класса выполняется от особой точки интегрирования i-го класса следующим образом:

$$\omega_{0i} = \mu_{cp} \pm \frac{r_i^{Sem}\sigma}{\sqrt{n}}.$$

В результате характеристика $f(\omega_r)$, позволяет сформировать границы классов областей изображения радиусом r_i^{Sem}, отражающие однородные свойства динамики кислотности.

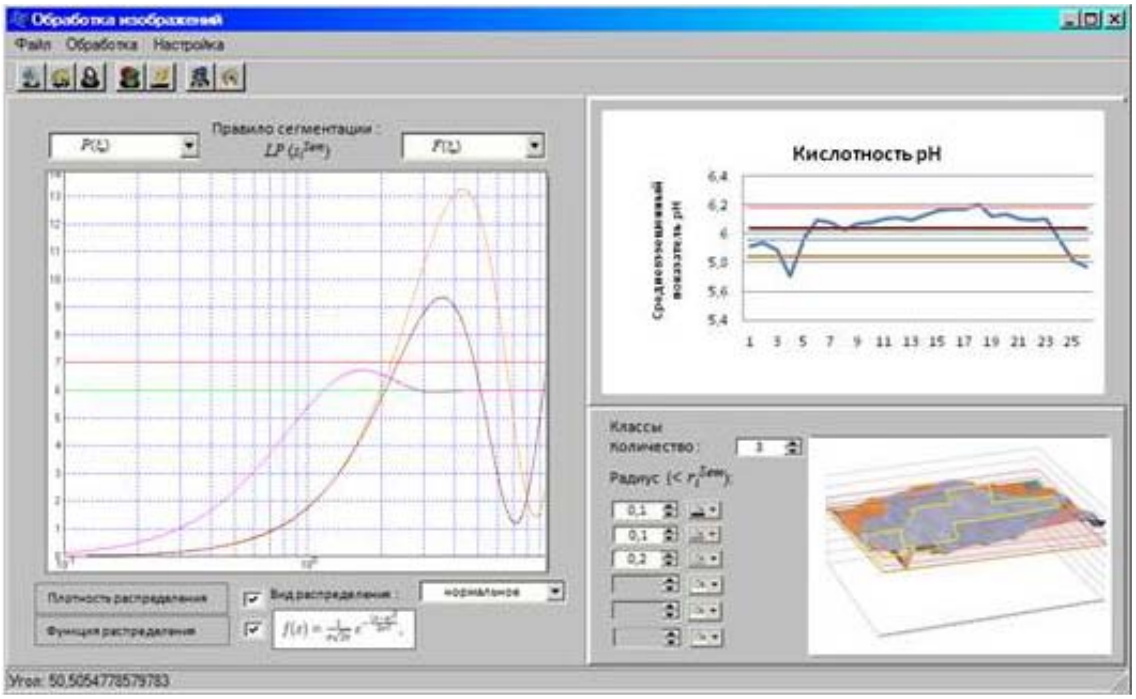


Рис. 2. Информационно-аналитическая технология управления сегментацией

На рис. 2 показан результат работы программы сегментации границ областей, с наиболее разной динамикой изменения кислотности по трем классам.

3 Заключение

Представленная технология гармонизирована с принятыми методами анализа основных агрохимических показателей и значительно расширяет возможности для более точного анализа, интерпретации и прогнозирования агрофизической характеристики состояния почв на локализованных участках.

Информационно-аналитический подход к управлению сегментацией 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 г. (http://www.krskstate.ru/2030/plan).

Внедрение и распространение инновационных практик и технологий, позволит использовать новые возможности контроля и управления качеством природного энергетического состояния Восточно-Сибирской территории (23 млн. га).

Список литературы

1. Srikanth R. and Bikshalu K. 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

2. 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.

3. 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. December 2020. Vol. 195. 107890.

4. Avdyukova T. V., Hrutsky S. A. Fertility State of Arable Lands in the East Zone of Krasnoyarsk Krai // Agriculture. 2017. № 1. С. 25–29.

5. Chuprova V. V., Belousov A. A., Belousova E. N., Gorbunova Yu. V. Evaluation of agroecological condition of the soils involved in the develop-ment of sand and gravel quarries of Kansk district of Krasnoyarsk region // Journal of Siberian Federal University. Agronomic. 2019. № 3. P. 16–21.

6. Perfilyev D. A. 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 p. ISBN 978-5-7638-4389-7. 2020.

7. Perfilyev D. A., Avdyukova T. V. Image segmentation of acidity of agricultural lands in Eastern Siberia // Труды по вычислительным методам в системах и программном обеспечении CoMeSySo 2021: Наука о данных и интеллектуальные системы. С. 133–144. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_1

D. A. Perfilyev

Siberian Federal University, Institute of space information technology,
660074, Krasnoyarsk, Kirenskogo St. 26, KLF
e-mail: perfilyev7775@yandex.ru

IMAGE SEGMENTATION MANAGEMENT TECHNOLOGY

The article proposes a technology for managing image segmentation based on interpretation results. The control technology is based on the analysis and classification of the dynamics of the frequency response of image indicators. The article provides an example of controlled segmentation of agrochemical indicators of agricultural lands in the Eastern zone of the Krasnoyarsk Territory.

Keywords: image segmentation, the rule of segmentation and interpretation of agrochemical indicators.

УДК 614.842; 630*96

Е. С. Подольская, Д. В. Ершов, К. А. Ковганко

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов (ЦЭПЛ РАН), Москва, Россия
e-mail: podols_kate@mail.ru

ЗОНИРОВАНИЕ ЛЕСОВ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПО ИНФРАСТРУКТУРЕ И ЛЕСНЫМ ПОЖАРАМ

Аннотация. Инфраструктурные данные являются современной основой исследовательских проектов во многих отраслях, в частности, в лесном хозяйстве. Предлагаемая методика зонирования состоит в переходе от уровней зон охраны к зонам инфраструктурной нагрузки, которая определяется данными по расположению населенных пунктов и дорожной сети на примере проекта OSM. Приведено описание этапов методики, в качестве объекта исследования была выбрана территория Красноярского края. Методика завершается разработкой рекомендаций по возможному изменению величины нагрузки. Зоны нагрузки могут быть использованы для сопоставления с архивами данных по лесным пожарам.

Ключевые слова: инфраструктура, дорожная сеть, населенные пункты, OSM, лесные пожары, зоны охраны лесов, Красноярский край.

Введение. Значительную роль в современных лесных проектах играют инфраструктурные данные по дорогам и населенным пунктам, являющиеся основой для решения многих тематических задач. Для регулирования социально-экономического развития регионов нашей страны актуален дифференцированный проблемно-ресурсный подход к зонированию, что показано на примере в статье [1]. Известны работы по зонированию территорий для лесного и сельского хозяйства, где учитываются факторы сезонности, времени и расстояния для логистики перемещения ресурсов леса, например, работа коллектива авторов [2] для Республики Удмуртия. В ряде работ Лаборатории мониторинга лесных экосистем Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов (ЦЭПЛ РАН) представлен опыт решения задач транспортного моделирования наземного доступа в лесном хозяйстве для ресурсов леса и лесных пожаров [3–6].

Необходимость исследования по разработке методики зонирования лесов на основе инфраструктурных данных связана с тем, что пространственная геометрия существующих зон охраны лесов от лесных пожаров в регионах не всегда отвечает современному уровню развития и динамике изменений инфраструктуры населенных пунктов и дорог. Установлено, что антропогенная пожарная опасность лесов зависит от расположения населенных пунктов и числа жителей в них; распределение пожаров напрямую зависит от того, насколько территория освоена

© Подольская Е. С., Ершов Д. В., Ковганко К. А., 2022

населением [7]. Связям зон охраны лесов и инфраструктурной нагрузки регионов в российской научной литературе по лесному хозяйству уже уделяется определенное внимание. Так, предложения по выделению зон контроля сформулированы в работе [8] и состоят, в частности, в наличии инфраструктуры населенных пунктов и учета плотности дорожно-транспортной сети.

Цель работы состоит в проведении зонирования лесной растительности на примере Красноярского края по критериям инфраструктурной нагрузки путем перехода от существующих зон охраны. Исследователи характеризуют Красноярский край как регион, на территории которого можно проводить широкий спектр научных и опытно-экспериментальных исследований в области лесного хозяйства [9], этому субъекту России посвящен ряд научных статей по лесу, например [10–12]. Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи: выполнить количественные оценки инфраструктурной нагрузки населенных пунктов и дорог на основе современных данных с использованием регулярной сети ячеек; осуществить переход к зонированию территории исследуемого региона по величине инфраструктурной нагрузки; предложить рекомендации по возможному изменению величины инфраструктурной нагрузки для Красноярского края.

Методика и данные для зонирования. Предлагаемая методика зонирования включает последовательное выполнение следующих этапов:

- построение гистограмм распределения инфраструктурной нагрузки по зонам охраны;
- определение групп ячеек «нет инфраструктуры – слабо – средне – большая инфраструктурная нагрузка»;
- разработка рекомендаций по изменению величины инфраструктурной нагрузки.

Анализ инфраструктурных данных выполняется при помощи построенных на основе размера пикселя растра растительности MODIS регулярных сетей ячеек. Ранее авторами [5] подтверждена зависимость количества детектированными спутниковыми методами лесных пожаров (система MODIS) от наличия населенных пунктов и дорожной сети (данные проекта OSM). Для предлагаемого исследования была использована регулярная сетка ячеек с размером 24 км. Исходными материалом для анализа послужил набор данных проекта OSM на территорию Красноярского края по состоянию на конец января 2022 г. Выполнены расчеты количеств и площадей населенных пунктов полигонального типа (согласно классификации OSM: в диапазоне по количеству жителей от «менее 1 000» до «более 100 000» человек); числа участков дорог и их длин (согласно классификации OSM: федерального, регионального, областного, районного и местного значения, а также дороги сельскохозяйственного назначения).

Отправной точкой для зонирования является соотнесение данных по инфраструктуре с имеющимися категориями зон охраны, которыми для

российской лесной практики являются следующие: наземная зона, зона лесоавиационных работ, зона контроля и земли иных категорий охраны, к которым были отнесены все остальные типы зон. Были построены гистограммы распределения инфраструктурной нагрузки по зонам охраны для количеств населенных пунктов и отрезков дорог разных типов в трех зонах охраны для размера ячейки 24 км.

Для перехода от вида групп-графиков к зональному районированию по инфраструктурной нагрузке используется распределение Пуассона, которое является дискретным распределением вероятностей и моделирует вероятность количества событий, происходящих в определенные интервалы. Такое распределение подходит для случая небольшого количества данных (имеющийся набор данных проекта OSM по состоянию на конец января 2022 г.), когда нет полного набора данных по инфраструктуре или есть ограничение по количеству доступных источников данных (только OSM). Для распределения использовались значения средней суммарной площади населенных пунктов по ячейкам.

Заключение и направления будущих исследований. Полученное зонирование может быть использовано для последующей оценки величины горимости по данным местоположения лесных пожаров. Также возможно составление рекомендаций по возможному изменению (уменьшению или увеличению) величины нагрузки.

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем», регистрационный номер НИОКТР 121121600118-8.

Список литературы

1. Губанова Е. С., Клещ В. С. Зонирование как инструмент регулирования социально-экономического развития региона // Проблемы развития территории. 2019. № 5 (103). С. 109–123. DOI: 10.15838/ptd.2019.5.103.7.

2. Сидоренков В. М., Перфильева О. В., Сидоренкова Е. М., Вахрушев К. В., Липкина Т. В., Рыбкин А. С., Рябцев О. В. Зонирование территории Удмуртской Республики по комплексной доступности лесов // Лесохозяйственная информация. 2021. № 4. С. 72–82. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2021.4.05.

3. Подольская Е. С. Обзор опыта решения задач транспортного моделирования в лесном хозяйстве // Вопросы лесной науки. Т. 4. № 4. 2021. С. 1–32. DOI 10.31509/2658-607x-2021-44-92.

4. Подольская Е. С., Ершов Д. В., Ковганко К. А. Транспортное моделирование наземного доступа для борьбы с лесными пожарами на уровне Федеральных округов России // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. Вып. 11. М.: МИИГАиК, 2020. 199 с. / Приложение к журналу Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». С. 154–156.

5. Подольская Е. С., Ершов Д. В., Ковганко К. А. Изучение связей урбанизации и ежегодной горимости лесов Красноярского края // Научные основы устойчивого управления лесами: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН. М.: ЦЭПЛ РАН, 2022. С. 286–288.

6. Podolskaia E. S. Analysis of infrastructural forest data with GIS-tools // Abstr. Int. Cartogr. Assoc., 3, 243, https://doi.org/10.5194/ica-abs-3-243-2021, 2021.

7. Андреев Ю. А. Влияние антропогенных и природных факторов на возникновение пожаров в лесах и населенных пунктах: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.26.03. Москва, 2003. 333 с.

8. Провин К. Н., Рыморев М. В., Савченкова В. А. Оценка факторов, влияющих на установление зоны контроля лесных пожаров на территории субъектов Российской Федерации // Лесное хозяйство. 2021. № 2 (63). С. 106–113.

9. Котельников Р. В., Верховец С. В., Агеев А. А. Красноярский кластер лесной науки – новый этап развития // Лесохоз. информ. : электронный сетевой журнал. 2019. № 3. С. 156–166. http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.13

10. Москальченко С. А., Пономарев Е. И., Иванов А. В. Горимость лесов Красноярского края в современных условиях // Хвойные бореальные зоны. XXXII. 2014. № 1–2. С. 33 – 39.

11. Соколов В. А., Соколова Н. В., Втюрина О. П., Лапин Е. А. Прогноз динамики лесов Красноярского края // Сибирский лесной журнал. 2017. № 4. С. 91–100.

12. Соколов В. А., Втюрина О. П., Соколова Н. В. Лесные ресурсы Красноярского края: перспективы и ограничения использования // Сибирский лесной журнал. 2021. № 4. С. 24–33.

E. S. Podolskaia, D. V. Ershov, K. A. Kovganko

Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (EPF RAS), Moscow, Russia

e-mail: podols_kate@mail.ru

FORESTS ZONING OF KRASNOYARSK TERRITORY BASED ON THE INFRASTRUCTURAL AND FOREST FIRES DATA

Infrastructure data is a basis of research projects in many disciplines, including forestry. Proposed zoning methodology is based on the transition from the levels of protection zones to the infrastructural (or load) zones, determined by the data on the settlements location and road network, OSM project. Methodology was described by its stages; Krasnoyarsk (Krai) Territory was used as an area of interest. Recommendations on the possible changes of infrastructure level could be given as conclusion. For the future research load zones could be used for comparison with the archived forest fire data.

Keywords: infrastructure, road network, settlements, OSM, forest fires, forest protection zones, Krasnoyarsk Krai.

УДК 528.852.8:528.8.044.1

С. Е. Попов[1], Р. Ю. Замараев[2], Л. С. Миков[3]

[1]Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Новосибирск
[2]Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Новосибирск
[3]Младший научный сотрудник, Новосибирск
e-mail: popov@ict.sbras.ru, zamaraev@ict.sbras.ru, mikov@ict.sbras.ru

ОБНАРУЖЕНИЕ ОПОЛЗНЕЙ И ОПОЛЗНЕВЫХ ЗОН НА БОРТАХ КАРЬЕРОВ ПО ДАННЫМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Аннотация. В работе представлен подход к обнаружению состоявшихся оползней и потенциальных оползневых зон на бортах карьеров и отвалов. Подход основан на оценке когерентности изменений высот рельефа. В зависимости от цели используются короткие и длинные серии спутниковых радарных данных. Для обнаружения состоявшихся оползней используется метод некогерентных изменений. Для определения потенциальных оползневых зон участки-пиксели после определения высот методом постоянных отражателей классифицируются по характеру изменений на продолжительных интервалах наблюдения. Каждый класс участков связывается с собственным средним значением когерентности, которое рассматривается как оценка подвижности. Группы участков-пикселей, подвижность которых не связана с антропогенным воздействием, считаются потенциально опасными оползневыми зонами. Преимущество подхода заключается в возможности мониторинга как быстрых катастрофических изменений, так и длительных процессов формирования опасных зон. Также использование радарных данных снижает стоимость мониторинга и его зависимость от погодных условий по сравнению с аналогичными по целям методами с использованием мультиспектральных снимков. Подход иллюстрируется на примере обвала в 2020 г. на участке «Колыванский» компании «Сибантрацит» Новосибирской области.

Ключевые слова: смещения земной поверхности, радарная интерферометрия, метод некогерентных изменений, Sentinel-1, карьеры и отвалы, мониторинг оползней.

Общемировая тенденция к увеличению масштабов горных работ привела к образованию протяженных искусственных геологических образований с большими перепадами высот типа бортов карьеров и отвалов. Они характеризуются нестабильным геомеханическим состоянием и интенсивными эрозионными процессами, что приводит к обвалам и оползням. Последние являются причиной аварийных и катастрофических ситуаций, несут угрозу жизни и здоровью людей, экологии, инфраструктуре и оборудованию предприятий.

Поэтому актуальной становится задача мониторинга протяженных бортов карьеров и отвалов с целью раннего обнаружения оползневых зон и фактического обнаружения уже состоявшихся оползней с целью планирования предупредительных, спасательных и восстановительных мероприятий.

© Попов С. Е., Замараев Р. Ю., Миков Л. С., 2022

Причины, приводящие к оползням разнообразны. Это может быть подмывание основание борта донными водами, размывание борта стокам поверхностных вод, ветро-дождевая эрозия, изменение формы (оседание) борта под собственным весом, антропогенные и природные сейсмические воздействия.

Поскольку процессы формирования и схода оползней, как правило, сопровождаются значимыми деформациями земной поверхности, то появляются основания для использования спутниковых радиолокационных данных (снимков). Преимущество использования радарных снимков заключается в относительно небольшой цене за квадратный километр, а также слабая зависимость качества съемки от погодных условий и времени суток.

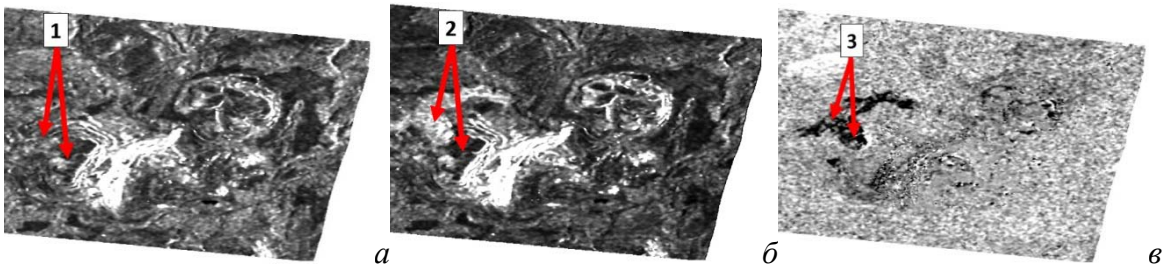


Рис. 1. Изображения исследуемой области (Sentinel-1 GRD) со значениями показателей обратного рассеяния: *а* – до события (16.07.2020); *б* – после события (19.07.2020); *в* – результирующее изображения с некогерентным изменением

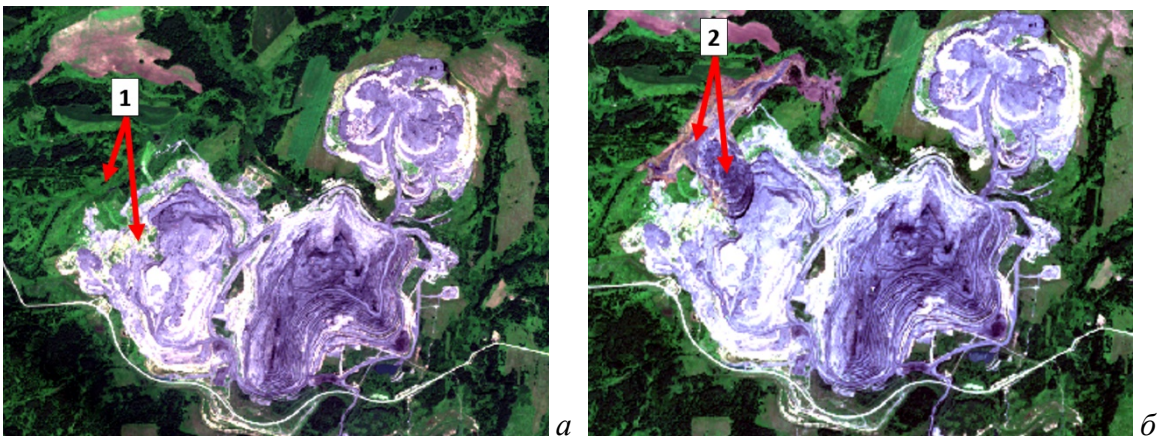


Рис. 2. Изображения исследуемой области (Sentinel-2, фильтр RGB): *а* – до события (16.07.2020); *б* – после события (19.07.2020)

Для обнаружения оползней используется метод некогерентных изменений (Incoherent Change Detection) [1]. Он направлен на выявление изменение интенсивности обратного рассеяния интерферометрической сцены. В качестве оценки изменений используется логарифм отношения интенсивностей пикселей главного и подчиненного изображений.

В результате можно получить географически привязанное изображение некогеренетных изменений в любой удобной цветовой схеме.

На рис. 1, *в* такое изображение показывает интенсивность некогерентных изменений в градациях серого – чем темнее, тем выше интенсивность.

На примере участка «Колыванский» компании «Сибантрацит» около с. Елбаши Искитимского района Новосибирской области показана реализация предлагаемого метода. Здесь 18 июля 2020 г. в северо-западной части участка произошёл сход пустой породы в водоём для технических нужд с существенным изменение геометрии борта.

Для примера использована пара радиолокационных снимков с космического аппарата Sentinel-1, тип GRD (Ground Range Detected), вертикальной поляризацией, IW – полосой съемки, и с нисходящей орбитой, пространственным разрешением 20×22 м., датами съемки 16.07.2020 и 28.07.2020. Корректность определения места обвала показана на рис. 2, где представлены мультиспектральные изображения с RGB-фильтром той же местности и за те же даты со спутника Sentinel-2.

Очевидно, что эрозионные и деформационный процессы на борту карьера в зоне обвала развивались в течении длительного времени. Для поиска таких потенциальных оползневых зон вводится понятие подвижности участка и предлагается схема обработки и анализа данных для ее оценки.

Прежде всего производится обработка радарных данных методом постоянных отражателей (Persistent Scatters – PS) [2], чтобы получить значения высот и когерентности участков (пикселей). Далее из обработанных данных извлекаются и нормализуются высоты участков как упорядоченные по датам вектора значений. Итогом является таблица данных, где участки рассматриваются как объекты, а даты – как признаки. Затем производится классификация участков методом k-средних (k-means) по оптимизированной схеме [3], что позволяет разделить множество участков на кластеры по подобию профилей изменения высот во времени. Предполагается, что стабильные участки совершают некоторое единообразное вертикальное движение, подчиняясь только региональной геодинамике и сезонным температурным деформациям. В свою очередь, нестабильные участки подвергаются дополнительно антропогенным воздействиям, локальными эрозиями и деформациями. Для всех участков в каждом кластере устанавливается единое значение когерентности равное среднему по кластеру. Это значение принимается как оценка подвижности участка – чем меньше когерентность, тем участок подвижнее.

Результатом является массив координат центроидов участков и соответствующие кластеру участка значения когерентности, которые можно отобразить на карте в удобной цветовой схеме.

На примере того же события на карьере компании «Сибантрацит» показана оценка подвижности участков (рис. 3). Использовалась длинная серия из 15 радарных снимков с 11.01.2020 по 09.07.2020 с теми же параметрами съемки.

Северо-восточный сектор карьера показывает пример правильной структуры бортов: проявилась внутренняя зона карьера, где идет

интенсивное искусственное перемещение горной массы (желтый цвет); проявилась полоса стабильных участков, представляющих расчищенный и уплотненный верхний обрез борта (сиреневый цвет).

Место обвала отмечено на изображении маркерами 1-2. Здесь видно, что протяженный фрагмент борта не имеет защитной стены из стабильных участков и выходит непосредственно на неподготовленную местность. Он находился в подвижном состоянии минимум полгода и, видимо, дополнительные факторы привели в итоге к обрушению.

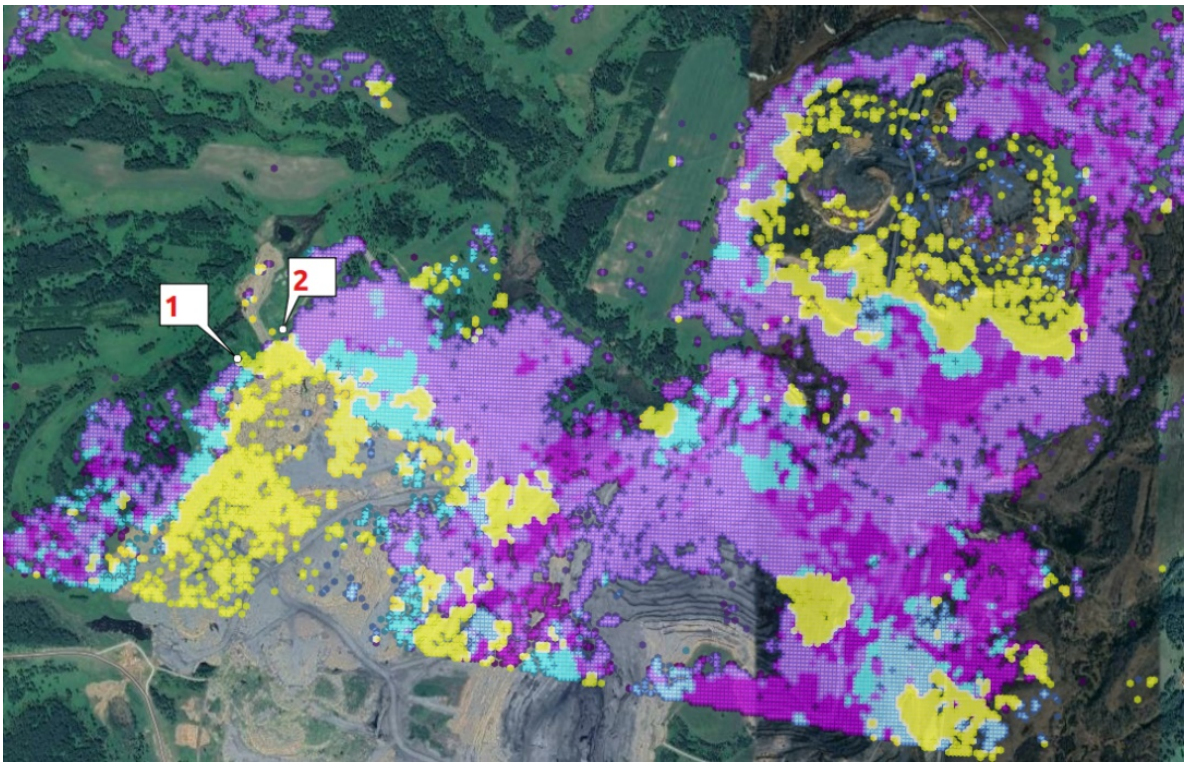


Рис. 3. Классы подвижности участков на подложке Google Satellite
от стабильных (сиреневый) до нестабильных (желтый)

Следовательно, имея план горных работ по результатам мониторинга можно разделить подвижные участки карьера на эксплуатируемые и выведенные из эксплуатации. А последние подвергнуть обследованию с поиском дополнительных факторов обвалопасности – эрозия, подмывание и другое, и принять необходимые организационно-технические меры.

Таким образом, предлагаются два связанных решения для мониторинга состоявшихся оползней и оползневых зон на протяженных бортах карьеров и отвалов. Оба решения используют одни и те же данные. В зависимости от их объема и регулярности можно ограничиться только мониторингом быстрых изменений поверхности, либо осуществлять регулярный мониторинг опасных зон.

Практическая значимость предлагаемых решений заключается в наглядности представлений и слабой зависимости от погодных условий (облачности) в отличие от аналогичных по целям методов на основе оптических и мультиспектральных изображений.

Список литературы

1. Li L., Ma H., Jia, Z. Change Detection from SAR Images Based on Convolutional Neural Networks Guided by Saliency Enhancement // Remote Sens. 2021. 13. Pp. 3697–3717. doi: 10.3390/ rs13183697.

2. Crosetto M., Monserrat O., Devanthery N., Cuevas-Gonzalez M., Barra A., Crippa B. Persistent Scatterer Interferometry Using SENTINEL-1 Data // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - 2006. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/c57c/40527cc412d4a2bedfa0717a822802e8e171.pdf.

3. Sinaga K. P., Yang M. Unsupervised K-Means Clustering Algorithm // IEEE Access. 2020. 8. Pp. 80716–80727. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988796.

S. E. Popov, R. Y. Zamaraev, L. S. Mikov

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia

e-mail: popov@ict.sbras.ru, zamaraev@ict.sbras.ru, mikov@ict.sbras.ru

THE LANDSLIDES AND LANDSLIDE ZONES DETECTION ON A QUARRIES SIDES WITH INTERFEROMETRIC RADAR DATA

The paper presents an approach to the detection of landslides and potential landslide zones on the sides of quarries and dumps. The approach is based on the assessment of the coherence of relief changes. Depending on the target, short and long series of satellite radar data are used. To found potential landslide zones all pixel after determining their heights by the persistent scatter method are classified by height variation types over long observation intervals. All classes are binding with its own average coherence value, which is considered as an estimate of stability. Groups of pixels whose stability is not related to anthropogenic impacts are considered as potentially dangerous landslide zones. The advantage of the approach is the ability to monitor both rapid catastrophic changes and long-term processes of formation of hazardous zones. The use of radar data reduces the dependence on weather conditions for monitoring compared to methods using multispectral images that similar in purpose. The approach is illustrated by the example of the collapse in 2020 at “Sibantracite” company in the Novosibirsk region.

Keywords: earth surface displacements, radar interferometry, incoherent change method, Sentinel-1, quarries and dumps, landslide detection.

Correspond to: zamaraev@ict.sbras.ru

УДК 581.1

Д. А. Романов[1], И. В. Рябинин[2]

[1]Инженер, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия
[2]Аспирант, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия
e-mail: zzzromanovzzz@mail.ru, cgsiena@gmail.com

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ШТАМБЕ ДЕРЕВА

Аннотация. Важными характеристиками, оказывающими влияние на протекающие в живом дереве физиологические процессы, являются температура и влага. Разработка автоматических устройств для непрерывного мониторинга температуры и влажности стволов деревьев позволяет осуществить диагностику не только жизнеспособности древесных растений, но и состояния лесных экосистем. Целью работы является изучение суточных вариаций температуры и влажности древесины в стволе дерева на примере породы Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris) в весенне-летний период 2022 г.

Ключевые слова: дерево, штамб, температура, влажность древесины, суточная динамика.

Введение

Важными характеристиками, оказывающими влияние на протекающие в живом дереве физиологические процессы, являются температура и влага. В работах [1, 2] изучена возможность оценки физиологического состояния по температурным параметрам.

Различные нарушения, возникающие в дереве на протяжении всего жизненного цикла, тесно связаны с водным режимом и температурой стволов [3, 4]. Оценка взаимосвязи между состоянием деревьев, их водным и температурным режимом слабо изучена.

Разработка автоматических устройств для непрерывного мониторинга температуры и влажности стволов деревьев позволяет осуществить диагностику не только жизнеспособности древесных растений, но и состояния лесных экосистем.

В статье исследованы сезонные вариации температуры и влажности в штамбе дерева. Обращено внимание на проблему получения количественных показателей и оценку информативности температуры и влажности древесины.

Объект исследования и методика измерений

Объектом исследования является Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris). Высота исследуемого дерева 19.2 м, диаметр ствола на высоте груди 0.6 м, географические координаты 53.2762 с.ш, 83.7482 в.д. Измерение температуры и влажности древесины проводилось в точках,

© Romanov D. A., Ryabinin I. V., 2022

обращенных к северу и защищенных от прямого солнечного света на высоте 1.5 м от поверхности земли.

Для измерения температуры в стволе дерева использовалась текстолитовая планка длиной 25 см, на которой расположены температурные датчики TMP1075, размещенные на расстоянии 5 см друг от друга. В стволе дерева датчики размещались таким образом, чтобы крайний датчик, предназначенный для измерения температуры окружающей среды, был вне ствола дерева. Полученные данные считывались платой Arduino и записывались на флэш-карту.

Для измерения влажности древесины применялся датчик емкостного типа серии SEN0193. Датчики емкостного типа расположены в камбиальном слое и в древесине углубленный на 8 см от поверхности дерева. Платформа Arduino использовалась для программирования микроконтроллера при считывании аналогового сигнала от емкостного датчика, выраженного в единицах напряжения. Установлена обратная линейная зависимость напряжения от объемной влажности (W [см^3/см^3]) в древесине, определенной гравиметрическим методом. В качестве образцов использовались срезы веток дерева размером 4×10 см. Массу образцов измеряли на электронных лабораторных весах SF-400D. Высушивание производили в сушильном шкафу 2В-151.

Результаты исследований и обсуждение

На рис. 1 приведена суточная динамика t_0 (на поверхности дерева), t_{20} (в стволе дерева на глубине r = 20 см), W_1 (в древесине), W_2 (в камбиальном слое). Сравнительный анализ результатов измерений t_0 и t_{20} показывает, что зависимости $t_0(J)$ и $t_{20}(J)$ отличаются, и при этом имеют циклический характер. Значение J представляет собой порядковый номер измерения с периодичностью 20 минут с начала наблюдений. Также видно, что максимальное/минимальное суточные значения t_0 соответствуют минимальным/максимальным значениям t_{20}.

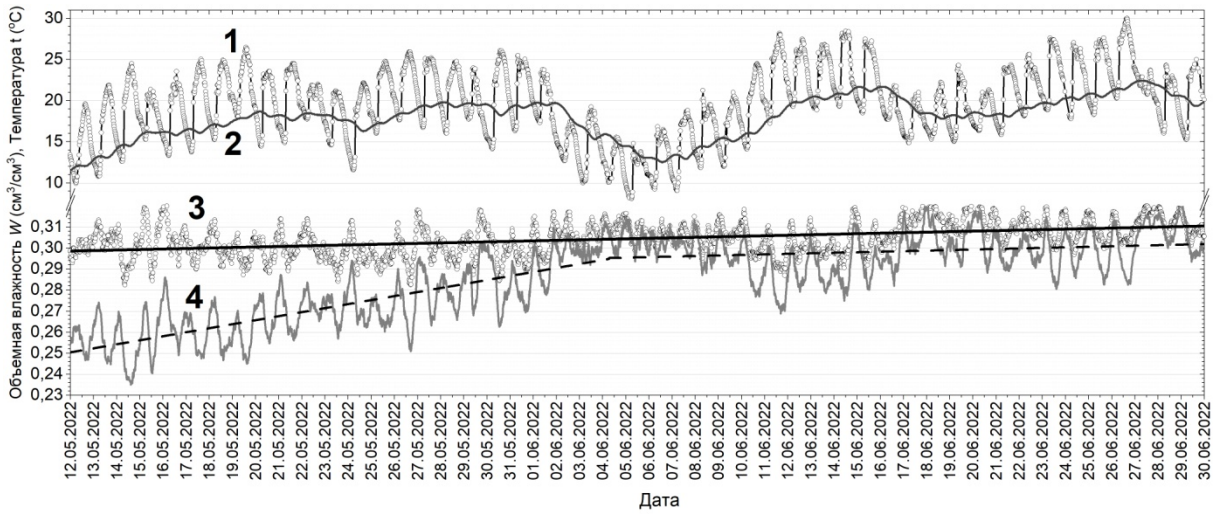


Рис. 1. Суточные вариации t_0(1), t_{20}(2), W_1(3), W_2(4) в весенне-летний период

Динамика W в камбиальном слое и в самой древесине также отличается. Видно, что W_1 за исследуемый временной промежуток находилась в диапазоне от 0,28 до 0,33 см^3/см^3. Рассчитанный из экспериментальных данных тренд $W_1(N)$, где N – порядковый номер измерения с начала наблюдений, описывается линейной зависимостью, имеющей следующий вид:

$$W_1 = 0{,}29838 + 3{,}3776 \times 10^{-6} \times N,\ \sigma = 0{,}22,$$

указывающий на незначительное повышение W_1 за исследуемый период.

Величина W_2 изменялась от 0,23 до 0,33 см^3/см^3. Видно, что с начала измерений (12 мая) и до 4 июня показания между датчиками заметно различаются. Данный промежуток был аппроксимирован линейной зависимостью следующего вида:

$$W_2 = 0{,}24911 + 2{,}65931 \times 10^{-5} \times \mathrm{N},\ \sigma = 0{,}63.$$

Подобное поведение зависимостей $W(N)$ может быть связано с характеристиками вегетационного периода.

Обращает на себя внимание уменьшение амплитуды суточных изменений W в начале июня. Это может быть связано с погодными условиями, в частности, с уменьшением дневных и ночных температур.

Второй промежуток W_2 описывается линейной зависимостью следующего вида:

$$W_2 = 0{,}2891 + 3{,}57125 \times 10^{-6} \times \mathrm{N},\ \sigma = 0{,}037.$$

Видно соответствие трендов W_1 и W_2 за период с 4 по 30 июня.

В течение наблюдаемого периода была зафиксирована разность фаз циклических колебаний W_2 и t_0. Для примера на рис. 2 приведены результаты динамики суточных изменений W_2 и t_0 с 26 по 28 июня.

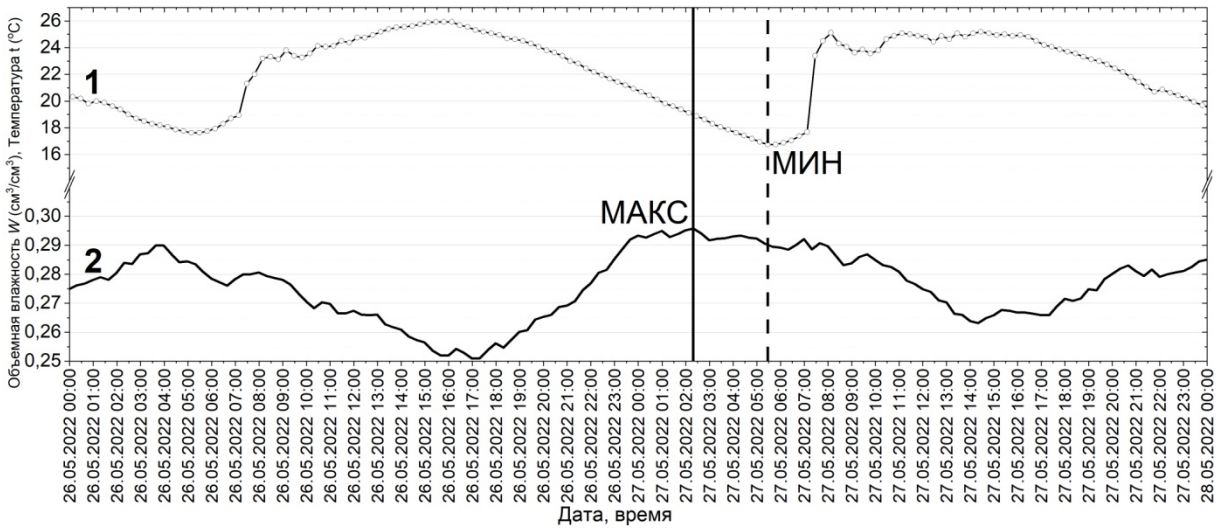


Рис. 2. Суточные колебания t_0(1) и W_2(2)

Суточный ход W_2 реагирует раньше, чем суточный ход t_0. При этом видно, что величина запаздывания между колебаниями t_0 и W_2 в разное время суток различается. Запаздывание по времени может достигать до 7 часов. Сплошной вертикальной линией отмечено максимальное суточное значение W_2, пунктирной линией минимальное суточное значение t_0.

Подобное поведение может быть связано с различной суточной динамикой температуры окружающей среды, оказывающей влияние на распределение температуры в стволе и движение влаги внутри дерева.

Заключение

Результаты исследований суточной динамики температуры и влажности указывают на существующую связь между t_0 и W_2. Выявлен циклический характер суточной динамики t_0 и t_{20}. Установлено запаздывание суточных колебаний t_0 и W_2.

Полученные данные могут быть использованы при разработке методов оценки физиологического состояния дерева.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-20041, https://rscf.ru/project/22-17-20041/.

Список литературы

1. Бусыгин Г. В., Карасев В. Н., Карасева М. А. Диагностика жизнеспособности деревьев по температурным параметрам // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 12. С. 9–11.

2. Карасев В. Н., Карасева М. А. Эколого-физиологическая диагностика жизнеспособности деревьев хвойных пород // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2004. № 4. С. 27–33.

3. Карасев В. Н., Карасева М. А., Мухортов Д. И. Диагностика физиологического состояния хвойных видов по биоэлектрическим и температурным показателям // Лесоведение. 2020. № 2. С. 162–174.

4. Ларикова Ю. С., Кондратьев М. Н. Физиология древесных растений. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2015. 346 с.

D. A. Romanov[1], I. V. Ryabinin[2]

[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
[2]Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia
e-mail: zzzromanovzzz@mail.ru, cgsiena@gmail.com

SOME FEATURES OF SEASONAL TEMPERATURE VARIATIONS IN THE TRUNK OF A TREE

Temperature and moisture are important factors influencing the physiological processes occurring in a living tree. The development of automatic devices for continuous monitoring of temperature and humidity of tree trunks makes it possible to diagnose not only the viability of woody plants, but also the state of forest ecosystems. The aim of the work is to study the daily variations in temperature and moisture content of wood in a tree trunk using the example of the Scotch pine (Pinus sylvestris) species in the spring-summer period of 2022.

Keywords: tree, trunk, temperature, wood moisture, daily dynamics.

УДК 004.41

А. Ж. Саринова

Кандидат технических наук, Astana IT University, Нур-султан, Казахстан
e-mail: assiya_prog@mail.ru

ОБРАБОТКА И КОДИРОВАНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Аннотация. В статье рассмотрена задача по распределению больших объемов передаваемых аэрокосмических данных по каналам связи с космических аппаратов на наземные станции и для дальнейших процессов архивирования, каталогизации, обработки, классификации и использования в прикладных задачах сельского хозяйства, военной технике, мониторинга земель. Предлагаемая модификация алгоритма сжатия без потерь с учетом междиапазонной корреляции и регрессионным анализом позволит повысить степень сжатия более чем в три раза по сравнению с использованием универсальных архиваторов, специализированных систем и аналогов на основе вышеприведенного литературного анализа источников в мире.

Ключевые слова: алгоритм сжатия, аппаратная реализация, степень сжатия, программируемые контроллеры, обработка изображений, гиперспектральные изображения

Введение. Космическая отрасль является наиболее наукоёмкой сферой деятельности государства. Для обеспечения научных исследовании необходимо наличие инструментов и механизмов позволяющих оперативно оценивать потенциал научных исследовании, которая является стратегически важной государственной задачей. В космической отрасли наиболее актуальными задачами являются те, которые требуют применения программных систем поддержки принятия решений.

Акционерное общество «Национальная компания «Қазақстан Ғарыш Сапары» Республики Казахстан обеспечивает привлечение заказов и распределение их по ее дочерним и зависимым организациям, созданным по продуктовым направлениям и функциям: проектирование, сборка и испытание космических аппаратов и компонентов космической техники; эксплуатация ДЗЗ и предоставление данных ДЗЗ; эксплуатация наземной инфраструктуры системы высокоточной спутниковой навигации, предоставление навигационных услуг. Также в производственных задачах организации стоит актуальная задача по распределению больших объемов передаваемых аэрокосмических данных по каналам связи с космических аппаратов на наземные станции и для дальнейших процессов архивирования, каталогизации, обработки, классификации и использования в прикладных задачах сельского хозяйства, военной технике, мониторинга земель и др.

© Саринова А. Ж., 2022

В настоящее время разработка программных систем передачи таких данных является актуальной задачей. В решении данной задачи существуют два направления исследования: разработка алгоритмов архивирования и каталогизации, используемых в наземных центрах приёма и обработки данных ДЗЗ; применяемых на борту космических аппаратов. Во втором направлении исследования имеется потенциал для разработки алгоритмов, диктуемый необходимым перечнем проблем для решения задачи сжатия.

В настоящий момент существуют и используются для сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений известные алгоритмы, на основе усечённого блочного кодирования, дифференциально-импульсной модуляции, дискретно-косинусного преобразования, дискретное вейвлет-преобразование и др. Данные алгоритмы на борту космических аппаратов, требующие больших вычислительных ресурсов не всегда удовлетворяют вышеперечисленным требованиям к сжатию. Поэтому требуется разработка новых методов сжатия / архивирования и каталогизации гиперспектральных аэрокосмических изображений, не уступающих по своей эффективности известным методам, но требующие меньших вычислительных ресурсов.

С 2015 г. действует космическая система дистанционного зондирования Земли Республики Казахстан (КС ДЗЗ РК) в составе двух космических аппаратов «KazEOSat-1» и «KazEOSat-2». КС ДЗЗ включает в себя два оптико-электронных космических аппарата (КА): высокого пространственного разрешения (1 м) «KazEOSat-1», среднего пространственного разрешения (6,5 м) «KazEOSat-2», а также наземный комплекс управления спутниками и наземный целевой комплекс для приема, обработки и распространения данных ДЗЗ конечным потребителям.

Таким образом, данные ДЗЗ передаются на наземные станции приёма и передачи аэрокосмической информации с различных космических аппаратов ДЗЗ. Космические аппараты предназначены для решения широкого класса задач аэрокосмического мониторинга. Одной из важных задач является архивирование и каталогизации принимаемых аэрокосмических данных.

На современном этапе по результатам предварительных исследований выявлено, что существуют и используются для сжатия гиперспектральных АИ известные алгоритмы на основе усечённого блочного кодирования, дифференциально-импульсной модуляции, дискретно-косинусного преобразования, дискретного вейвлет-преобразования [1–5]. Данные алгоритмы, разработанные для применения на борту космического аппарата, требующие больших вычислительных ресурсов, не всегда удовлетворяют вышеперечисленным требованиям к сжатию.

Исследователи в [3] предложили алгоритм управления скоростью для прогнозирования кодирование гиперспектральных изображений на

борту космических аппаратов и тестирование его путем интеграции в расширение CCSD с потерями рекомендация. Предлагаемый алгоритм теряет некоторую гибкость с точки зрения пространственной модуляции размеров шага квантования, но он на порядки быстрее, что обеспечивает более простые и высокопроизводительные реализации. Целью работы является разработка упрощенной версии вариационного автокодера, предложенного, для удовлетворения встроенных ограничений с точки зрения сложности при сохранении высокой производительности с точки зрения искажения скорости. Таким образом, сложная гиперприорная модель, основанная на непараметрическом распределении, может быть заменена более простой параметрической центрированной моделью Лапласа и другими алгоритмами преобразования перед сжатием. Представленные экспериментальные результаты демонстрируют, что с точки зрения вычислительных требований по сравнению с другими методами высокая вычислительная сложность.

Такой подход вызвал потребность в большем количестве бортовых ресурсов хранения, главным образом, конечно, из-за больших объёмов данных, собираемых системами ДЗЗ. Как следствие, эти объёмы данных требуют значительного времени связи для передачи их на наземные комплексы приёма и обработки данных. Из-за ограниченного времени видимости спутника, ограничений пропускной способности линии для завершения передачи изображений, хранящихся на борту, может потребоваться более одного сеанса связи. Всё это и является причинами разработки систем для бортового сжатия изображений.

Предлагаемая методика разработки алгоритмов. Для проверки уже имеющихся разработанных алгоритмов на первом этапе в качестве тестируемой программируемой интегральной схемы может быть выбрана программируемая логическая интегральная схема фирмы Xilinx и программное обеспечение (Integrated Synthesis Environment со встроенным языком С подобных языков программирования. Одними из последних процессоров для встраиваемых систем, являются процессоры, основанные на архитектуре FPGA (Field Programmable Gate Array – программируемый полем массив вентилей). Эти процессоры предназначены также и для использования в цифровой обработке сигналов.

Преимущества использования:

Важные особенности программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Xilinx:

- достаточый объём ресурсов – до 10 млн системных вентилей на кристалл для обработки и сжатия гиперспектральных данных;
- высокая производительность с системными частотами до 420 МГц,
- технологические нормы – до 0.12 мкм при восьми слоях металлизации,
- высокая гибкость архитектуры с множеством системных особенностей: внутреннее распределение и блочное ОЗУ;
- возможность инициализации и верификации через порт JTAG;

- возможность программирования в системе;

- низкое энергопотребление, что значительно влияет на низкую стоимость;

- короткий цикл проектирования и быстрое время компиляции, необходимое для процесса сжатия больших данных;

На основе проведенного обзора современных исследований [1–6] в области сжатия/архивирования и каталогизации аэрокосмических изображений можно сделать вывод, что необходима доработка в части исследования коэффициентов сжатия, повышения качества восстановленных изображений и адаптации алгоритмов сжатия под любые космические системы бортовых компьютеров и летательных аппаратов.

Предлагается следующая последовательность этапов обработки и алгоритма сжатия аппаратной реализации:

- расчет величины корреляции между всеми парами каналами АИ и определение последовательности кодирования и декодирования каналов;
- регрессионный алгоритм преобразования поканально и группами каналов с высокой пространственной и временной корреляцией;
- получение разностей каналов и их поблочное преобразование;
- сжатие статистическим алгоритмом.

1 шаг. Подсчитаем значения корреляционной матрицы между всеми парами каналов АИ, выявив при этом наиболее коррелированные группы пар каналов. На основе матрицы сформируем и определим последовательность преобразования (кодирования) и обратного преобразования методом построения сильноветвлявощегося дерева.

2 шаг. Регрессионный анализ на основе шага 1. Произведем подсчёт коэффициентов линейной регрессии между значениями порождающего и регрессируемых каналов гиперспектрального АИ путем создания оптимальных значений для формирования массивов разностей между master и slave.

3 шаг. Сжатие статистическим алгоритмом Хаффмана.

Заключение. Суть модификации состоит в подсчёте коэффициентов линейной регрессии между значениями порождающего канала (master) и регрессируемых каналов (slave, сжимаемых) ГИ путем формирования массивов разностей между master и slave. При использовании бортового компьютера с различными вычислительными возможностями модификация алгоритма будет использовать различное число потоков, соответствующее числу имеющихся ядер процессора. Предлагаемая модификация алгоритма сжатия без потерь с учетом междиапазонной корреляции и регрессионным анализом позволит повысить степень сжатия более чем в три раза по сравнению с использованием универсальных архиваторов, специализированных систем и аналогов на основе вышеприведенного литературного анализа источников в мире. Предлагаемый алгоритм нахождения наилучших групп каналов при заданном значении корреляции повысит эффективность применения этапа

вычитания каналов (разностного преобразования). Опишем этапы регрессивного метода сжатия *аэрокосмических изображений*.

Список литературы

1. Гашников М. В., Глумов Н. И. Бортовая обработка гиперспектральных данных в системах дистанционного зондирования Земли на основе иерархической компрессии // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 4. С. 543–551.
2. Иванов А. П., Апанасович В. В. Оптимизация алгоритма сжатия изображений jpeg2000 для космических систем наблюдения сканирующего типа // Космическая техника и технологии. 2018. № 2(21). С. 106–114.
3. Kumar S., Chaudhuri S., Banerjee B., Ali F. Onboard Hyperspectral Image Compression using Compressed Sensing and Deep Learning // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops. 2018. Pp. 1–13.
4. Саринова А. Ж., Замятин А. В. Алгоритм сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с использованием математической обработки и учетом междиапазонной корреляции // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV Междунар. науч. конф. Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. Красноярск, 2017. С. 157–160.
5. Саринова А. Ж., Замятин А. В. Алгоритмы сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений на основе дискретных преобразований // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы V Междунар. науч. конф. Красноярск, 11–14 сентября 2018 г. Красноярск, 2018. С. 203–206.

A. Zh. Sarinova

PhD, Astana IT University, Nur-sultan, Kazakhstan
e-mail: assiya_prog@mail.ru

PROCESSING AND CODING OF AEROSPACE IMAGES ON BOARD THE SPACECRAFT

Annotation. The article considers the task of distributing large volumes of transmitted aerospace data via communication channels from spacecraft to ground stations and for further processes of archiving, cataloging, processing, classification and use in applied tasks of agriculture, military equipment, land monitoring. The proposed modification of the lossless compression algorithm, taking into account inter-band correlation and regression analysis, will increase the compression ratio by more than three times compared with the use of universal archivers, specialized systems and analogues based on the above-mentioned literary analysis of sources in the world.

Keywords: compression algorithm, hardware implementation, compression ratio, programmable controllers, image processing, hyperspectral images.

УДК 528.8

В. О. Скрипачев

МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия
e-mail: skripatchevv@inbox.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА 14 ЯНВАРЯ 2022 ГОДА

Аннотация. В работе кратко рассмотрена классификация извержений вулканов. На примере извержения вулкана Тонга, произошедшего 14 января 2022 г., показаны результаты обработки данных отечественного пассивного СВЧ радиометра МТВЗА в части профилей радиояркостной температуры. Выявлены аномалии в профилях радиояркостной температуры, что вероятно обусловлено наличием аэрозоля в атмосфере. Приведены результаты обработки данных, зарегистрированных на высоте полета КА из состава системы DMSP (США). Выявлены аномалии в концентрации ионов и электронной концентрации, а также температуры электронов. Отмечены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: извержение вулкана, обработка данных, СВЧ-радиометр, концентрация электронов, ионосфера, атмосфера.

Введение

Одним из наиболее опасных природообусловленных явлений признана вулканическая деятельность, сопровождающаяся выбросом выбросом пепла и вредных газов. Повышенная вулканическая деятельность свидетельствует о тектонической активности и, как следствии, угрозе разрушительных землетрясений и цунами. Исследование, в частности, вулканической деятельности предполагает развитие методов и технических средств мониторинга окружающей среды в части своевременного выявления наземных, атмосферных и ионосферных явлений, выступающих в качестве признаков роста вулканической активности.

Применяемые спутниковые данные и методики их обработки

Причины извержений и их механизмы весьма различны. Извержения вулканов эффузивного типа характеризуются излиянием жидкой или преимущественно жидкой лавы, бедной или относительно богатой газами. Экструзивными извержения характеризуются выжиманием полупластичной или почти твердой лавы, также сопровождающейся бедными или обильными выделениями газов. Эксплозивные извержения отличаются мощными или умеренными взрывами с выбрасыванием газов или паров воды, лавы, обломков и глыб.

Произошедшее 14 января 2022 г. извержение подводного вулкана Тонга отнесено к эксплозивному типу извержений. Известно, что извержения вулканов создают возмущения в атмосфере посредством акустико-гравитационных волн (АГВ). Поскольку плотность атмосферы

© Скрипачев В. О., 2022

существенно уменьшается с высотой, то АГВ усиливаются, при их проникновении выше в верхнюю атмосферу и ионосферу, где формируются ионосферные неоднородности [1]. Диагностика состояния атмосферы и ионосферы проводится как наземными, так и спутниковыми методами. Использование спутниковых измерений обеспечивает потребителей достаточной глобальностью [2]. Существуют различные космические аппараты (КА), которые в составе бортовой научной аппаратуры имеют средства наблюдения за состоянием параметров атмосферы и ионосферы.

В частности КА «Метеор-М» № 2 в составе бортовой научной аппаратуры (БНА) имеет СВЧ-радиометра МТВЗА, позволяющий получать значения радиояркостных температур в различных частотных каналах. На рис. 1 приведены результаты построения профилей радиояркостной температуры по данным СВЧ-радиометра МТВЗА.

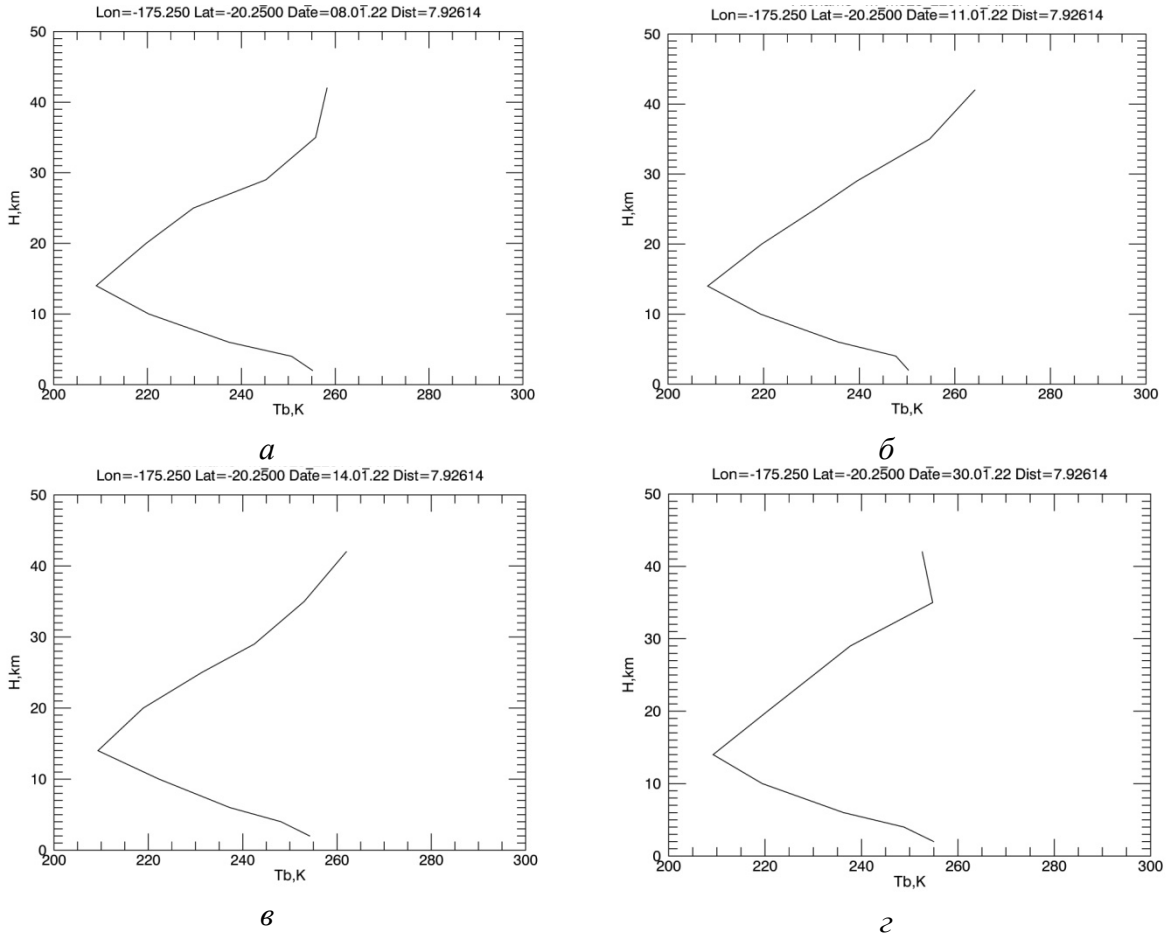


Рис.1. Профили радиояркостных температур 08.01.22 (*а*), 11.01.22 (*б*), 14.01.22 (*в*), 30.01.22 (*г*)

Как видно из рис. 1, имеют место некоторые колебания радиояркостных температур от 8.01.22 к 11.02.22 и далее к дате извержения 14.01.22 на высотах выше 25 км. Отдельно следует отметить, что на профиле, построенном для даты 30.01.22, происходит «перегиб» на высотах свыше 35 км. Вероятно наличие существенной концентрации аэрозоля в стратосфере (до 50 км), что и оказало влияние на

радиояркостные температуры. По данным NIWA Taihoro Nukirangi (Новая Зеландия) с момента извержения вулкана происходил рост концентрации стратосферного вулканического аэрозоля, который привел к локальному пику концентрации на широте вулкана примерно 29 января 2022 г. [3].

Для исследования ионосферного отклика на извержение вулкана использовались данные орбитальной группировки метеорологических КА DMSP, обладающих следующими основными характеристиками: высота орбиты 840 км; солнечно-синхронная орбита, наклонение орбиты – 98,8°. В состав бортовой научной аппаратуры КА серии DMSP входит монитор ионосферной плазмы (SSIES), измеряющий плотность и температуру плазмы на высоте орбиты КА, а также концентрацию трёх видов ионов: водород, гелий, кислород. Для обработки данных использовался алгоритм, приведенный в работе [4], основу которого составляет расчет границ доверительных интервалов на основе среднесуточных значений. По результатам работы алгоритма построены зависимости концентрации ионов гелия и водорода, температуры электронов, концентрации ионов кислорода, концентрации электронов, приведенные на рис. 2.

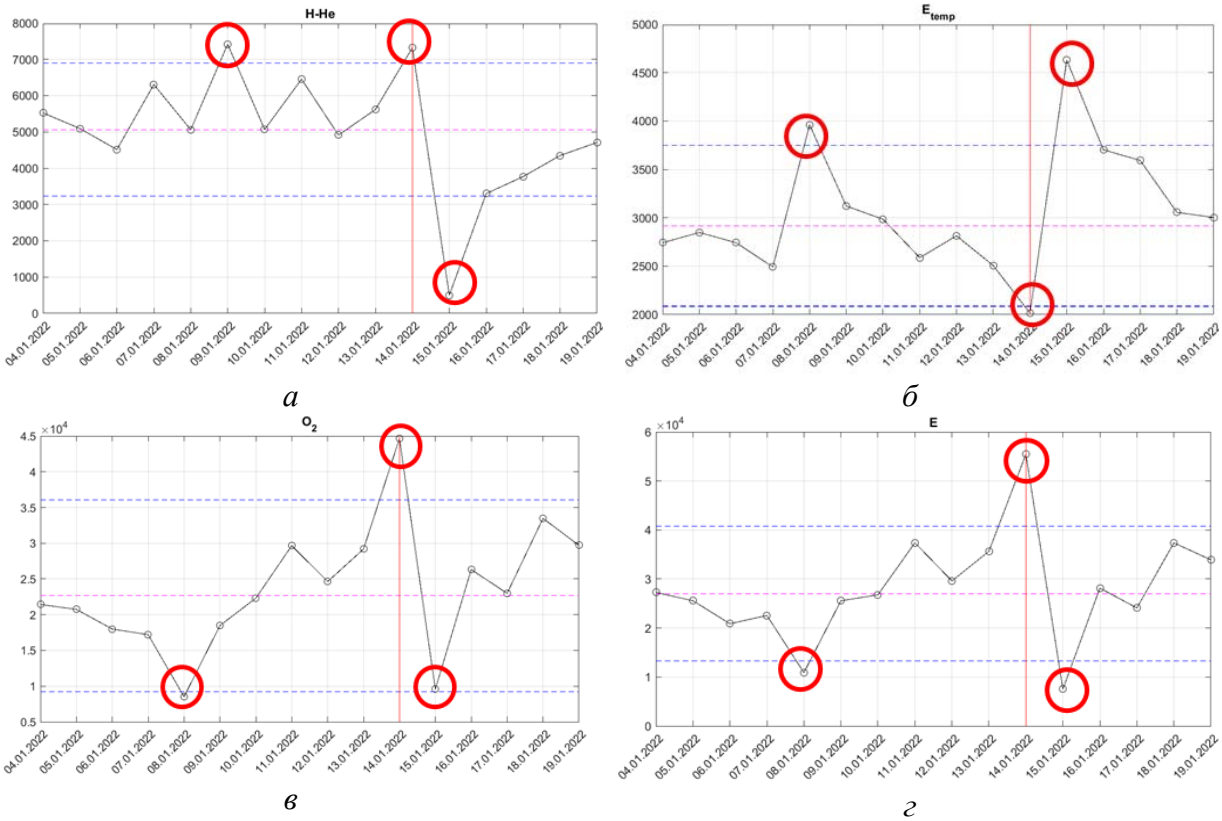


Рис. 2. Результаты обработки данных КА DMSP: *а* – концентрация ионов гелия и водорода; *б* – температура электронов; *в* – концентрация ионов кислорода; *г* – концентрация электронов

Таким образом, на приведенных графиках видно, что изменения концентрации гелия и водорода дважды выходят за границы рассчитанного интервала, в том числе в сутки извержения. В течение суток после извержения наблюдается резкое падение значений концентраций, при этом величина концентрации также выходит за границу интервала, но

противоположную. Аналогичные результаты получены для значений концентрации ионов кислорода и концентрации электронов в течение суток извержения и на следующие сутки. Противоположный эффект наблюдается для температуры электронов.

Заключение

Приведенные результаты обработки показали возможность выявления эффектов, вызванных извержением вулкана. Необходимо продолжение исследований с привлечением непрерывных данных наблюдений на более длительном временном интервале и большей площади наблюдения. Вместе с тем можно полагать, что ионосферный отклик на извержение вулкана наступает раньше признаков, регистрируемых СВЧ радиометром.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022 г.

Список литературы

1. Toman I., Brcic D., Kos S. Contribution to the Research of the Effects of Etna Volcano Activity on the Features of the Ionospheric Total Electron Content Behaviour. Remote Sensing. 2021.

2. Kaloshin I., Kuznetsov V., Skripachev V., Surovceva I. Capabilities evaluation of spaceborne scientific equipment for geophysical applications. In MATEC Web of Conferences V International Forum for Young Scientists Space Engineering, volume 102 of MATEC Web of Conferences. MATEC Web of Conferences MATEC Web of Conferences, 2017. DOI: 10.1051/matecconf/201710201024

3. Seen a stunning sunrise or sunset lately? The Tongan volcano may be the cause [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://niwa.co.nz/news/seen-a-stunning-sunrise-or-sunset-lately-the-tongan-volcano-may-be-the-cause, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ.

4. Семенова О. В., Делов Л. А., Скрипачев В. О., Суровцева И. В. Диагностика ионного состава окружающей среды при экстремальных ситуациях // Российский химический журнал (Ж. Рос. Хим. Об-ва). Т. LXV. № 4. С. 36–41.

V. O. Skripachev

MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
e-mail: skripatchevv@inbox.ru

RESULTS OF PROCESSING SATELLITE DATA OF THE JANUARY 14, 2022 VOLCANO ERUPTION

The paper briefly considers the classification of volcanic eruptions. On the example of the eruption of the Tonga volcano that occurred on January 14, 2022, the results of processing data from the passive microwave radiometer MTVZA in terms of radio brightness temperature profiles are shown. Anomalies in the radio brightness temperature profiles were revealed, which is probably due to the presence of aerosol in the atmosphere. The results of processing data recorded at the flight altitude of the spacecraft from the DMSP system (USA) are presented. Anomalies in the ion concentration and electron density, as well as electron temperature, were revealed. Directions for further research are noted.

Keywords: infrastructure, volcanic eruption, data processing, microwave radiometer, electron density, ionosphere, atmosphere.

УДК 528.88

А. В. Стальмак[1], А. С. Голюков[1,2]

[1]Сибирский федеральный университет
[2]Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
e-mail: astalmaak@icloud.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПРОЙДЕННЫХ ОГНЕМ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ С СФО ПО МАТЕРИАЛАМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

Аннотация. Ежегодно на территории Сибирского федерального округа (СФО) от пожаров страдают миллионы гектар лесных массивов, в связи с чем нарушается продуктивность древесной растительности. Цель работы – оценка продуктивности пройденных огнем лесных территорий Сибирском федеральном округе по материалам спутниковой съемки. Методология включает обработку данных FIRMS и MCD64 с целью получения местоположения гарей, их площадей и анализе динамики данных о валовой первичной продуктивности в этих местах. Выявлено возрастание средних площадей гарей как севернее, так и южнее полярного круга (66,5° N). Зафиксировано смещение северной границы территорий, пройденных огнем с ~4°. Было выявлено, что древесной растительности севернее полярного круга необходимо ~11–13 лет, чтобы восстановить свою продуктивность до уровня, предшествующего пожару, а южнее него ~5–7 лет.

Ключевые слова: MCD64, FIRMS, валовая первичная продукция, Сибирский федеральный округ.

Введение. Пожары являются одним из наиболее значимых факторов нарушения лесных экосистем. В 21 в. отмечается увеличение количества и площадей пожаров в лесах США, Канады, Европы и России, что связывают с увеличением аридности климата [1–4]. Ежегодно на территории Сибирского федерального округа (СФО) от пожаров страдаю миллионы гектар лесных массивов, в связи с чем нарушаются продуктивность древесной растительности. Необходимо иметь достоверную информацию о продуктивности древесной растительности в местах гарей, от которых погибают ценные древесные породы и уникальные экосистемы, а также нарушаются процессы, связанные с обменом углерода. В связи с чем необходимо понимать сколько времени необходимо растительности на прошедших огнем территориях, чтобы их продуктивность вернулась на прежний уровень. В настоящее время существуют данные дистанционного зондирования, позволяющие отслеживать этот процесс и анализ которых позволить понять влияние пожаров на него [5].

Цель работы – оценка продуктивности пройденных огнем лесных территорий Сибирском федеральном округе по материалам спутниковой съемки.

Исходные данные. В работе использовались данные продуктов MODIS о аномальных температурах (хотспоты) и пройденных огнем

© Стальмак А. В., Голюков А. С., 2022

территориях (гарях) и – FIRMS и MCD64 соответственно, покрывающие территории СФО (угловые координаты сцены: 80° N, 71° E; 49° N, 122° E) за 2001–2020 гг. Векторные ежемесячные данные MCD64 были скачаны с ftps://fuoco.geog.umd.edu, получены на основе растров данного продукта с пространственным разрешением 500 м и представлены полигонами, содержащими информацию о номере дня возгорания. Ежегодные данные FIRMS получены с https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/ и представлены центроидами с информацией о точках, где были зафиксированы аномальные температуры. Также в работе использовалась официальная статистика о площадях, пройденных огнем, в СФО по данным ИСДМ-Рослехоз за период 2010–2019 гг. (https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml/). Для определения принадлежности гари к лесной территории использовались карты лесных территорий VEGA-PRO за 2006 и 2016 гг. (http://pro-vega.ru/). Валовая первичная продуктивность представлена 8-дневными данными GPP (продукт MOD17A2 https://search.earthdata.nasa.gov/search) за период 2003–2016 гг.

Методика. Данные FIRMS и MCD64 были отсеяны по принадлежности границам СФО. Хотспоты (FIRMS) обрабатывались за каждый год отдельно, были удалены данные, чья достоверность была меньше 80 %. После чего вокруг центроидов строился 500 м квадратный буфер и производилось объединение соседних полигонов (ближе 250 м) в один полигон (гарь) с перерасчетом данных в таблице атрибутов (начальной и конечной даты хотспота, средней широты и долготы). Ежемесячные данные о гарях MCD64 были объединены по времени в годовые, а затем пространственно по общей границе в рамках конкретного года с пересчетом данных в таблице атрибутов (начальный и конечный день года гари). Далее было сделано перепроецирование данных в местную систему координат (EPGS 32646) и выполнен расчет площадей получившихся гарей в гектарах.

Карты преобладающих лесных пород VEGA-PRO были переклассифицированы так, чтобы оставить и объединить только классы, соответствующие древесным породам. Определение гарей, затронувших лесные территории, выполнялось с помощью пространственного пересечения данных VEGA-PRO за 2006 г. с гарями за период 2001–2010 гг. и VEGA-PRO за 2016 г. с гарями за 2011–2020 гг. Для получения площадей лесных территорий, пройденных огнем, предобработанные данные о гарях FIRMS и MCD64 были обрезаны по границам лесной территории по VEGA-PRO за указанные выше периоды. После данные о площадях гарей и пройденных огнем лесных территориях были извлечены в Excel для анализа.

Скачанные сцены GPP были объединены пространственно по 8-дневкам для периода 145–234 дней, после чего из данных были убраны пиксели, не соответствующие растительности. На следующем шаге был создан композитный слой, в котором последовательно расположены 8-дневные данные со 145 по 234 день в году для периода 2003–2018 гг. Далее лесные территории, пройденные огнем, были превращены

в центроиды, характеризующие центры гарей и гари, в которые были извлечены значения GPP. После данные были извлечены в Excel для анализа. Статистический анализ был выполнен в ПО STATISTICA. Обработка пространственных данных производилась в ПО QGIS и ArcGIS.

Результаты. Динамика пройденных огнем территорий в СФО по данным FIRMS и MCD64 схожа, корреляционная связь между рядами данных $r_{sp} = 0.87$, ($p < 0.05$, 2001–2020 гг.). Данные официальной статистики ИСДМ-Рослехоз по пройденным огнем площадям для периода 2010–2019 гг. сильнее коррелируют с данными FIRMS ($r_{sp} = 0.88$, при $p < 0.05$), в сравнении с данными MCD64 ($r_{sp} = 0.44$, при $p < 0.05$). Выявлен значимый линейный тренд возрастания средней площади гарей с 2001 по 2020 г. ($R^2 = 0.28$ при $p < 0.05$ и $R^2 = 0.19$ при $p < 0.1$) (рис. 1, *а*). За период 2001–2020 гг. выявлено возрастание средних площадей гарей как севернее ($R^2 = 0.23$ при $p < 0.05$), так и южнее ($R^2 = 0.27$ при $p < 0.05$) полярного круга (66.5° N). Зафиксировано смещение северной границы территорий, пройденных огнем примерно на 200 км (с ~65° до ~ 69°) с 2001 к 2020 г. ($R^2 = 0.55$ при $p < 0.05$) (рис. 1, *б*).

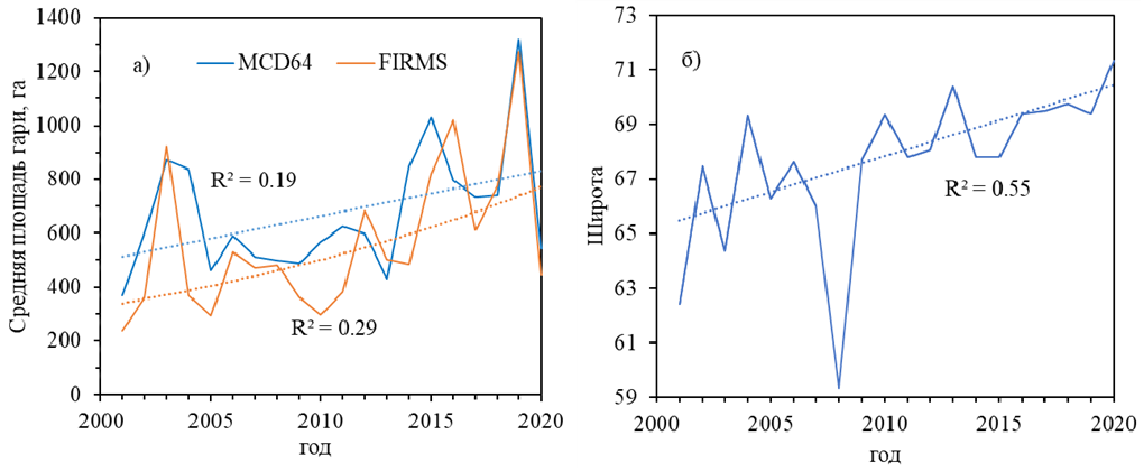


Рис. 1. Динамика средней площади гарей (*а*) и северное продвижение гарей (*б*). Трендна рис. (*б*) построен без учета 2008 г.

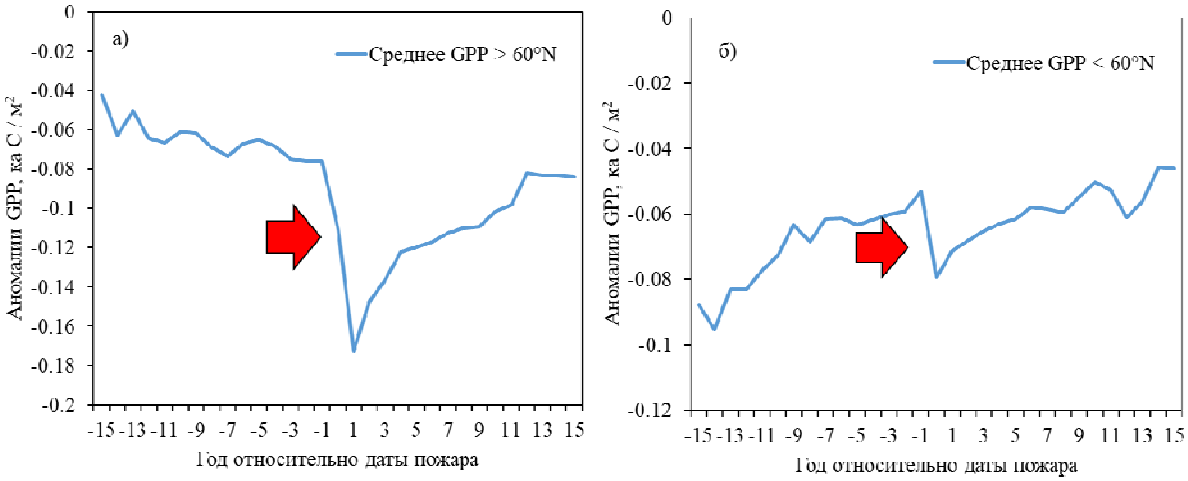


Рис. 2. Динамика усредненного GPP по всех гарям, относительно события (пожар), севернее полярного круга (*а*) и южнее (*б*). Красной стрелкой отмечено событие – пожар

Было выявлено, что древесной растительности в Арктической зоне необходимо примерно 11–13 лет, чтобы восстановить свою продуктивность (GPP) до уровня, предшествующего пожару (рис. 2, *а*). Древесной растительности, произрастающей южнее полярного круга необходимо примерно 5–7 лет, чтобы восстановить свою продуктивность на уровень до пожара (рис. 2, *б*).

Список литературы

1. Болданова Е. В, Давыдова Г. В. Лесные пожары к России, Канаде, США: Динамика, тенденции, факторы // Актуальные тенденции развития мировой экономики: материалы междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Изд-во: Байкальский гос. ун-т (Иркутск). 2016. С. 12–20.

2. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A. et al. Wildfires in the Siberian taiga. Ambio 50, 1953–1974. 2021. https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x.

3. IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O. et.al. (eds.)].

4. Паршикова В. Н., Степень Р. А., Петренко Е. В. Технология и товароведение продуктов малоотходной переработки хвойной древесной зелени: монография / Сиб. федер. ун-т, Торг.-эконом. ин-т. Красноярск: СФУ, 2016.

5. Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., Сенько К. С., Балашов И. В., Мазуров А. А. Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401- 2021-18-4-178-192.

A. V. Stalmak[1], A. S. Golyukov[1,2]

[1]Siberian Federal University

[2]Institute of Forests, V. N. Sukachev SB RAS – Separate Association FRC KSC SB RAS

e-mail: astalmaak@icloud.com

INVESTIGATION OF THE PRODUCTION OF THE FOREST TERRITORIES WITH THE SFD BY FIRE ON THE MATERIALS OF SATELLITE IMAGE

Annually in the territory of the Siberian Federal District (SFD) hectares of forests suffer from fires, and therefore the productivity of tree vegetation is disturbed. The purpose of the work is to evaluate the performance of forest observations passed by fire in the Siberian Federal District based on satellite imagery. The methodology includes the processing of FIRMS and MCD64 data in order to obtain information on gross productivity in these places. Age average areas of burnt areas were revealed both north and south of the Arctic Circle (66.5˚ N). A shift of the northern border of the borders traversed by fire from ~ 4˚ was recorded. It was found that the woody vegetation of the Arctic Circle takes ~11–13 years to restore its productivity to the level before the fire, and south of it ~5–7 years.

Keywords: MCD64, FIRMS, gross primary production, Siberian Federal District.

УДК 528.87, 528.854

А. В. Удод, Ю. А. Маглинец

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: audod.asp@gmail.com, maglinets@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЗАРАСТАНИЙ ПРОСЕК ВЛЭП ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Аннотация. В работе приведены результаты исследования возможности автоматизации процесса космического мониторинга зарастаний просек воздушных линий электропередач на основе применения алгоритмов компьютерного зрения и нейросетей. В качестве источника данных были использованы снимки сверхвысокого пространственного разрешения, предоставляемые сервисом Google Earth.

Ключевые слова: спутниковые данные, изображения Google Earth, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, компьютерное зрение, автоматизация.

Введение. Развитие технологий дистанционного зондирования, нейронных сетей и компьютерного зрения открывают возможности к повышению точности и степени автоматизации решения задач выявления объектов на подстилающей поверхности. В работе исследуется способы автоматизации задачи, связанной с контролем соблюдения правил устройства электроустановок (ПУЭ) в части обустройства воздушных линий электропередач (ВЛЭП). Данная задача возникает, в частности, в ПАО Россети-Сибирь. ПУЭ предусматривают достаточно жёсткие требования к состоянию подстилающей поверхности в зоне прохождения ВЛЭП. Контроль процесса зарастания просек на труднодоступных участках, расположенных вдали от населённых пунктов и контроль качества выполненных работ по их расчистке достаточно трудоёмки. В то же время, доступ к снимкам сверхвысокого разрешения и развитие технологий компьютерного зрения и нейронных сетей могут позволить автоматизировать процесс анализа спутниковых снимков с целью получения актуальной информации о зарастании буферных зон ВЛЭП и их расчистке.

Целью данной работы является исследование возможности автоматизированного решения указанных выше задач путем создания рабочего прототипа и исследования результатов его работы, включая анализ возникших проблем и перспективных путей для их решения.

Метод обнаружения деревьев. В работе использовался метод дешифрования деревьев, предложенный в статье Лин Янг и др. [1]. В основе данного метода лежит попиксельная классификация при помощи комбинации 27 признаков и нейронной сети (в оригинале AdaBoost[2], в современных реализациях Mask R-CNN[3]), распределяющей веса для этих признаков и формирующей классификатор.

© Удод А. В., Маглинец Ю. А., 2022

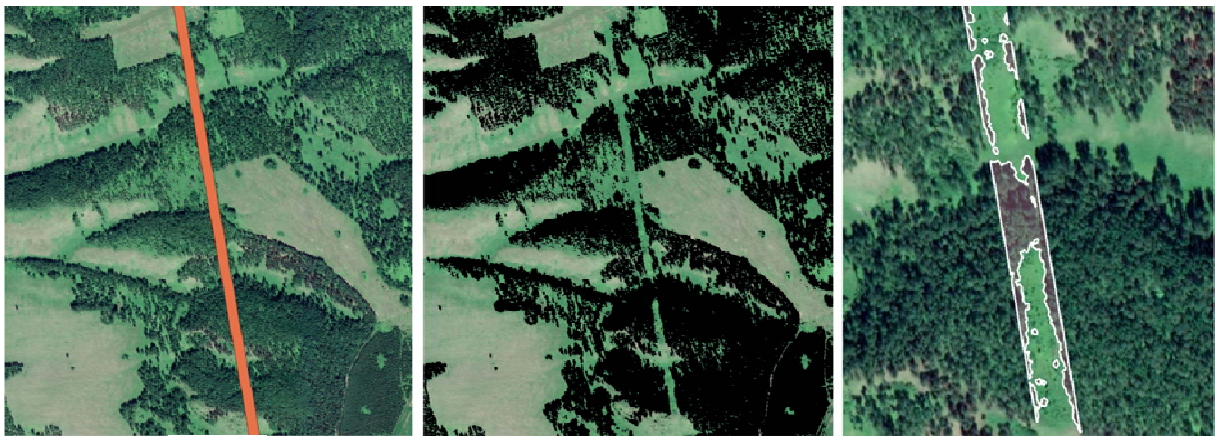
Тренировка нейронной сети происходит по размеченной обучающей выборке, состоящей из нескольких тайлов сцены, и бинарных масок для этих тайлов. Подбор обучающей выборки осуществляется либо в случайном порядке, либо одноуровневым или двухуровневым разбиением изображений на кластеры согласно GIST дескрипторам [4].

После попиксельной классификации, для усиления согласованности соседних пикселей и удаления шумов классификация уточняется методом минимизации функции энергии. Затем уточненная классификация используется для локализации отдельных деревьев.

Принцип работы прототипа. Прототип реализован на языке Python 3.8, использование ранее представленного метода дешифрации деревьев [1] происходит посредствам библиотеки с открытым исходным кодом DetecTree [5].

Для начала работы пользователю необходимо указать путь к исходному изображению, разбитому на тайлы и shape-файлу, описывающему буферные зоны ВЛЭП или иные области интереса. Далее библиотека формирует обучающую выборку для представленного изображения из нескольких тайлов (1–4 %), для которых пользователь должен сформировать бинарную маску классификации пикселей деревьев.

После получения маски библиотека производит классификацию пикселей оставшихся тайлов изображения, формируется бинарная маску уточненной классификации для всей сцены. Полученная бинарная маска обрезается по представленной геометрии, в результате чего формируется маска признаков, входящих в область интереса, которая преобразуется в вектор. На выходе формируется shape-файл, содержащий информацию об обнаруженных признаках зарастания.



а *б* *в*

Рис. Этапы работы прототипа: *а* – исходные данные; *б* – уточненная классификация; *в* – итоговый результат

Анализ результатов. Для выполнения экспериментальных исследований использовались космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения программы Maxar, полученных с помощью геоинформационного портала Google Earth [6]. Был подготовлен набор данных, состоящий из 5 сцен, полученными в период с июня по август,

и несколько дополнительных сцен, полученных в иные месяцы, вне зависимости от года. Также были найдены идентичные сцены, полученные программами Maxar и WorldView-2.

Качество классификации отличается в зависимости от выбранного метода формирования обучающей выборки, разница составляет 3–5 %, наилучшие результаты показывает двухуровневая кластеризация. Средняя точность работы метода дешифрования деревьев на ряде экспериментов со сценами, полученными с июня по август из одного источника, составила 91,8 %, в иные периоды точность падала вплоть до 76 %. Точность классификации схожих сцен, но полученных разными программами, составила 94,46 % для WorldView-2 и 87,9 % для Maxar.

Наиболее явной проблемой для решения задачи автоматизации является необходимость в разметке сформированной обучающей выборки пользователем для каждой сцены, что исключает возможность полноценной автоматизации детектирования зарастаний просек с использованием предложенного подхода в текущем виде.

Потенциальное решение данной проблемы может заключаться в смене подхода к дешифрованию деревьев на спутниковых снимках, либо развитию архитектуры непосредственно программного модуля, поиска путей к исключению этапа разметки для пользователя.

Список литературы

1. Yang L., Wu X., Praun E., & Ma X. Tree detection from aerial imagery // In Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. 2009. P. 131–137.

2. Freund Y., Schapire R. E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting, 1995.

3. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick, R. Mask R-CNN // In Proceedings of the ieee international conference on computer vision. 2017. P. 2961–2969.

4. Oliva A., Torralba A. Modeling the shape of the scene: A holistic representation of the spatial envelope // International Journal of Computer Vision. 2001. Vol. 42. P. 145–175.

5. Bosch M. DetecTree: Tree detection from aerial imagery in Python. // Journal of Open Source Software. 2020. Vol. 5(50). P. 2172.

6. Google Earth. URL: https://earth.google.com/

A. V. Udod, Y. A. Maglinets

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: audod.asp@gmail.com, maglinets@mail.ru

AUTOMATING THE DETECTION OF OVERGROWTH OF POWER LINES FROM HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGES

The paper presents the results of the study of the possibility of automating the process of space monitoring of overgrown clearings of overhead power lines based on the application of computer vision algorithms and neural networks. As a source of data, we used ultrahigh spatial resolution images provided by Google Earth.

Keywords: satellite data, Google Earth images, monitoring, remote sensing, computer vision, automation.

УДК 528.06

В. А. Хамедов

Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия
e-mail: khamedov.vladimir@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ РАДАРНЫХ ДАННЫХ SENTINEL-1 ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Аннотация. Проведен пространственно-временной анализ состояния растительного покрова тестовых участков лесостепной, таежной и тундровой зон территории Западной Сибири с использованием радарного индекса RVI. Экспериментальная апробация оценки состояния растительности в границах тестовых участков показала возможность применения радарных методов ДЗЗ для оперативного мониторинга территорий и их независимость от зональности и неблагоприятных погодных условий, в том числе недостаточной освещенности территории наблюдения. Результаты исследования могут быть использованы при осуществлении контрольно-надзорной и природоохранной деятельности на техногенно-нагруженных территориях.

Ключевые слова: оперативный спутниковый мониторинг, радарные данные, Sentinel-1, Radar Vegetation Index, RVI.

Оперативная и актуальная информация о состоянии растительного покрова территорий на основе методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса позволяет обеспечить принятие управленческих решений по снижению риска негативных воздействий на экосистему и предотвратить масштабные экологические проблемы. Однако для северных широт существует проблема достоверного и своевременного получения такой информации в связи с высокой степенью экранирования облачностью наблюдаемой территории. Для решения указанной проблемы необходимо обеспечить возможность использования радарных методов ДЗЗ, независящих от условий освещенности и наличия облачности.

Созданию систем оперативного мониторинга территорий посвящен ряд работ. Например, в [1, 2] представлены технические и организационные решения по обеспечению оперативного спутникового мониторинга территорий Западной Сибири. При этом оценка состояния растительного покрова в основном осуществляется на основе индекса NDVI [3] с использованием данных оптического диапазона, получаемых с КА Landsat или Sentinel-2. В данной работе представлен опыт применения радарных данных с КА Sentinel-1 для оценки состояния растительных покровов территорий Западной Сибири на основе радарного вегетационного индекса RVI [4].

Расчет радарного вегетационного индекса RVI выполнен по формуле:

© Хамедов В. А., 2022

$$RVI = \frac{4\sigma_{vh}}{\sigma_{vv} + \sigma_{vh}},$$

где σ_{vv} и σ_{vh} – калиброванные радарные данные с поляризациями VH, VV.

Для обработки данных ДЗЗ радарного диапазона и расчета RVI было использовано специализированное программное обеспечение SNAP (Sentinel Application Platform). Необходимые космические снимки с КА Sentinel-1 получены с использованием общедоступных ресурсов ASF Data Search (NASA) https://search.asf.alaska.edu/#/ и Copernicus Open Access Hub (ESA) https://scihub.copernicus.eu/.

Для проведения исследования было выбрано три тестовых участка в тундровой, таежной и лесостепной природных зонах территории Западной Сибири. Верификация полученных результатов проведена с использованием индекса NDVI. На рис. 1 графически представлена корреляция значений индексов RVI и NDVI растительного покрова различных участков лесостепной природной зоны, рассчитанных по космическим снимкам Sentinel-1 и Sentinel-2, полученным 02.06.2021.

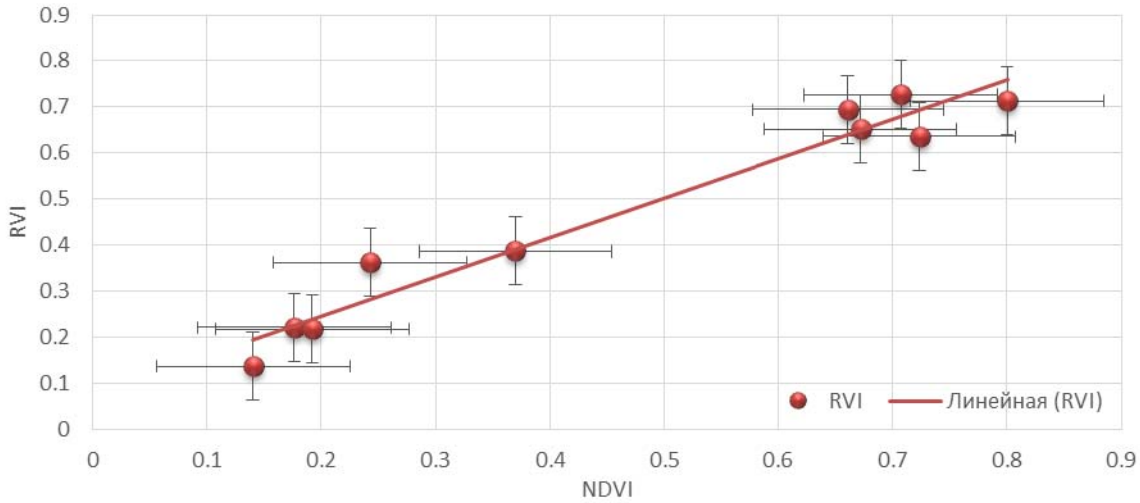


Рис. 1. Корреляция значений индексов RVI и NDVI для территории лесостепной зоны

Результаты проведенного исследования для лесостепной зоны сопоставимы с результатами, полученными [6] при оценке состояния сельскохозяйственных земель. Дополнительно была проведена оценка сезонной изменчивости показателей состояния растительного покрова наблюдаемой территории за временной период с 2017 по 2021 гг.

На рис. 2 представлена корреляция значений вегетационных индексов для таежной природной зоны. Значения NDVI рассчитаны по снимку оптического диапазона, полученного с КА Sentinel-2 14.06.2021, а значения RVI – по снимку радарного диапазона с КА Sentinel-1, полученного 09.06.2021.

Для тундровой природной зоны для расчета RVI был использован снимок радарного диапазона, полученный 06.08.2021, а для расчета NDVI – снимок оптического диапазона, полученный 07.08.2021 (рис. 3).

Вегетационные индексы данного тестового участка имеют низкие значения, обусловленные состоянием растительности тундровой зоны.

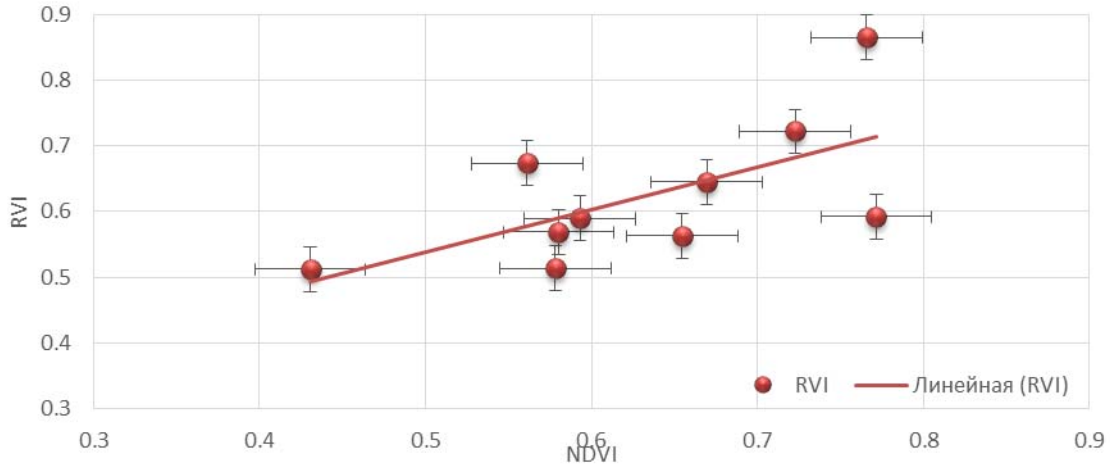


Рис.2. Корреляция значений индексов RVI и NDVI для территории таежной зоны

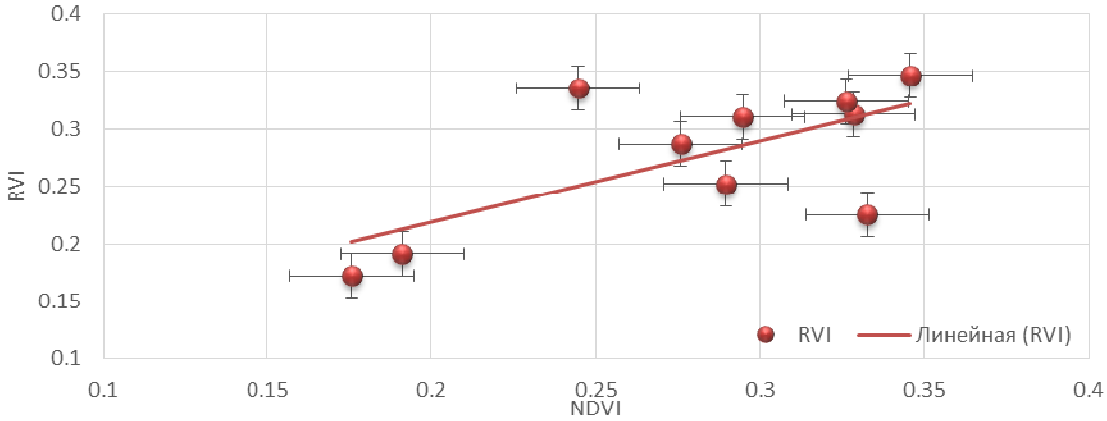


Рис. 3. Корреляция значений индексов RVI и NDVI для территории тундровой зоны

Проведенные исследования показали возможность осуществления оценки состояния растительного покрова различных природных зон с использованием данных радарного диапазона в условиях недостаточной освещенности и экранирования территории наблюдения облачностью. Совместное использование данных радарного и оптического диапазонов позволяет повысить оперативность спутникового мониторинга организациями, осуществляющими контрольно-надзорную и природоохранную деятельность на территориях Западной Сибири.

Перспективным направлением является исследование возможности комплексного подхода к определению состояния растительного покрова по радарным данным с использованием RVI и методики вычисления вегетационных индексов на основе изображений когерентности [6].

Список литературы

1. Мазуров Б. Т., Аврунев Е. И., Хамедов В. А. Оперативный мониторинг лесных земель северных регионов на основе использования оптических и радарных

космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 103–111.

2. Хамедов В. А., Мазуров Б. Т. Разработка методических вопросов создания системы спутникового мониторинга состояния лесных экосистем в условиях воздействия нефтегазового комплекса территории Западной Сибири // Вестник СГУГиТ. 2015. № 3 (31). С. 16–31.

3. Полищук Ю. М., Хамедов В. А., Русакова В. В. Дистанционные исследования воздействия факельного сжигания попутного газа на лесорастительный покров нефтедобывающей территории с использованием вегетационного индекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 61–69.

4. Dinesh Kumar S., Srinivasa Rao S., Sharma J. R. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton // Indian Cartographer. 2013. Vol. 33. P. 91–96.

5. Панов Д. Ю., Сахарова Е. Ю., Воронова А. Е. Использование спутниковых радиолокационных данных для прогнозирования урожайности яровой пшеницы // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VI Междунар. науч. конф. 2019. С. 284–286.

6. Чимитдоржиев Т. Н., Сангадиев С. Ш. Когерентная обработка радиолокационных изображений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2007. Т. 3. С. 198–202.

V. Khamedov

Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia
khamedov.vladimir@mail.ru

SENTINEL-1 RADAR DATA APPLICATIONS TO ASSESS THE CONDITION OF VEGETATION COVER

A spatial and temporal analysis of the state of vegetation cover in test areas of the forest-steppe, taiga and tundra zones of the territory of Western Siberia was carried out using the RVI radar index. Experimental approbation of the assessment of the state of vegetation within the boundaries of the test areas showed the possibility of using radar remote sensing methods and their independence from zoning and adverse weather conditions, including insufficient illumination of the observation area.

Keywords: operational satellite monitoring, radar data, Sentinel-1, Radar Vegetation Index, RVI.

УДК 537.86

Д. В. Харламов[1], М. Ю. Реушев[1], А. Н. Борисов[2], В. Г. Подопригора[3], А. В. Сорокин[1]

[1]Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»
[2]Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН
[3]Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН
Красноярск, Россия
e-mail: ikivt@yandex.ru

РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЕ ДРЕВОСТОЕВ СОСНЫ И БЕРЕЗЫ СИГНАЛАМИ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ L1-ДИАПАЗАНА

Аннотация. Представлены экспериментальные данные о распространении сигналов навигационных спутников диапазона L1 в одновозрастных древостоях сосны и березы в начале лета. Проведена математическая обработка данных с использованием преобразований Фурье. Выявлено влияние таксационных показателей древостоев на амплитудно-временные зависимости регистрируемых сигналов.

Ключевые слова: лес, радиопросвечивание, сигналы навигационных спутников.

Объект исследования. Экспериментальным участком являлась тестовая площадка (ТП) в Октябрьском районе г. Красноярска. ТП представляла собой поляну длиной порядка 60 м и шириной порядка 30 м. Направление поляны совпадает с азимутальным направлением 345°, вдоль которого проходит пешеходная тропа, разделяющая сосновый и березовый одновозрастные массивы. Для записи и приема навигационных сигналов использовался четырехканальный приемник-регистратор с дипольной антенной «НСРП-04».

На первом этапе тестовых измерений (ТИ) приемная антенна для регистрации сигналов от навигационных спутников (НС) располагалась на расстоянии 10 м от кромки лесного массива состоящего преимущественно из сосен, высотой порядка 26 м. При таких углах возвышения приемником регистрировались сигналы НС, прошедшие через лесной массив, и не регистрировались прошедшие через свободное пространство.

На втором этапе ТИ приемная антенна располагалась на расстоянии 10м от кромки лесного массива состоящего преимущественно из берез средней высотой порядка 22 м. На всех этапах ТИ антенна устанавливалась на высоте порядка 30 см от поверхности земли, углы возвышения находились в интервале от 10° до 55°, время регистрации каждого ТИ составляло 3 часа.

Ослабление навигационного сигнала при прохождении сквозь лесной полог определяется тем, как он проходит сквозь кроны деревьев дерева и как он взаимодействует со стволовой древесиной. Для того, чтобы

© Харламов Д. В., Реушев М. Ю., Борисов А. Н., Подопригора В. Г., Сорокин А. В., 2022

оценить основные показатели, влияющие на прохождение навигационного сигнала, на двух тестовых участках были проведены лесотаксационные работы и определены такие характеристики соснового и березового древостоя как средний диаметр ствола на высоте 1.3 м (D), средняя высота деревьев (H), средний диаметр крон ($D_{кр}$) и их протяженность ($L_{кр}$), а также густота древостоя (N). На основе этих данных по установленным методикам и региональным таблицам хода роста древостоя [3] рассчитаны производные таксационные показатели древостоев: сумма площадей поперечного сечения стволов на га (G); полнота древостоя (P); запас стволовой древесины на га (M).

Таблица

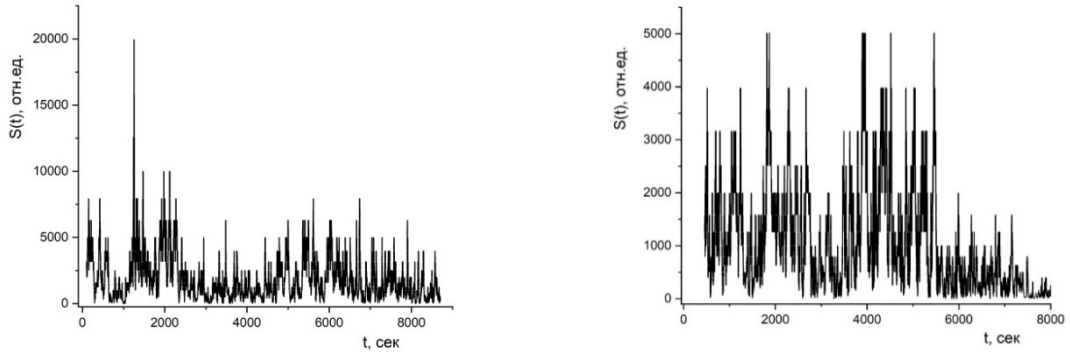
Основные таксационные характеристики участков

№ уч-ка	Порода	D, см	H, м	$D_{кр}$, м	$L_{кр}$, м	N, шт/га	M, м^3/га	m, т/га
1	С	34.0	26.0	3.7	10.4	567	652	563
	Б	25.0	21.1	–	–	160	66	58
2	Б	31.3	21.9	4.5	16.2	240	187	164

У сосны в процессе роста происходит отмирание ветвей и очищение нижней части ствола от сучьев, и в связи с этим в древостое протяженность кроны редко превосходит 40–50 % от высоты дерева. Структура самой кроны характеризуется сквозистостью и неоднородностью распределения хвои как в горизонтальной плоскости, так и по вертикали. У березы протяженность кроны доходит до 70–80 % от высоты дерева. При этом крона, наряду с крупными сучьями, состоит из множества тонких ветвей, покрытых листьями. Листья при этом распределены достаточно однородно по всей кроне.

Метод радиопросвечивания леса в совокупности с расчетами по известной модели Френеля для слоевой структуры позволяет определить коэффициент пропускания древостоя и обратно пропорциональный ему коэффициент ослабления излучения. Из-за сильной разреженности лесной среды её диэлектрическая проницаемость мало отличается от проницаемости воздуха. На частотах диапазона L1 пропускание сигналов НС довольно значительное (T = 0,7–0,9), а ослабление невелико (–0,2 –0,4 дБ/м). При этом на данных частотах не наблюдалось сильного отличия значений погонного ослабления для соснового и берёзового древостоя. Слабо различаются друг от друга и значения вертикального и горизонтального поляризованного коэффициента пропускания. Если рассматривать слоистую структуру древостоя, то горизонтальная составляющая ослабления немного больше для крон, а вертикальная – для стволов. В целом верхняя часть полога вносит основной вклад в ослабление сигналов НС. Так, для соснового леса коэффициент погонного ослабления крон составляет –0,24±0,03 дБ/м, а для стволов –0,07±0,05 дБ/м.

Результаты и обсуждение. Примеры измеренных АВЗ в виде функций $S(t)$ для ТИ № 1 и ТИ № 2 приведены на рис. 1, *а* и *б*.



а *б*

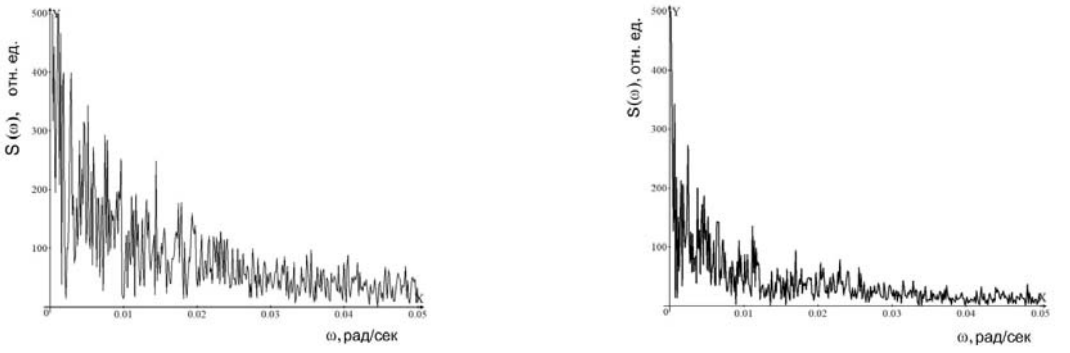
Рис. 1. Результаты ТИ: № 1 *а* – АВЗ для НС Galileo 2;
б – АВЗ для ТИ № 2 для НС Galileo 11

Последующий анализ $S(t)$ с использованием быстрого Фурье – преобразования (БФП) при проведении ТИ № 1 и ТИ № 2. (НСД) позволил выявить качественные отличия при прохождении сигналов от НС через лесные массивы, состоящие из березы и сосны. На рис. 2 приведены результаты такой обработки $S(t)$ в виде зависимостей $S(\omega)$ от ω (рад/сек).

В первом приближении получена интерпретация экспериментальной зависимости $S(\omega)$ математическим выражением вида:

$$S(\omega) = S_0 \exp(-\alpha\omega + \beta) + c \ \#(1),$$

где $S_0(0)$ – максимальное значение зависимости $S(\omega)$; α, β, с – показатели функции (1), зависящие от характеристик поглощения сигналов от НС в лесном массиве.



а *б*

Рис. 2. Спектры Фурье $S(\omega)$: *а* – ТИ № 1, НС Galileo 2; *б* – ТИ № 2 НС Galileo 11

Для Фурье спектров, вид которых приведен на рис. 3, выражение (1) может быть представлено в виде следующих выражений:

$$S_{Galileo\ 2}(\omega) = 180 \exp(-86\omega + 0{,}4) + 12 \ \#(2),$$
$$S_{Galileo\ 11}(\omega) = 220 \exp(-120\omega - 0{,}1) + 5 \ \#(3).$$

Из уравнений (2) и (3) видно, что прохождение сигналов от НС в лесных массивах из сосны (2) и березы (3) качественно различаются коэффициентами α. Подобные различия в коэффициентах α наблюдались и при регистрации сигналов от других НС. Анализируя результаты ТИ № 2 и ТИ № 3, можно сделать вывод о том, что коэффициент α определяет поглощение сигналов от НС с различной структурой лесных массивов и обусловлен различием их электрофизических характеристик.

Заключение. В ходе экспериментальных исследований распространения сигналов от НС диапазона L1 в лесных массивах, состоящих, преимущественно из сосны (ТИ № 1) и березы (ТИ № 2) получены следующие результаты. Электрофизические характеристики древостоя определяют изменения сигналов от НС в процессе распространения в объеме леса с различной структурой. Измерения АВЗ сигналов от НС, при радиопросвечивании в диапазоне L1 позволяют проводить качественную оценку состава древостоя после обработки АВЗ путем быстрого Фурье преобразования.

Список литературы

1. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 392 с.

2. Кашкин В. Б., Кокорин В. И., Миронов В. Л. и др. 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. Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г., Нильсон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М.: Междунар. ин-т приклад. систем. анализа, 2008. 886 с.

D. V. Kharlamov[1], M. Yu. Reushev[1], A. N. Borisov[2], V. G. Podoprigora[3], A. V. Sorokin[1]

[1]Federal Research Center KSC SB RAS
[2]Institute of Forest named after V.N. Sukachev FRC KSC SB RAS
[3]Institute of Physics named after L.V. Kirensky FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: ikivt@yandex.ru

RADIO ILLUMINATION OF PINE AND BIRCH STANDS BY SIGNALS OF L1-BAND NAVIGATION SATELLITES

Experimental data are presented on the propagation of signals from navigation satellites in the L1 band in coeval pine and birch stands in early summer. Mathematical data processing was carried out using Fourier transforms. The influence of taxation indicators of forest stands on the amplitude-time dependences of the recorded signals was revealed.

Keywords: forest, radio transmission, navigation satellite signals.

УДК 004.5+528.9

А. Е. Хмельнов[1], А. С. Гаченко[1]

[1]Кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН), Иркутск, Россия
e-mail: hmelnov@icc.ru, gachenko@icc.ru

ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ О ПОДВОДНОМ И ПРИБРЕЖНОМ РЕЛЬЕФАХ И ПОСТРОЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ЭТИХ ДАННЫХ

Аннотация. 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: слова: *цифровая модель рельефа, изолинии, триангуляция Делоне с ограничениями, морфинг карт, береговая линия, наводнения.*

В настоящее время выполняется комплексная научно-исследовательская работа по обоснованию принципов регулирования уровня озера Байкал в различных условиях водности с учетом современных экологических, социально-экономических и водохозяйственных требований, сопровождаемых мониторингом. В проекте участвуют коллективы нескольких академических институтов из разных регионов страны, включая Иркутскую область и республику Бурятия.

В рамках научного проекта проводятся аналитические работы для определения влияния изменения уровня озера Байкал на экосистему его мелководной зоны и прибрежных территорий.

Для выполнения этих работ необходимо иметь качественные цифровые модели рельефа мелководных зон и прибрежных территорий, подверженных потенциальным ущербам при регулировании уровня озера Байкал, с выделением отдельных ключевых участков.

В рамках работ по этапу определены населенные пункты и их границы, которые могут быть подвержены затоплению (речь идет об озере Байкал в границах Иркутской области, Иркутском водохранилище и нижнем бьефе ИГЭС). Разработаны обзорные карты (схемы) исследуемого объекта с нанесением основных территорий (зон), включая расположенные на них населенные пункты/объекты, подверженные рискам

© Хмельнов А. Е., Гаченко А. С., 2022

колебания уровня Байкала в диапазоне подъема до 460 м в Тихоокеанской системе (ТО). В результате анализа территории получен перечень объектов, попадающих в зоны риска.

При реализации проекта по моделированию зон затопления реки Ангара был [1, 2] проведен анализ имеющихся сведений о батиметрии и получен вывод, что среди них лоцманские карты являются наиболее полными источниками информации, несмотря на то, что они очень схематичны. Был разработан метод преобразования карт, позволяющий комбинировать менее точные схематические данные с более точными топографическими картами [1]. Дальнейшее сравнение полученных таким образом данных с результатами промеров глубины с помощью эхолота на некоторых участках Братского водохранилища показало, что фактические замеры могут существенно отличаться от исходных данных, полученных по лоцманским картам [3]. Таким образом, для уточнения модели подводного рельефа требуется найти дополнительные источники информации о глубинах. Между тем измерение глубины с помощью эхолота — очень трудоёмкая и дорогостоящая задача, поэтому обработать таким образом всю акваторию большого водоема не получится. Многолучевые эхолоты позволяют охватить гораздо более широкие участки дна под судном, но такие устройства не могут эффективно работать в районах мелководья, которые мы здесь рассматриваем.

Спутниковое дистанционное зондирование (ДЗЗ) позволяет получить максимально большой охват наблюдаемой территории. Разработан ряд методов обработки данных ДЗЗ, позволяющий определять глубины: использование стереоскопических космических снимков высокой точности, обработка спутниковых радиолокационных изображений различных типов, инверсия батиметрии по данным о цветности воды, восстановление батиметрии по характеристикам волнения на воде. Большинство этих методов требуют использования таких данных дистанционного зондирования, которые невозможно получить бесплатно. Среди рассмотренных методов наибольший интерес для нас представляют методы получения подводного рельефа из свободно распространяемые спутниковых данных.

Рассмотрим алгоритмы и данные, которые использовались для создания комбинированных моделей рельефа участков на примере Братского водохранилища. Были использованы следующие источники информации: изолинии рельефа с векторной топоосновы масштабов 1:25 000 и 1:50 000; отметки глубин и изобаты, оцифрованные с лоцманских карт водохранилища [3]; промеры глубин, сделанные во время экспедиции с помощью эхолота. Требовалось согласовать всю эту информацию для получения комбинированной модели рельефа. Для повышения качества моделей рельефа, был применен разработанный авторами алгоритм обработки триангуляций, позволяющий удалить артефакты моделей, построенных по изолиниям. Для работы с триангуляциями [4] используется собственная разработка – библиотека для построения и

обработки триангуляций, которая является быстрой, надежной и может обрабатывать большие наборы данных. Ряд задач выполнялся с помощью программы QGIS и бесплатной версии программы EasyTrace для оцифровки бумажных атласов.

Для обеспечения проекта дополнительными данными и уточнения рельефов прибрежной территории на ключевых участках в данный момент проводится цифровая аэрофотосъемка (АФС) с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Используется квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro и беспилотный комплекс самолетного типа для аэрофотосъёмки Геоскан 101. АФС проводилась с высоты 100, 153 и 220 метров. Получаемые в результате съёмки с этих БПЛА изображения позволяют создавать при помощи специализированного лицензионного программного обеспечения (Agisoft Metashape PRO) ортофотопланы и 3D модели рельефа (цифровые модели местности) с точность выше чем 10 см. на пиксель, что приблизительно соответствует масштабу топографического плана М 1:1 000. При проведении АФС обеспечивалось продольное и поперечное перекрытие снимков около 70 % для обеспечения качественного построения 3D модели (каждый полет производился отрезками по длине и ширине участка).



Рис. 1. Ортофотоплан местности (фрагмент Иркутского водохранилища) съемка БПЛА с высоты 220 м.

В результате обработки аэрофотоснимков в ПО Agisoft Metashape Professional получены цифровые модели местности (ЦММ) и ортофотопланы.

В результате выполнения большого объема комплексных работ получен набор совмещенных 3D модели рельефа для ряда водных объектов и их участков (Иркутское водохранилище, Братское водохранилище, поселок Листвянка (фрагменты озера Байкал). Впервые получена

комплексная модель совмещенного рельефа на протяжении от ГЭС в городе Иркутске до впадения реки Белая в Ангару (протяженность порядка 132 км) разработана оригинальная технология [1, 2] сопряжения надводного рельефа с подводным. Получены точные модели рельефа по ряду ключевых участков.

Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объёмов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения» (номер гос. регистрации 121030500071-2).

Список литературы

1. Bychkov I., Gachenko A., Rugnikov G., Hmelnov A. 3-D modeling of Angara river bed // Proc. of the International Conference of 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. Карта Братского водохранилища (лоция) 1974 год (Министерство речного флота, Главводпуть, Иркутск).

4. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 128 с., URL: http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000142524

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

POSSIBLE SOURCES OF INFORMATION ON THE UNDERWATER AND COASTAL RELIEF AND CONSTRUCTION OF A COMPLEX MODEL BASED ON THESE DATA

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: digital elevation model, isolines, constrained Delaunay triangulation, map morphing, coastline, floods.

УДК 528.88

М. М. Шляхова[1], В. В. Дедкова[2]

[1]Кандидат технических наук, [2]Ассистент,
Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: plazma_space@mail.ru, v.v.dedkova@sgugit.ru

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО МАТЕРИАЛАМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ГЕОСКАН 401

Аннотация. Представлен опыт применения беспилотного воздушного судна Геоскан 401 для аэрофотосъемки защитных сооружений магистральных трубопроводов, а также приведено описание процесса обработки полученных материалов в программном обеспечении Agisoft Metashape. В результате обработки получен ортофотоплан, удовлетворяющий требуемой точности, в результате чего сделан вывод о возможности использования материалов аэрофотосъемки.

Ключевые слова: аэрофотосъемка, беспилотное воздушное судно, магистральный трубопровод, защитные сооружения, цифровая камера.

Магистральный трубопровод является опасным объектом транспортировки нефтяного сырья и требует оперативного мониторинга, так как его неисправность может повлечь аварийные ситуации [1, 2]. Для предотвращения аварий, возникающих вследствие повреждений трубопровода, создаются земляные и бетонные защитные сооружения. Критерии контроля точности мониторинга зависят от структурного материала защитных сооружений [3, 4].

Использование материалов аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна (БВС), полученных цифровой камерой, позволяют справиться с такой задачей в сжатые сроки и предоставить результат обработки в виде ортофотоплана для дальнейших исследований изменения технического состояния защитных сооружений.

Аэрофотосъемка с БВС Геоскан 401 была проведена в октябре 2021 г. на территорию магистрального трубопровода, высота полета составила 80 м, было получено 312 снимков цифровой камерой со шторно-щелевым затвором Sony Alpha 6000 (разрешение 24 Мп, фокусное расстояние 20 мм). На рис. 1 представлен фрагмент снимка с точкой планово-высотного обоснования.

Обработка снимков выполнялась в программном продукте Agisoft Metashape и состояла из следующих процессов:

– загрузка снимков;

© Шляхова М. М., Дедкова В. В., 2022

– выравнивание снимков;
– классификация точек рельефа;
– построение модели;
– построение карты высот (рис. 2);
– построение ортофотоплана.



Рис. 1. Фрагмент снимка с опорной точкой

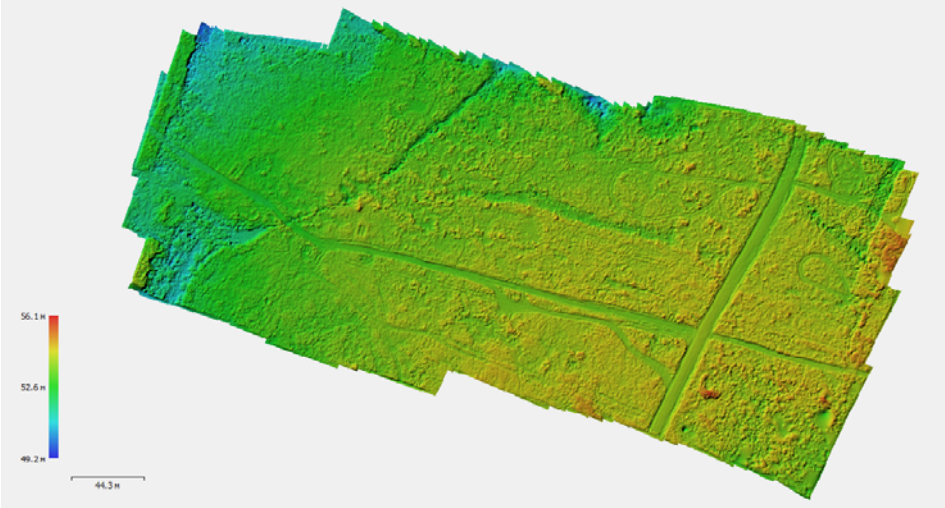


Рис. 2. Карта высот

Точность полученного ортофотоплана составила 0,15 м в плане и по высоте, что соответствует установленным критериям точности мониторинга земельных защитных сооружений магистрального трубопровода (рис. 3) [1].

В результате проделанной работы сделан вывод о том, что данные полученные с БВС Геоскан 401 пригодны для проведения исследований состояния защитных сооружений магистральных трубопроводов, а точность результатов обработки снимков соответствует установленным критериям [1].

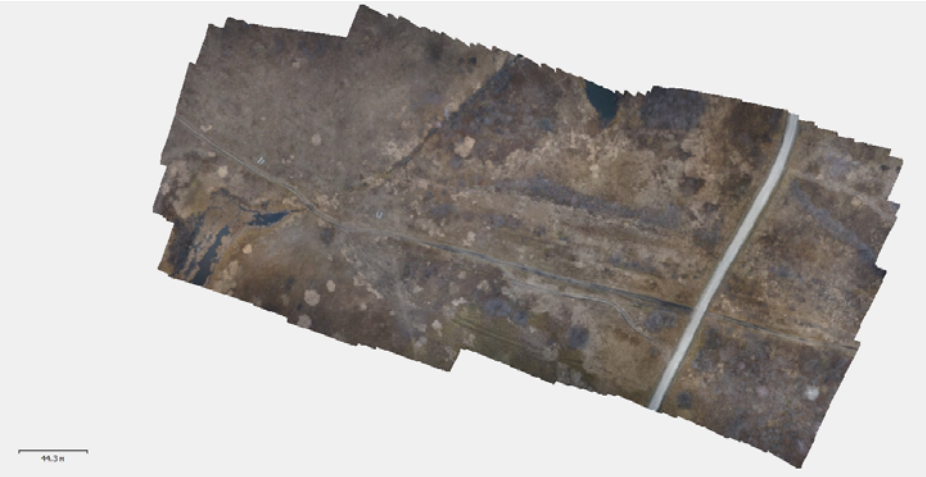


Рис. 3. Полученный ортофотоплан в Agisoft Metashape

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. Еськов Д. Ю., Шляхова М. М. Риски и причины развития аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах // Регулирование земельно-имущественных отношений в России. Национальная науч.-практ. конф., 2021. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 1. С. 28–33.

3. Дедкова В. В., Шляхова М. М. Мониторинг технического состояния магистральных трубопроводов методами дистанционного зондирования // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Междунар. науч. конф., Красноярск, 29 сент. – 2 окт. 2020. С. 192–195.

4. Шляхова М. М., Дедкова В. В. Перспективы применения аэросъемок для контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Междунар. науч. конф., Красноярск, 29 сент. – 2 окт. 2020. Красноярск, 2020. С. 316–319.

M. M. Shlyahova, V. V. Dedkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: plazma_space@mail.ru, v.v.dedkova@sgugit.ru

MONITORING OF THE MAIN PIPELINES' PROTECTIVE STRUCTURES BASED ON AERIAL SURVEY FROM GEOSCAN 401 UAV

The article describes the experience of using the Geoscan 401 unmanned aerial vehicle for aerial survey of protective structures of main pipelines, and also describes the photogrammetric processing of obtained images in the Agisoft Metashape software. The resulting orthophotoplan corresponds to required accuracy of monitoring and can be used to study the state of the protective structures of main pipelines.

Keywords: aerial survey, unmanned aerial vehicle, main pipeline, protective structures, digital camera.

УДК 528.88, 630

А. С. Шушпанов[1,3], А. С. Голюков[1,2], И. А. Петров[1]

[1]Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[3]Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия
e-mail: jedirevan@ya.ru

ГОРИМОСТЬ СЕВЕРНЫХ СОСНЯКОВ СИБИРИ В МЕНЯЮЩЕМСЯ КЛИМАТЕ

Аннотация. В работе исследована связь горимости северных сосновых насаждений с эколого-климатических переменными. Данные о горимости получены на основе данных FIRMS. В работе использовались как спутниковые данные о водной массе (GRACE), модельные – ERA5-Land и индексы засухи SPEI и scPDSI. Зафиксированы значимые корреляционные связи между количеством и площадями гарей и эколого-климатическими факторами (влагосодержание в почве и водной массы на всей глубине влагосодержания, температура приземного воздуха и количество осадков, индексы SPEI и PDSI). Анализ динамики индекса EVI, валовой (GPP) и чистой (NPP) первичной продуктивности, указывает на то, что растительному покрову необходимо примерно 10-15 лет для восстановления до допожарного уровня.

Ключевые слова: FIRMS, гари, сосна, климатические изменения.

В ряде работ отмечается увеличение площадей пожаров по всей бореальной зоне, которые ежегодно наносят вред древесной растительности [1–4]. Одной из основных причин увеличения количества и площади пожаров являются изменения климата, в частности, возрастание аридности [5, 6].

Цель работы: исследование горимости северных сосновых насаждений и ее связь с эколого-климатических переменными.

Объект исследования находится в пределах Кеть-Сымской низменности. Заболоченность территории, местами составляя в среднем 55–60 %, может достигать 80 %. Тип климата – резко континентальный, с суровой и снежной зимой и умеренно теплым влажным летом. Средняя температура января −33 °С. Лето умеренно теплое, средняя температура июля +16 °С. Продолжительность безморозного периода 75 суток. Осадки преимущественно летние, количество их колеблется от 400–600 мм [7]. Полевые работы проводились в окрестностях с. Зотино Туруханского района (60°55' с.ш., 89°40' в.д.). Объектами исследований служили сосняки лишайникового и лишайниково-зеленомошного типа.

Материалы и методы. В работе использовались данные об аномальных температурах (хотспоты) FIRMS (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/) с достоверностью больше 50 %. В процессе предобработки «хотспоты» за каждый год, были преобразованы в полигоны и объединены, для получения векторных карт территорий, пройденных огнем (гарей). На следующем этапе полученные

© Шушпанов А. С., Голюков А. С., Петров И. А., 2022

векторные карты были обрезаны по границам района исследования и сосновых насаждений, местоположение которых определено по данным полученным с сервиса VEGA-PRO (за 2010 год) (http://pro-vega.ru/). Для полигонов были рассчитаны их площади в гектарах (га) и подсчитана статистика по гарям неоднократно пройденными пожарами.

Атмосферная засуха была оценена с помощью ежемесячных данных об индексе засухи SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; представляет разницу между осадками и потенциальной эвапотрансперацией) и индекса засухи Палмера (scPDSI). Ежемесячные значения SPEI и scPDSI имеют пространственные разрешения 1°×1° и были получены из баз данных http://sac.csic.es/spei и https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/database для периодов 1950–2020 и 1901–2020 гг. соответственно. В анализе используются среднемесячные модельные данные по температуре, осадкам и влагосодержания почвы (на глубине до 28 см), полученные в рамках проекта ERA5-Land (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp). Данные имеют пространственное разрешение 0,1°×0,1° и доступны с 1950 г. Информация о водной массе на всей глубине влагосодержания представлены аномалиями водного эквивалента массы (АВЭМ), полученных на основе данных спутников GRACE/GRACE-FO, середнемесячный продукт версии RL06 и уровня обработки Level 3, имеющие пространственное разрешение 1°×1° (http://www.grace.jpl.nasa.gov; для 2002–2020).

Валовая первичная продуктивность (Gross Primary Productivity – GPP) и чистая первичная продуктивность (Net Primary Productivity – NPP) получены из продуктов MOD17A2H и MOD17A3H. Данные GPP представляют собой набор 8-дневных композитов с пространственным разрешением 500 метров. NPP рассчитывается на основе 8-дневных композитов значений GPP и являются годовыми с пространственным разрешением 500 метров (https://search.earthdata.nasa.gov/search). В работе также использовались данные улучшенного вегетационного индекса (Enhanced Vegetation Index – EVI) – развитие индекса NDVI, за счет оптимизации сигнала вегетации в районах с высоким индексом площади листьев (LAI). Данные представляют собой набор 16-дневных композитов (продукт MOD13Q1) с пространственным разрешением 250 м (https://search.earthdata.nasa.gov/search). Данные о GPP, NPP и EVI были объединены пространственно и по времени в композитный слой, покрывающий всю территорию исследования за весь интересующий период. Далее из них и климатических данных были извлечены значения из пикселей в местах с гарями для обработки в Excel.

Результат. Установлено, что наибольшая площадь гарей в период 2001–2020 гг. была зафиксирована в 2012 г. Наибольшее число пожаров приходилось на июнь-июль, пожароопасный период длился с апреля по сентябрь. Количество пожаров и площадь гарей коррелирует с засушливостью в регионе (за период 2001–2020 гг.). Значимые корреляции наблюдаются между количеством гарей и индексом scPDSI, осадками и влагосодержанием почвы, а также с SPEI и АВЭМ в июне-августе.

Площади пожаров также коррелируют с температурой воздуха, но связи с индексом SPEI не зафиксировано (рис. 1).

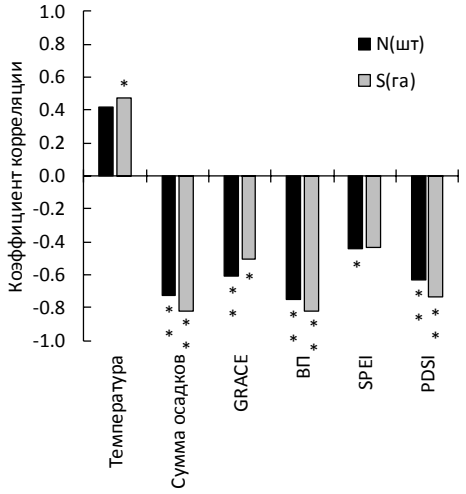


Рис. 1. Коэффициенты корреляции Спирмена между количеством возгораний (N) и площадью гарей (S) и климатическими переменными июня-августа (* – связь значима при $p < 0.05$; ** – связь значима при $p < 0.01$)

Индекс EVI, валовая (GPP) и чистая (NPP) первичная продуктивность, характеризующие состояние растительности и уровень ее продуктивности, снижаются в год пожара и следующий (на основе данных ~3 500 гарей). Восстановление уровня EVI, GPP и NPP происходит постепенно в течение 10–15 лет. Этот результат подтверждается наземными исследованиями, где ширина годичных колец снижается в год пожара, достигает локального минимума в последующий год. Ширина годичных колец восстанавливается до допожарного уровня примерно через 10–15 лет (рис. 2).

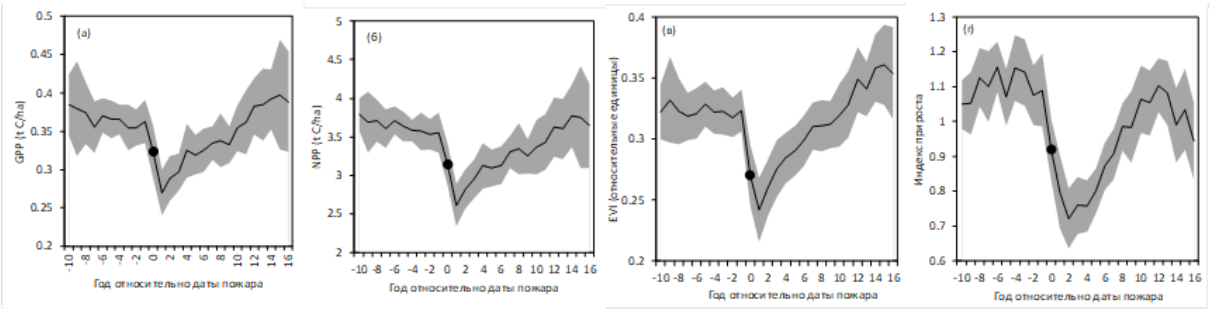


Рис. 2. Динамика усредненной по всем гарям продуктивности (*а* – GPP; *б* – NPP), вегетационного индекса (*в*) и годичного прироста (*г*) относительно года пожара (отмечен точкой)

Заключение. Зафиксированы значимые корреляционные связи между количеством и площадями гарей и эколого-климатическими факторами (влагосодержание в почве и водной массы на всей глубине влагосодержания, температура приземного воздуха и количество осадков, индексы SPEI и PDSI). Анализ динамики индекса EVI, валовой (GPP) и чистой (NPP) первичной продуктивности указывает на то, что растительному покрову необходимо примерно 10–15 лет для восстановления допожарного уровня.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-44-240007.

Список литературы

1. Shvidenko A. Z., Nilsson S. Extent, Distribution, and Ecological Role of Fire in Russian Forests. In Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest // Ecological Studies (Analysis and Synthesis); Kasischke E. S., Stocks B. J., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2000. Vol. 138.

2. Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Glob. Chang. Biol. 2009. 15. P. 549–560.

3. McCarty J. L., Aalto J., Paunu V.-V., Arnold S. R., Eckhardt S., Klimont Z., Fain J. J., Evangeliou N., Venäläinen A., Tchebakova N. M., et al. Reviews and syntheses: Arctic fire regimes and emissions in the 21st century // Biogeosciences. 2021. 18. P. 5053–5083.

4. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. 50. P. 1953–1974.

5. Shi K., Touge Y., 2022 Characterization of global wildfire burned area spatiotemporal patterns and underlying climatic causes. Scientific Reports 12: 644. https://doi.org/10.1038/s41598-021-04726-2

6. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O. et.al. (eds.) IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

7. Winderlich J., Chen H., Gerbig C., Seifert T., Kolle O., JLavric. V., Kaiser C., Hofer A., Heimann M. Continuous low-maintenance CO2/CH4/H2O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia Atmos. Meas. Tech. 2010. 3. P. 1113–1128. doi:10.5194/amt-3-1113-2010

A. S. Shushpanov[1,3], A. S. Golyukov[1,2], and I. A. Petrov[1]

[1]Forest Institute named after V. N. Sukacheva 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: jedirevan@ya.ru

BURNABILITY OF THE NORTHERN PINE FORESTS OF SIBERIA IN A CHANGING CLIMATE

In the work on the study of the relationship between the burning of northern pine plantations and ecological and climatic variables. The flammability data was obtained from FIRM data. Observations are in progress as satellite data on water mass (GRACE), model data – ERA5-Land and drought indices SPEI and scPDSI. Significant correlations were recorded between the relationship between cold and areas of burnt areas and environmental and climatic factors (moisture content in soil and water mass at the entire depth of moisture content, surface air temperature and the number of fluctuations, SPEI and PDSI indices). Analysis of the evolution of the EVI index, gross (GPP) and net (NPP) primary productivity, the shock that the vegetation cover needs about 10–15 years to recover to pre-fire levels.

Keywords: FIRMS, fire, pine, climate change.

УДК 528.8

О. Э. Якубайлик[1], В. Ю. Ромасько[2], Е. А. Павличенко[2], М. Г. Ерунова[1], А. С. Кузнецова[2]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
[2]ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: oleg@icm.krasn.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА NDVI ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT/SENTINEL

Аннотация. Представлены результаты разработки инструментальных программных средств для автоматизации расчета вегетационного индекса NDVI по доступным данным ДДЗ. Задача автоматизации расчета NDVI решается в несколько этапов: создание базы данных ДДЗ по спутниковым снимкам Landsat 8/9 и Sentinel-2A/B на исследуемую территорию; формирование временного ряда значений NDVI по отдельным полям с вычислением их статических характеристик, с учетом облачности; построение трендов NDVI для каждого поля в течении всего вегетационного периода. Разработанное программно-технологическое обеспечение работает полностью в автоматизированном режиме.

Ключевые слова: агромониторинг, вегетационный индекс, тренд NDVI, база данных ДДЗ, геопространственные данные.

Ключевой задачей цифровизации в сельском хозяйстве становится максимальная автоматизация всех этапов сельскохозяйственного производства. Речь идет о развитии информационно-вычислительной инфраструктуры, разработке и внедрении технологий, прикладного программного обеспечения для решения различных актуальных задач агропромышленного комплекса (АПК) [1]. Важнейшим элементом формируемых информационных ресурсов АПК, систем агромониторинга являются данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) [2].

В качестве основного показателя о росте и развитии сельскохозяйственных культур применяется спектральный нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), который показывает состояние роста сельскохозяйственных культур [3], прогнозирование урожайности [4] и т. д. Автоматизированный доступ и анализ трендов NDVI позволяют отслеживать позитивную и негативную динамику развития растений хозяйства [2] в течении всего вегетационного периода для каждого поля.

В настоящей работке в качестве исходных данных использовались цифровые карты сельскохозяйственных полей трех опытно-производственных хозяйств (ОПХ), входящих в состав ФИЦ КНЦ СО РАН: «Курагинское», «Михайловское», «Минино» [5], спутниковые данные Landsat 8/9 и Sentinel 2A/B, которые скачивались с сайтов ESA

© Якубайлик О. Э., Ромасько В. Ю., Павличенко Е. А., Ерунова М. Г., Кузнецова А. С., 2022

[https://www.esa.int/] и Copernicus Open Access Hub [https://scihub.copernicus.eu/]. Скачивание полностью автоматизировано с помощью оригинальной программы, написанной на языке Python, которая запускается по расписанию. Эта программа производит поиск сцен на районы интереса, заказывает архивные данные, скачивает ещё не скачанные готовые архивные и оперативные сцены в хранилище исходных данных, проверяет их целостность.

Подготовка данных включает несколько этапов: 1) загрузку данных из их исходных форматов данных, 2) определение попадания в район интереса, 3) преобразование значений физических величин пикселей в принятый стандарт представления, 4) проектирование в стандартные проекцию на районы интереса, 5) сборку в единые сцены отдельных сцен Landsat/Sentinel и 6) сохранение растров в стандартном формате GeoTIFF и метаданных в хранилище растровых данных (рис. 1). Весь процесс подготовки данных полностью автоматизирован в составе специального сервиса актуализации растровых данных, написанного на языке C++. Чтение исходных форматов файлов и сохранение растров в формате GeoTIFF производится с применением библиотеки GDAL [6], для всех остальных операций используются оригинальные алгоритмы. Помимо значений отдельных каналов также подготавливаются данные классификации пикселей и выделения облачности, которые входят в состав сцен соответствующих уровней обработки.

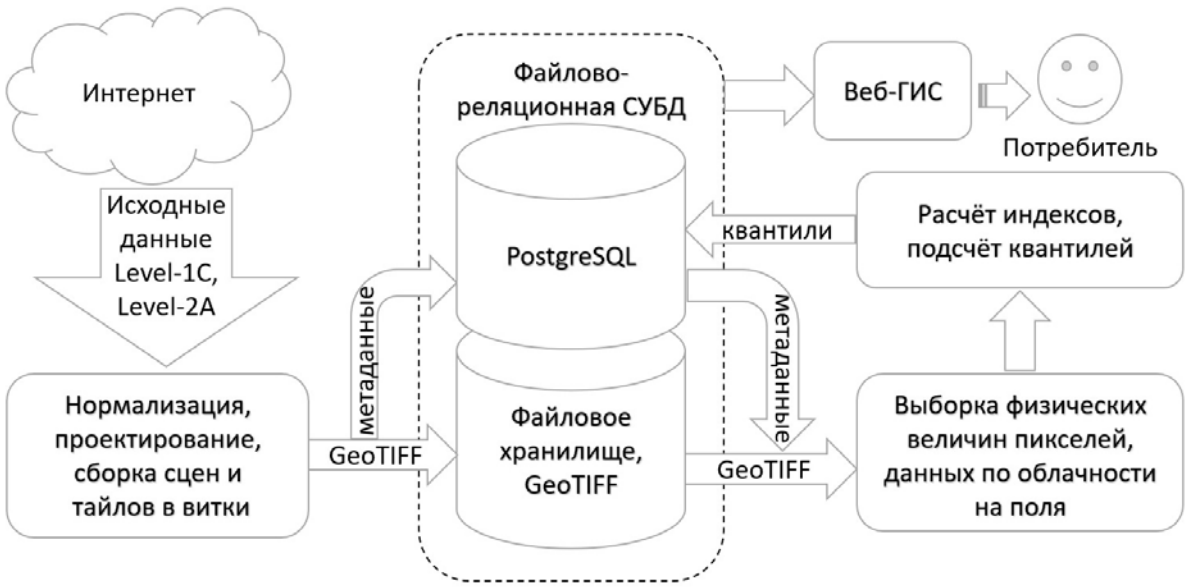


Рис. 1. Схема автоматизированного формирования базы растровых ДДЗ среднего и низкого разрешения

Расчёт вегетационных индексов и их статистических характеристик производится автоматически программой, написанной на языке Python и запускаемой по расписанию. Для выборки данных программа использует специальные модули для языка Python, написанные на языке C++ и скрывающие детали организации хранилища растровых данных.

Выборки данных на поля включают как пиксельные данные исходных каналов, необходимые для расчёта вегетационного индекса, так и данные, необходимые для маскирования облачности. Вегетационный индекс рассчитывается только для безоблачных пикселей поля. Затем определяются квантили распределения значений NDVI поля. Квантили вместе с размером безоблачной выборки заносятся в СУБД для каждого поля и каждой даты. Такой набор данных в дальнейшем позволяет получить статистические характеристики значений NDVI каждого поля и оценить размер выборки данных как долю поля.

На рис. 2 приведены данные автоматизированного расчета NDVI для поля № 12 ОПХ «Курагинское» за 2021 г. (сельскохозяйственная культура – пшеница). Точками на графике показаны значения NDVI, вычисленные по всем доступным снимкам выбранного поля: безоблачные сцены – оранжевые треугольники, сцены с облачностью – синие точки. Линия тренда, показанная красной линией, имеет достоверность аппроксимации $R^2 = 0{,}88$.

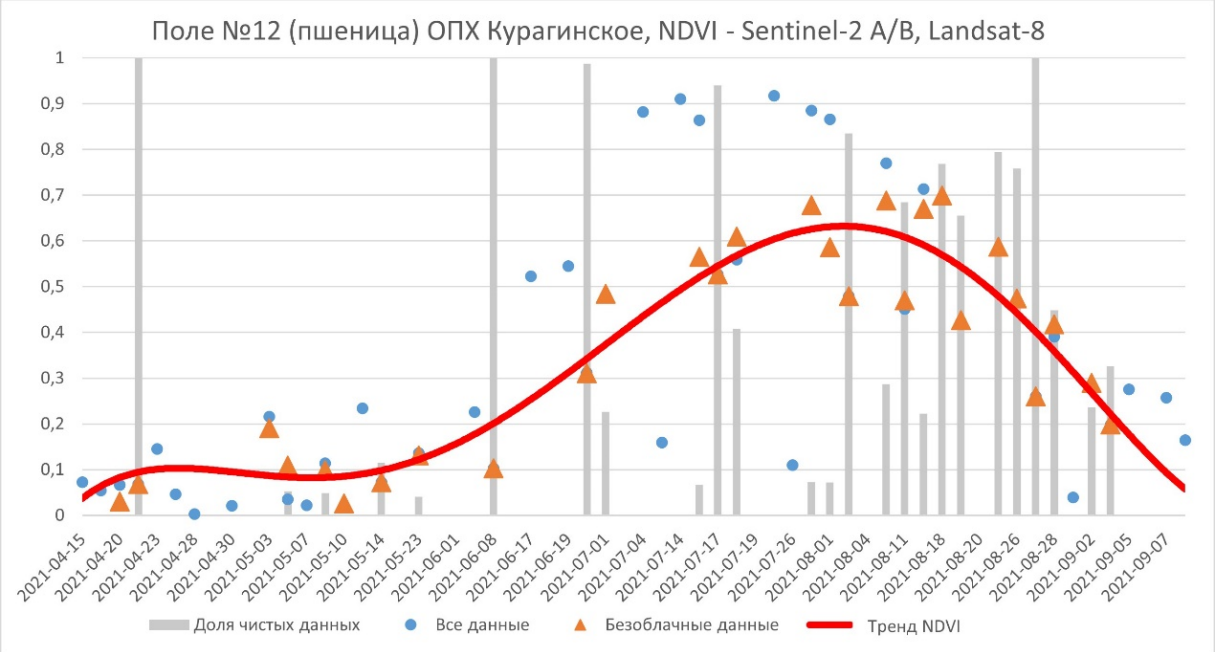


Рис. 2. Результат автоматизированного расчета NDVI для поля 12 ОПХ «Курагинское»

По тренду индекса NDVI на приведенном графике можно отследить постепенное наращивание биомассы в период с 23 мая по 4 августа. Далее наблюдается спад значений индекса NDVI, характерный для пшеницы в период спелости культуры вплоть до момента сбора урожая.

Основной вывод по выполненной работе состоит в следующем. Периодичность спутниковой съемки Landsat 8/9, Sentinel-2A/B и количество безоблачных данных (погодные условия) в целом является достаточной для автоматизированного агромониторинга сельхозугодий юга Красноярского края. Дальнейшее развитие работы – это использование ежедневных спутниковых данных низкого пространственного разрешения

(MODIS, VIIRS) для интерполяции значений NDVI на те даты, на которые отсутствуют безоблачные сцены со спутников Landsat/Sentinel-2 [7, 8].

Список литературы

1. Amirova E. F. et al. Digitalization in agriculture: problems of implementation // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2021. Vol. 13. № 6. P. 144–155.

2. Loupian E. A. et al. Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in spring of 2018 with use of remote monitoring // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. Vol. 15. № 2. P. 272–276.

3. Morgounov A. et al. Association of digital photo parameters and NDVI with winter wheat grain yield in variable environments // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. Turkiye Klinikleri Journal of Medical Sciences, 2014. Vol. 38. № 5. P. 624–632.

4. Magney T. S. et al. Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality // Agricultural and Forest Meteorology. Elsevier, 2016. Vol. 217. P. 46–60.

5. Ерунова М. Г., Симакина А. С., Якубайлик О. Э. Создание базы данных для точного земледелия ОПХ «Курагинское» // Вестник КрасГАУ. 2022. № 1. С. 13–20. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-13-20.

6. Rouault E. et al. GDAL. 2022.

7. Zhou F., Zhong D. Kalman filter method for generating time-series synthetic Landsat images and their uncertainty from Landsat and MODIS observations // Remote Sensing of Environment. Elsevier, 2020. Vol. 239. P. 111628.

8. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. 1960. Vol. 82. № 1. P. 35–45.

O. E. Yakubailik[1], V. Y. Romas'ko[2], E. A. Pavlichenko[2] M. G. Erunova[1], A. S. Kuznetsova[2]

[1]Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
[2]Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», Krasnoyarsk, Russia
e-mail: oleg@icm.krasn.ru

AUTOMATION OF NDVI CALCULATION BASED ON LANDSAT/SENTINEL SATELLITE DATA

The results of the development of instrumental software tools for automating the calculation of the vegetation index NDVI based on available remote sensing data are presented. The task of automating the calculation of NDVI is solved in several stages: creation of the NDVI database based on Landsat 8/9 and Sentinel-2A/B satellite images for the studied area; formation of a time series of NDVI values for individual fields with calculation of their static characteristics taking into account clouds; construction of NDVI trends for each field throughout the growing season. The developed software and technological support work completely in automated mode.

Keywords: agromonitoring, vegetation index, NDVI trend, remote sensing database, geospatial data.

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ

УДК 519.6

В. М. Белолипецкий[1], С. Н. Генова[2]

[1]Доктор физико-математических наук, ИВМ СО РАН, обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

[2]Кандидат технических наук, ИВМ СО РАН, обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: belolip@icm.krasn.ru, sv@icm.krasn.ru

ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ НАД Г. КРАСНОЯРСКОМ

Аннотация. Существенное влияние на перенос и рассеивание примесей в атмосфере оказывают метеоусловия. Для прогноза погоды применяются мезомасштабные математические модели, которые, как правило, включают нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики и отличаются различными подходами параметризации атмосферных процессов.

Резкое возрастание концентраций загрязняющих веществ происходит в период возникновения неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению в нижних слоях атмосферы промышленных и автомобильных выбросов, а также выбросов частного сектора. К таким неблагоприятным условиям относится температурная инверсия, представляющая собой задерживающий слой теплого воздуха.

Для оценки характеристик температурных инверсий в пограничном слое атмосферы г. Красноярска предлагается полуэмпирический алгоритм, основанный на уравнении притока тепла.

Ключевые слова: температурная инверсия, загрязнение атмосферы, полуэмпирический алгоритм.

Введение

Над крупными населенными пунктами наблюдаются высокие концентрации загрязняющих веществ. К наиболее загрязненным городам страны относится г. Красноярск. Актуальной проблемой является оценка качества воздуха [1, 2]. Оценка влияния различных типов источников выбросов на формирование неблагоприятных условий возможна на основе применения современных расчетных моделей переноса примесей в атмосфере, анализа данных наземных и спутниковых измерений и реанализа данных.

Существенное влияние на перенос и рассеивание примесей в атмосфере оказывают метеоусловия. Для прогноза погоды над ограниченной территорией с достаточно высоким разрешением применяются мезомасштабные математические модели [3–6], включающие

© Белолипецкий В. М., Генова С. Н., 2022

нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики и отличающиеся различными подходами параметризации атмосферных процессов. Широкое распространение получила мезомасштабная модель WRF (Weather Research and Forecasting, США [5], которая активно применяется для решения многих практических задач.

Особый интерес представляют температурные инверсии. Температурная инверсия – повышение температуры воздуха с высотой вместо обычного понижения. Инверсия температуры препятствует вертикальным перемещениям воздуха и способствует образованию смога. Инверсия существенно зависит от местных особенностей рельефа. Увеличение температуры в инверсионном слое колеблется от десятых долей градуса до 15–20 °С и более. Если повышение температуры начинается непосредственно от поверхности земли, инверсию называют приземной, если с некоторой высоты над поверхностью земли – приподнятой. Наибольшей мощностью обладают приземные инверсии температуры в зимний период.

Численный алгоритм

Данные наблюдений показывают, что повышенный уровень загрязнения воздуха города Красноярска в наибольшей степени проявляется в зимний период при слабом ветре (не более 2 м/с) и при температурной инверсии.

Для оценки термической структуры атмосферного пограничного слоя над территорией г. Красноярска предлагается полуэмпирический алгоритм, основанный на уравнении притока тепла. Используются результаты прогнозов погоды (температуры воздуха) по мезомасштабным моделям.

Теоретической основой модели температурной инверсии является уравнение притока тепла для слабого ветра. Для адиабатических процессов в атмосфере с учетом не адиабатических источников уравнение притока тепла имеет вид [7]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = w(\hat{\gamma} - \gamma_a) + \varphi, \tag{1}$$

здесь $T(t, z)$ – температура воздуха (^{0}C); γ_a – адиабатический градиент температуры; $\hat{\gamma}(t)$ – реальный градиент температуры; t – время; z – вертикальная координата; w – параметр, характеризующий вертикальные движения (калибровочный параметр модели); φ – не адиабатические источники тепла (калибровочный параметр модели).

$$\hat{\gamma} = -\frac{1}{H}\int_0^H \frac{\partial T}{\partial z}\,dz = \frac{T_0 - T_H}{H}, \tag{2}$$

H – высота рассматриваемого слоя, $T_0 = T|_{z=0}$, $T_H = T|_{z=H}$.

Из (1), (2) следует

$$\frac{\partial T}{\partial t} = w\left(\frac{T_0 - T_H}{H} - \gamma_a\right) + \varphi. \tag{3}$$

Для уравнения (3) задаются начальные и граничные условия:

$$T|_{t=0} = T^0(z), \qquad T|_{z=0} = T_0(t). \tag{4}$$

Для калибровки параметров модели w, φ необходимо задать еще два условия:

$$T|_{z=H,t=t1} = T_{H1}, \quad T|_{z=H,t=t2} = T_{H2}. \tag{5}$$

Численное решение задачи (3), (4):

$$T_h^{n+1} = \frac{T_h^n + \frac{\Delta t \cdot w}{h}(T_0^{n+1} - \gamma_a h) + \Delta t \cdot \varphi}{1 + \frac{\Delta t \cdot w}{h}} \tag{6}$$

$0 < h \le H$.

Сформулированная задача решается методом стрельбы [8]. Выбираются начальные w^0, φ^0, решается прямая задача (6). Вычисленные значения $T_H(t_1)$, $T_H(t_2)$ сравниваются с T_{H1}, T_{H2}. После многократных расчетов находятся значения w, φ, для которых

$$|T_H(t_1) - T_{H1}| \le \varepsilon, \qquad |T_H(t_2) - T_{H2}| \le \varepsilon.$$

Численные эксперименты, выводы

Целью работы является оценка характеристик температурных инверсий в пограничном слое атмосферы г. Красноярска. Предлагается оценить термическую структуру атмосферного пограничного слоя в г. Красноярске с помощью описанного полуэмпирического алгоритма. Верификация и калибровка алгоритма выполнена с использованием данных о температуре воздуха в Красноярске в декабре 2021 г. (http://air.krasn.ru/mtp5/).

Так для прогноза термической структуры атмосферного пограничного слоя на временном интервале 15–21 декабря использовались результаты прогноза температуры воздуха по мезомасштабным моделям (http://rp5.in/ Архив_погоды_в_Красноярске). По натурным данным температурная инверсия возникла 20 декабря (в 3:00) с интенсивностью ΔT = 2–10 °C. По предлагаемому алгоритму инверсия образовалась 19 декабря (в 16:00) с интенсивностью 2–4 градуса.

В прогнозах погоды нет информации о вертикальных профилях температуры. Предлагаемый метод позволяет определить по прогнозу погоды, возникнет или разрушится температурная инверсия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-21-20117.

Список литературы

1. Хлебопрос Р. Г., Тасейко О. В., Иванова Ю. Д., Михайлюта С. В. Экологические очерки: монография, Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 130 с.

2. Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э. Применение данных дистанционного зондирования для оценки экологической обстановки в Красноярске // 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. С. 208–211.

3. Старченко А. В. Численное исследование локальных атмосферных процессов // Вычислительные технологии. Т. 10. Специальный выпуск: Труды междунар. конф. и школы молодых ученых «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде» (CITES 2005). Томск, 13–23 марта 2005 г. Ч. 2. 2. 2005.

4. Хребтов М. Ю., Гаврилов А. А., Дектерев А. А., Тэпфер Е. С. Разработка математической модели динамики атмосферы и распространения вредных выбросов над г. Красноярском // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 8. С. 1000–1006.

5. Ахметшина А. С. Инверсии температуры воздуха как фактор, влияющий на уровень загрязнения пограничного слоя атмосферы (на примере г. Томска): канд. геогр. наук. г. Томск. 2015. 210 с.

6. Старченко А. В., Барт А. А., Кижнер Л. И., Данилкин Е. А. Мезомасштабная метеорологическая модель TSUNM3 для исследования и прогнозирования состояния метеопараметров приземного слоя атмосферы над крупным населенным пунктом // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех. 2020. № 66. С. 35–55.

7. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 751 с.

8. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука. 1978. 512 с.

V. M. Belolipetskii[1], S. N. Genova[2]

[1,2]ICM SB RAS, a subdivision of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: belolip@icm.krasn.ru, sv@icm.krasn.ru

THE ATMOSPHERE THERMAL STRUCTURE ESTIMATION OVER KRASNOYARSK

Weather conditions have a significant impact on the transfer and dispersion of impurities in the atmosphere. Mesoscale mathematical models are used for weather forecasting, which, as a rule, include non-stationary three-dimensional equations of hydrothermodynamics and differ in different approaches to parametrization of atmospheric processes.

A sharp increase in pollutant concentrations occurs during the period of unfavorable meteorological conditions that contribute to the accumulation of industrial and automobile emissions, as well as emissions from the private sector in the lower layers of the atmosphere. Temperature inversion (retaining layer of warm air) refers to such unfavorable conditions.

To estimate the characteristics of temperature inversions in the boundary layer of the atmosphere of Krasnoyarsk, a semi-empirical algorithm based on the heat inflow equation is proposed.

Keywords: temperature inversion, atmospheric pollution, semi-empirical algorithm.

УДК 528.871 : 550.8.05 : 553.98

А. Ю. Белоносов[1,3], А. Е. Кудрявцев[2,3]

[1]Кандидат технических наук, Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия
[2]Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия
[3]Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
e-mail: belonosov74313@mail.ru, kudryavtsevae85@mail.ru

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЗЗ ИЗ КОСМОСА ПРИ ОЦЕНКЕ ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАЙОНОВ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ)

Аннотация. Для оценки перспектив нефтегазоносности на периферийных частях Западно-Сибирской плиты, авторами рассматриваются два тектонических фактора: системы глубинных разломов и интрузивные магматические тела, внедрившиеся в осадочный чехол. Для их обнаружения используется комплект материалов ДЗЗ из космоса, геолого-геофизические и геолого-промысловые данные. Выявлена региональная Таро-Печорская зона глубинных вулканогенных образований, которая трассируется от Республики Коми до Новосибирской области и имеет северо-западную ориентировку. Осуществлена оценка перспектив нефтегазоносности осадочного чехла в Уватском районе Тюменской и в северо-западной части Омской областей.

Ключевые слова: дешифрирование материалов ДЗЗ, геолого-геофизические данные, системы разломов, интрузивные магматические тела, оценка перспектив нефтегазоносности, месторождения углеводородов.

Мантийные конвективные процессы преобразовывают вещество верхней мантии из твёрдого состояния в жидкое, активизируя тектоно-магматическое влияние на земную кору. Вследствие этого, происходит тектоническая перестройка последней, формируются системы тектонических разломов, создавая вертикально- и горизонтально-подвижные блоки, усиливается флюидодинамический процесс внедрения магматических тел по разломам, начинают действовать метасоматические процессы на границах магматических интрузий и вмещающих пород, повышается и расширяется прогрев и, соответственно, превращение органического вещества, увеличивается вертикальная миграция флюидов, включаются процессы заполнения структурных и литологических ловушек углеводородами, в геологическом разрезе происходят эпигенетические изменения горных пород, а на земной поверхности отображаются геофизические, геохимические, геотермические и другого рода аномалии. Восходящий поток флюидов, несущий вещество (в том числе и УВ) и тепло из земных недр в приповерхностные горизонты, проецируется на

© Белоносов А. Ю., Кудрявцев А. Е., 2022

земной поверхности в виде тепловых аномалий. Их можно зафиксировать современными высокочувствительными системами и методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, используя широкий спектр электромагнитных волн [1, 2].

Основными тектоническими факторами, связанными с формированием залежей УВ, являются глубинные разломы (или их системы) и интрузивные магматические тела (батолиты, штоки, дайки), внедрившиеся в осадочный чехол.

Выявление и картографирование систем региональных глубинных разломов и погребённых вулканогенных образований осуществлялось посредством тектонического дешифрирования: а) сбора, обработки и интерпретации материалов ДЗЗ из космоса (съёмки в видимом, ближнем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне, спектрозональные снимки); б) анализа результатов геолого-геофизических исследований (топографические основы различных масштабов, наборы геологических и тектонических карт и схем, карты гравитационного и магнитного полей, наборы геотермических карт по срезам, карты глубинного теплового потока по данным скважинных исследований различных авторов, сейсмогеологические карты и разрезы по стратиграфическим горизонтам осадочного чехла).

Для оценки перспектив нефтегазоносности исследуемой территории использованы результаты тектонического дешифрирования материалов ДЗЗ и геолого-промысловые данные (описание керна и шлама из поисково-разведочных скважин, каротажные материалы геофизических исследований скважин и результаты их интерпретации по насыщению потенциально-продуктивных пластов, результаты испытания пластов и другие данные).

Для решения вышеуказанных задач были использованы карты контрастов ночной температуры земной поверхности, RGB цветовые композиты различных параметров, результаты линеаментного анализа, анализа кольцевых структур, результаты решения прямой и обратной задач геофизических полей, цифровая модель рельефа земной поверхности (ЦМР), результаты районирования территории исследований по различным признакам [1–4].

По результатам линеаментного анализа была выделена региональная зона с северо-запада на юго-восток, которая протянулась от места перелома Уральской горной системы (гора Народная), вдоль р. Ляпин, р. Северная Сосьва, вдоль северо-западного течения р. Обь, через устье р. Иртыш, вдоль границы ХМАО и юга Тюменской области, пересекая границу Омской области до п. Тара. Признаки продолжения этой зоны наблюдаются в северо-западном направлении до одного из колен р. Печора (Республика Коми). Поэтому она получила название – Таро-Печорская зона.

В пределах этой зоны, на земной поверхности, по ряду диагностических (геоморфологических) признаков, выделены многочисленные кольцевые структуры различного диаметра.

На карте контрастов ночной температуры земной поверхности данная зона отчётливо проявляется на территории Республики Коми, а также ХМАО до впадения р. Иртыш в р. Обь. Далее на юго-восток в сторону границ Тюменской и Омской областей – она не прослеживается. Аналогичная картина отображения этой зоны отмечается на цветовом RGB композите (ночные температуры, ЦМР и коэффициент спектральной яркости (ближний ИК-диапазон)), составленном из уравненных мозаик на территорию Западно-Сибирской плиты (ЗСП) и её обрамления.

На карте районирования территории ЗСП и её обрамления, выполненной на основе безэталонной классификации (признаки – ночные температурные контрасты, ЦМР, глубина подошвы земной коры, средняя плотность коры), Таро-Печорская зона полностью чётко отображается от р. Печора до п. Тара.

На карте современного рельефа (ЦМР) она проявляется частично, от колена р. Печора, через узел перелома Уральского хребта (гора Народная), вдоль р. Ляпин, р. Северная Сосьва, вдоль северо-западного течения р. Обь до устья р. Иртыш.

Однако, на карте глубины поверхности Мохо (подошва земной коры), построенной по данным гравиметрических и сейсмических исследований, она на всём своём протяжении чётко отображается в виде крупного регионального грабен-рифта северо-западного направления и осложнёна отдельными горстами более мелкого порядка.

Таким образом, можно сделать вывод, что Таро-Печорская зона имеет глубинное заложение.

Согласно тектонической карты доюрского фундамента ЗСП [5] Таро-Печорская зона прослеживается на северо-западе – в пределах Сысконсыньинского унаследованного синклинория, далее – вдоль юго-западной границы Уват-Хантымансийского древнего массива, а затем – в пределах Верхне-Демьянского инверсионного антиклинория.

Сысконсыньинский унаследованный синклинорий осложнён мелкими по размерам интрузивными телами ультраосновного состава. В его пределах открыто два месторождения: газоконденсатное и нефтегазовое.

Уват-Хантымансийский древний массив осложнён средними по размерам интрузивными телами кислого и среднего состава (гранитоиды и базиты). В его пределах открыто порядка десяти месторождений УВ, преимущественно – нефтяных.

Верхне-Демьянский инверсионный антиклинорий осложнён мелкими и средними по размерам интрузивными телами кислого, среднего и ультраосновного состава (граниты, габброиды, серпентиниты). Большинство интрузивных тел приурочены к системе разломов северо-западного направления. В пределах антиклинория открыто порядка сорока трёх нефтяных месторождений и одно – нефтегазоконденсатное. Видимо, это связано с различным вещественным составом интрузий и вмещающих горных пород.

На территории Омской области, в пределах Таро-Печорской зоны, открыто пока всего одно месторождение УВ – Тайтымское нефтяное. Следует отметить, что оно тяготеет к дайке серпентинитов, которая, в свою очередь, приурочена к системе разломов северо-западного и северо-восточного направлений.

Тайтымская структура была выявлена по данным сейсморазведки 2D. Скважина-первооткрывательница была пробурена на склоне антиклинальной структуры. Последующие три скважины, в пределах структуры, притока нефти не дали. После проведения сейсморазведки 3D оказалось, что как таковая антиклинальная структура отсутствует. То, что считалось антиклинальной структурой, оказалось роем даек в системе мелких разломов северо-западного и северо-восточного направлений. Следующая скважина, пробуренная в зоне дайки в фундаменте, дала приток нефти из вышележащих юрских осадочных пород тюменской свиты.

На территории Омской области, зона Таро-Печорских вулканических образований (продолжение Верхне-Демьянского антиклинория на уровне поверхности доюрского фундамента) протягивается до северо-западной части Новосибирской области. В её пределах выявлено девять антиклинальных структур (Нововасильевская, Атирская, Ивановская, Баженовская, Восточно-Седельниковская, Седельниковская, Колачёвская, Новологиновская, Муромцевская). С большой вероятностью следует ожидать, что упомянутые структуры будут иметь строение на уровне фундамента, подобное с Тайтымским роем даек.

На территории Тюменской области, в Уватском нефтегазоносном районе, где уже открыто более сорока трёх месторождений УВ, для открытия следующих залежей необходимо ориентироваться на обнаружение магматических интрузий в системе мелких разломов доюрского фундамента. Высокодебитные (фонтанирующие) притоки нефти следует ожидать в местах пересечения разломов.

Список литературы

1. Горный В. И., Тронин А. А. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 116–132.

2. Тронин А. А., Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 23–36.

3. Горный В. И. Геодинамика Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ (по данным дистанционного геотермического метода) // Региональная геология и металлогения. Сентябрь, 2000. № 12. ВСЕГЕИ, С.-Петербург. С. 76–86.

4. Морозов А. Ф., Берзин Р. Г., Аккуратов О. С. [и др.] Глубинное строение и геодинамика Южного Урала: (Проект Уралсейс): монография; отв. ред.: Г. М. Ермолаева; Мин-во природных ресурсов РФ, ФГУ ГНПП «Спецгеофизика». Тверь : ГЕРС, 2001. 285 с. ISBN 5-88942-025-9.

5. Сурков В. С., Жеро О. Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты // Нефтяное хозяйство. 1981. С. 143.

A. Y. Belonosov[1,3], A. E. Kudryavtsev[2,3]
[1]PhD, West Siberian branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia
[2]West Siberian branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia
[3]Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
e-mail: belonosov74313@mail.ru , kudryavtsevae85@mail.ru

TECTONIC INTERPRETATION OF REMOTE SENSING MATERIALS FROM SPACE WHEN ASSESSING THE PROSPECTS OF OIL AND GAS POTENTIAL (ON THE EXAMPLE OF THE CENTRAL REGIONS OF THE WEST SIBERIAN PLATE)

To assess the prospects of oil and gas potential in the peripheral parts of the West Siberian Plate, the authors consider two tectonic factors: deep fault systems and intrusive magmatic solides embedded in the sedimentary cover. To detect them, a set of remote sensing materials from space, geological-geophysical and geological-field data is used. The Taro-Pechora zone of deep volcanogenic formations has been identified, which is traced from the Komi Republic to the Novosibirsk Region and has a north-western orientation. The prospects of oil and gas potential of the sedimentary cover in the Uvatsky district of Tyumen and in the north-western part of the Omsk regions were assessed.

Keywords: interpretation of remote sensing materials, geological and geophysical data, fault systems, intrusive magmatic solides, assessment of oil and gas potential, hydrocarbon deposits.

УДК 528.88

Е. В. Болданова

Кандидат экономических наук, Байкальский государственный университет, Иркутск, Россия
e-mail: boldanova@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ОЗ. БАЙКАЛ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ ВОДЫ

Аннотация. Периодические колебания уровня оз. Байкал, связанные с сезонными и межгодовыми циклами, приводят к изменению береговой линии и площади акватории. Для принятия оперативных решений по регулированию уровня требует использования различных моделей. В данном исследовании с помощью методов пространственного анализа на основе данных дистанционного зондирования GEBCO была получена батиметрическая модель оз. Байкал с горизонтальной точностью 30 м и вертикальной точностью 1 м. Полученная модель была откалибрована на основе космоснимков Sentinel-2. Смоделировано изменение береговой линии озера при разных уровнях воды. Рассчитано изменение площади акватории озера. Полученные результаты позволят оценить последствия принимаемых решений по регулированию уровня оз. Байкал.

Ключевые слова: Байкал, батиметрия, GEBCO, Селенга, Верхняя Ангара, Святой Нос.

Колебания уровня оз. Байкал происходят под влиянием сезонных и долголетних циклов с периодичностью порядка 20 лет. Начало очередного многоводного периода сопровождается подъемом среднего уровня и изменением береговой линии. Для оценки последствий и принятия оперативных решений по регулированию уровня воды в озере необходимы различные модели.

В данном исследовании предлагается использовать данные дистанционного зондирования, предоставляемые в открытом доступе проекта GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans, общедоступная батиметрическая карта мирового океана) [1–4] Модель по данным GEBCO позволяет получить изолинии с интервалом 1 м. На основе снимков Sentinel-2 была проведена калибровка береговой линии по контурам берегов с помощью водного разностного индекса NDWI с пороговым значением NDWI < 0. Выявлено соответствие уровня воды в оз. Байкал:

1) в районе р. Верхняя Ангара, п-ов Святой Нос на отметке 450 м по данным GEBCO,

2) устье р. Селенга – 451 м,

3) Култук – 454 м.

При этом в данных GEBCO уровень воды определен на отметке 449 м.

Есть предположение, что есть погрешности при определении глубин на мелководных акваториях. Но именно мелководные части представляют особый интерес.

© Болданова Е. В., 2022

Моделирование изменения береговой линии при различных уровнях воды в озере представлено на рис. 1–3.

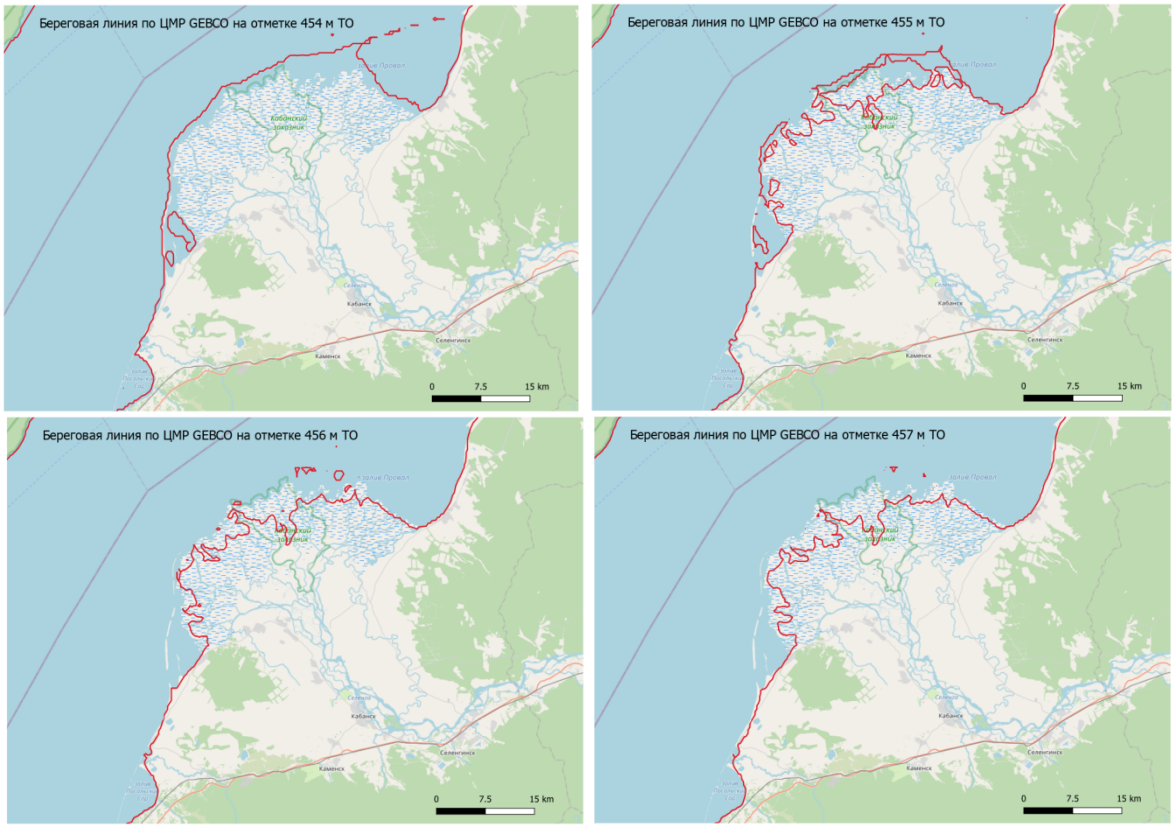


Рис. 1. Моделирование изменения береговой линии оз. Байкал в районе дельты р. Селенги при изменении уровня воды

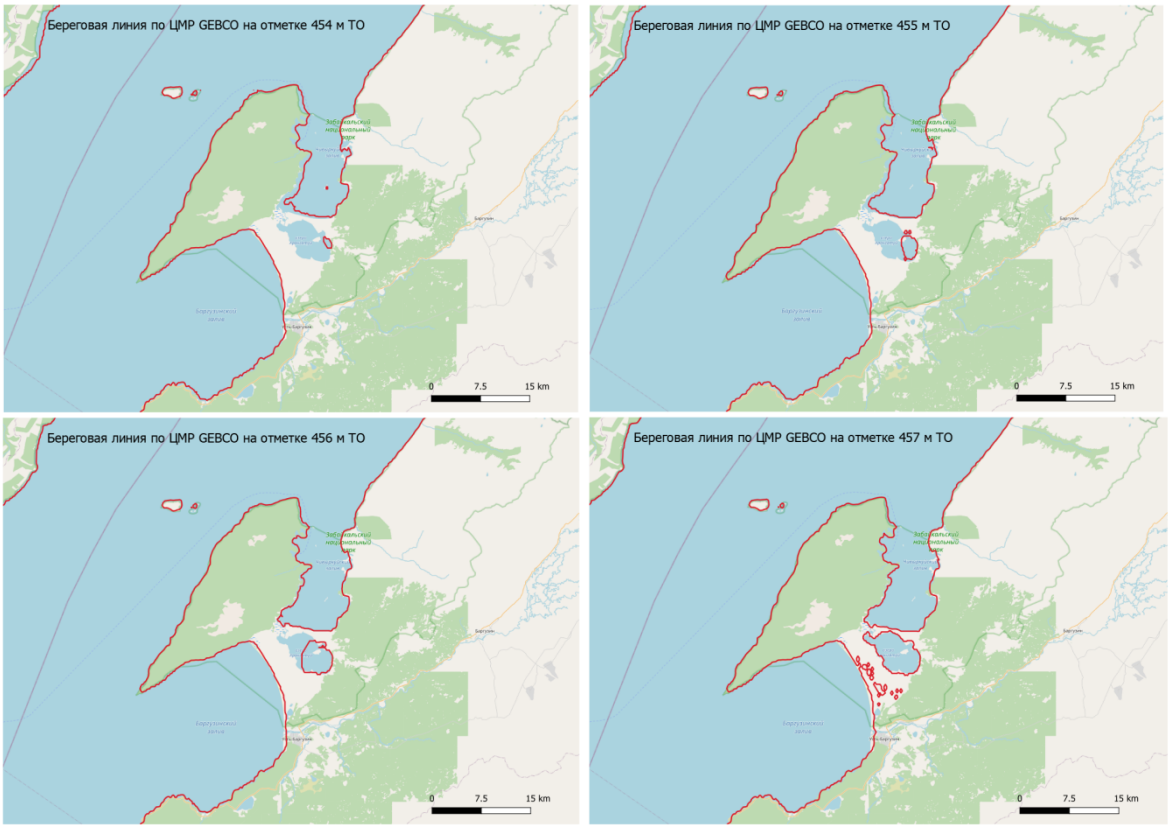


Рис. 2. Моделирование изменения береговой линии оз. Байкал в районе п-ова Святой Нос при изменении уровня воды



Рис. 3. Моделирование изменения береговой линии оз. Байкал в районе дельты р. Верхняя Ангара при изменении уровня воды

С помощью модели по данным GEBCO при выравнивании по средней части Байкала были рассчитаны площади акватории озера при различных уровнях воды (табл.).

Таблица

Площади акватории оз. Байкал при различных уровнях воды

ТО уровень, м	Площадь акватории, кв. км	Прирост, кв. км
453	31178,16	
454	31265,47	87,31
455	31637,46	371,99
456	31908,91	271,45
457	32211,46	302,55
458	32374,22	162,76

По полученным данным можно сделать вывод, что после строительства Иркутской ГЭС и изменении среднего уровня воды с 455 м до 456 м в среднем акватория увеличилась в пределах 270–370 кв. км.

Полученные результаты не учитывают других факторов, влияющих на формирование береговой линии, только изменение уровня воды.

Список литературы

6. GEBCO – The General Bathymetric Chart of the Oceans. URL: https://www.gebco.net/ (дата обращения: 24.05.2022).

7. GEBCO Compilation Group (2021) GEBCO 2021 Grid (doi:10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f). URL: https://download.gebco.net/ (дата обращения: 24.05.2022).

8. Sandwell D. T., Gille S. T., and Smith W. H. F., eds., Bathymetry from Space: Oceanography, Geophysics, and Climate, Geoscience Professional Services, Bethesda, Maryland, June 2002, 24 pp.

9. Tozer B., Sandwell D. T., Smith W. H. F., Olson C., Beale J. R., & Wessel P. (2019). Global bathymetry and topography at 15 Arc Sec: SRTM15+. Earth and SpaceScience, 6, pp. 1847–1864. https://doi.org/10.1029/2019EA000658 (дата обращения: 24.05.2022).

E. V. Boldanova

Baikal State University, Irkutsk, Russia
e-mail: boldanova@mail.ru

MODELING CHANGES IN THE COASTLINE OF LAKE BAIKAL AT DIFFERENT WATER LEVELS

Periodic fluctuations in the level of Lake Baikal, associated with seasonal and interannual cycles, lead to a change in the coastline and water area. To make operational decisions on level control requires the use of various models. In this study, using spatial analysis methods based on GEBCO remote sensing data, a bathymetric model of Lake Baikal was obtained with a horizontal accuracy of 30 m and a vertical accuracy of 1 m. The resulting model was calibrated on the basis of Sentinel-2 space images. The change in the lake shoreline at different water levels is modeled. The change in the area of the lake water area is calculated. The results obtained will make it possible to assess the consequences of the decisions made to regulate the level of Lake Baikal.

Keywords: Baikal, bathymetry, GEBCO, Selenga, Verkhnyaya Angara, Svyatoi Nos.

УДК 550.812, 528.88

С. Л. Верхошенцева, О. В. Непомнящий, А. С. Ципотан

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: lsl24@mail.ru

СИСТЕМА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭМИССИЙ МЕТАНА

Аннотация. Модернизирована математическая модель трассы прохождения светового пучка лидара в атмосфере. Разработана функциональная схема лидара, алгоритмическое и программное обеспечение устройства управления лазерной установкой. Разработано ПО приема-передачи устройства управления лазерной установкой. Изготовлен лабораторный прототип, на базе которого были проведены предварительные испытания.

Ключевые слова: лидар, дистанционное зондирование Земли, локализация месторождений нефти и газа, компенсация помех, трасса, математическая модель.

Введение. Метан, как один из парниковых газов, играет важную климатообразующую роль. При накоплении в атмосфере его процентное соотношение в сравнении с прочими парниковыми газами ежегодно увеличивается. Это обусловлено двумя основными причинами: первая – естественные, природные аномалии. Например, болотные экосистемы вносят существенный вклад в эмиссию метана, выделяя от 100 до 230 ТгСН4/год. Вторая причина – техногенная, связанная с непосредственной деятельностью человека. Например, в Красноярском крае в 2018–2021 гг. это обеспечило сочетание природно-климатических факторов, приведших к возникновению чрезвычайной ситуации: введение режима «черного неба», распространение лесных пожаров, приведших к экологической катастрофе на федеральном уровне.

Именно поэтому актуальной задачей является разработка модели для своевременного определения, с высокой точностью, источников эмиссий метана и его концентрации в локальной точке выхода на поверхность. Это позволит осуществлять поиск и локализацию скрытых свалок, источников загрязнения промышленных предприятий, утечек из нефте- и газопроводов. Кроме того, решение задачи прогнозирования эмиссий метана позволит строить обоснованный прогноз по достижению предельно-допустимых концентраций (ПДК). Которые могут быть использованы для предотвращения накоплений газа в помещениях, шахтах, на производстве и в перспективе исключать техногенные катастрофы. Для этого необходимо осуществлять наблюдение за распространением эмиссий и концентрированием в определенном объеме с топографической привязкой к местности. В рамках данной работы проведена разработка, моделирование и усовершенствование

© Верхошенцева С. Л, Непомнящий О. В., Ципотан А. С., 2022

математического аппарата системы дистанционного лидарного зондирования для определения концентраций метана в диапазоне 1–10 ppm, что позволит своевременно обнаруживать скопления метана.

Математический аппарат. Для того, чтобы выявить содержание газа метана в атмосфере было предложено использовать метод дистанционного лидарного зондирования с резонансным поглощением в инфракрасном спектре. Максимумом поглощения метана считаются области 1,6 мкм и 3,3 мкм, где вторая наиболее активная.

За основу была взята физическая модель атмосферы, разработанная в Институте им. В. Е. Зуева СО РАН [1], предназначенная для решения задач дистанционного зондирования атмосферы. Данная модель была преобразована и добавлены коэффициенты молекулярного рассеяния и затухания. Но стоит отметить, что, в условиях земной атмосферы, это расширение сравнительно невелико и им можно пренебречь [2]. Принцип дифференциального поглощения (ДП) используется в рамках разработанных технических решений программно-аппаратного комплекса лидара и его управления. В основе этого принципа лежит явление резонансного поглощения лазерного излучения внутри контура линии поглощения исследуемого газа. В этом случае концентрация газа рассчитывается по сигналам пучка на двух близких частотах, одна из которых находится внутри линии поглощения (ВКЛ), а другая – вне ее (ВЫКЛ). Преимущества дифференциального метода заключаются еще и в том, что в этом случае значения аэрозоля и равны для обоих лучей в силу близости их длин волн, а также геометрического фактора приемной аппаратуры и могут быть учтены при численной обработке результатов измерений [3].

Оборудование для дистанционного датчика. Наиболее удобным для реализации лидара дифференциального поглощения DIAL является гелий-неоновый лазер, который может генерировать излучение на близких длинах волн: 3,3922 мкм является измерительным сигналом (ВКЛ), а эталонным называется луч с длиной волны 3,3912 мкм (ВЫКЛ) [2]. В области давлений метана менее 0,1 мб, характерных для его концентрации в атмосфере, селективность поглощения для измерительного и опорного пучков значительна, что позволяет успешно применять методику DIAL, основанную на использовании гелий-неонового лазера. Анализ полученных данных показал, что для обеспечения требуемой избирательной способности лидара с заданными техническими характеристиками и определенным функциональным составом, устанавливаемого на беспилотный летательный аппарат с максимальной высотой лета, необходимо учитывать высоты до 150 м, в ясную погоду, но при этом необходимо обеспечить уровень шума, за счет обработки сигнала, относительно амплитуды не более 15 процентов. При ухудшении погодных условий допускается падение качества сигнала, но оно может быть компенсировано снижением максимальной высоты полета до 100 м.

Лабораторный прототип. В рамках выполнения работы был разработан и собран лабораторный прототип (рис. 1), состоящий из He-Ne лазера с длинной волны 3,3922 мкм, фоторезистивного датчика с терморегуляцией УФРО2, контрольно-измерительного оборудования, персонального компьютера с пользовательским программным обеспечением.

На текущий момент прототип находится в стадии тестирования аппаратного и программного состава. Осуществляется преобразование приемника прототипа с целью усиления принимаемого сигнала.



Рис.1. Лабораторный прототип системы экологического мониторинга

Заключение. В результате была выбрана и обоснована модель дистанционного лидарного зондирования атмосферы на длине волны 3,3922 мкм, разработан аппаратный состав системы, проведено математическое и элементное моделирование в программном обеспечении Matlab и MicroCap, сформирован перечень граничных условий эксплуатации комплекса. Собран лабораторный прототип системы экологического мониторинга, проводятся лабораторные испытания, доработка и усовершенствование разрабатываемой системы.

Следующим этапом планируется проведение полевых испытаний на территории болотистой местности около высотной мачты ZOTTO с целью выявления реального фона метана и выявления аномальных значений

являющихся искомыми при выявлении утечек из недр земли, скрытых свалок и т. д.

Список литературы

1. Зуев В. Е., Креков Г. М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 256 с.

2. Непомнящий О. В., Постников А. И., Попов Д. В. Математическое моделирование лазерно-локационного метода определения предельно малых концентраций углеводородов в поверхностном слое // Научное приборостроение. 2018. СПб. Т. 1. С. 28. 11–17 с.

3. Лещенко С. Л. Технологии дистанционного лидарного зондирования поверхности для обнаружения малых концентраций углеводородов в Сибири и на Крайнем Севере // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. Т. 966. 15-я Междунар. конфе. по промышленному производству и металлургии, 18–19 июня 2020 г., Нижний Тагил, Россия.

S. L. Verkhoshentseva, O. V. Nepomnuashy, A. S. Tsipotan

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

SYSTEM FOR DETECTING EMISSIONS OF METHANE

The mathematical model of the lidar light beam path in the atmosphere has been modernized. A functional diagram of the lidar, algorithmic and software for the control device of the laser installation have been developed. The software for receiving and transmitting the control device of the laser installation has been developed. A laboratory prototype was made, on the basis of which preliminary tests were carried out.

Keywords: lidar, remote sensing of the earth, localization of oil and gas fields, interference compensation, path, mathematical.

УДК 519.233

О. С. Володько[1], А. В. Дергунов[2]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
[2]ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: osv@icm.krasn.ru, alexdergunov@icm.krasn.ru

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ $PM_{2.5}$ В АТМОСФЕРЕ Г. КРАСНОЯРСКА И МЕТЕОУСЛОВИЙ

Аннотация. В работе проводится анализ взаимосвязи метеоусловий и концентрации твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$ в г. Красноярске в период с июня 2019 г. по март 2022 г. Используются набор метеоданных модели NCEP GFS о температуре воздуха на трех изобарических поверхностях (1 000, 925 и 850 мбар). Данные о концентрации твердых взвешенных частиц получены с наземных станций мониторинга. С помощью однофакторного дисперсионного анализа удалось выявить статистически значимую взаимосвязь между концентрацией взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и температурной инверсией, а также между концентрацией взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и их сезонными колебаниями. Двухфакторный дисперсионный анализ показал значимость влияния обоих факторов – температурной инверсии и сезонных колебаний, а также значимость влияния взаимодействия этих факторов.

Ключевые слова: температурная инверсия, GFS, PM2.5, загрязнение воздуха, сезонные колебания, дисперсионный анализ.

Введение. По данным Минприроды России, Красноярск является одним из нескольких городов России с самым грязным воздухом, концентрация вредных веществ в атмосфере города часто превышает допустимые нормы [1].

Загрязнение атмосферы связано, в том числе, с метеоусловиями [2]. Метеорологические процессы вносят значительный вклад в создание неблагоприятных метеорологических условий (НМУ). НМУ представляют собой особое сочетание метеорологических факторов, способствующих накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха. В частности, особенный интерес привлекает температурная стратификация нижних слоев атмосферы, которая может вызвать температурную инверсию – увеличение температуры воздуха с высотой. Температурная инверсия ограничивает вертикальное рассеяние вредоносных примесей в атмосфере [3].

Целью настоящей работы является определение влияния температурной инверсии и сезонов года на накопление в воздухе твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$ с помощью однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа.

Материалы и методы. Районом исследования в данной работе является г. Красноярск. Данные получены с наземных станций

© Володько О. С., Дергунов А. В., 2022

мониторинга [4] и метеоинформация модели National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System (NCEP GFS) [5].

В модели реанализа NCEP GFS определяются несколько сотен слоев с характеристиками атмосферы на различных вертикальных уровнях, которые вычисляются на регулярной горизонтальной сетке с пространственным разрешением 0.25° (~25 км) с периодичностью 4 раза в сутки.

Для исследования были использованы данные с июня 2019 г. по март 2022 г. Данные по концентрации твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$ получены с наземных станций мониторинга с промежутком в 6 часов.

Для определения температурных инверсий была взята разность фактических значений температуры на трех вертикальных уровнях: 1 000, 925 и 850 мбар. Если разность отрицательная, значит на данном слое наблюдалась инверсия. Изобарический слой 1 000 мбар соответствует поверхности земли, 925 мбар высоте около 750 м, 850 мбар высоте около 1 500 м.

Дисперсионный анализ широко применяется при исследовании влияния метеоусловий на загрязнение воздуха [6, 7].

В настоящей работе однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) [8] был применен для того чтобы определить существенно ли отличаются средние значения концентрации твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$ при наличии и отсутствии инверсии и в зависимости от сезона (осенний, зимний, весенний, летний). Критерий *F* Фишера использовался для оценки статистической значимости этих различий. Уровень значимости был принят равным 1 %.

Двухфакторных дисперсионный анализ (two-way ANOVA) [8] применялся для того чтобы оценить существенно ли влияние обоих факторов (температурной инверсии и сезонности) на концентрацию твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$.

Результаты. В табл. 1, 2 представлены результаты расчетов для однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа, проведенного для данных с июня 2019 по март 2022 г.

Таблица 1

Однофакторный дисперсионный анализ взаимосвязи инверсии и $PM_{2.5}$, сезона года и $PM_{2.5}$

	Источник изменчивости	Число степеней свободы	Критерий F Фишера	Уровень значимости
2019	$PM_{2.5}$, инверсия	1458, 1	380.614	0.000
	$PM_{2.5}$, сезон	1456, 3	110.296	0.000
2020	$PM_{2.5}$, инверсия	1462, 1	528.414	0.000
	$PM_{2.5}$, сезон	1456, 3	130.760	0.000
2021	$PM_{2.5}$, инверсия	1458, 1	347.160	0.000
	$PM_{2.5}$, сезон	1460, 3	127.079	0.000
2022	$PM_{2.5}$, инверсия	355, 1	157.474	0.000
	$PM_{2.5}$, сезон	401, 1	121.614	0.000

Таблица 2

Двухфакторный дисперсионный анализ влияния температурной инверсии и сезона года на концентрацию $PM_{2.5}$

	Источник изменчивости	Число степеней свободы	Критерий F Фишера	Уровень значимости
2019	Сезон	3	59.345	0.000
	Инверсия	1	224.92	0.000
	Совместный: сезон и инверсия	3	30.185	0.000
2020	Сезон	3	99.226	0.000
	Инверсия	1	432.181	0.000
	Совместный: сезон и инверсия	3	28.733	0.000
2021	Время года	3	91.792	0.000
	Инверсия	1	240.791	0.000
	Совместный: сезон и инверсия	3	37.155	0.000
2022	Сезон	1	34.326	0.000
	Инверсия	1	106.076	0.000
	Совместный: сезон и инверсия	1	13.550	0.0003

С помощью однофакторного дисперсионного анализа данных с июня 2019 по март 2022 г. удалось выявить статистически значимую взаимосвязь между концентрацией взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и инверсией температуры, а также между концентрацией взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и их сезонными колебаниями. Двухфакторный дисперсионный анализ показал значимость влияния обоих факторов – температцрной инверсии и сезонности, а также значимость влияния взаимодействия этих факторов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-21-2011.

Список литературы

1. Eremkin A. I., Kvashin I. M., Unkerov U. I. Regulation of emissions, pollutants into the atmosphere. Moscow: Assoc. of Constr. Univers, 200. 176 p.

2. Smith K. Principles of applied climatology. London: The University of Strathclyde, 1978. 364 p.

3. Матвеев Л. Т. Общая метеорология. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. 753 с.

4. Геопортал – данные оперативного мониторинга: http://sensor.krasn.ru/sc/

5. The Global Forecast System (GFS). Documentation Retrieved from: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numericalforecast_systems/gfs.php

6. Wallace J., Kanaroglou P. The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO2) and fine particulate matter (PM2.5) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // Science of the Total Environment. 2009. Vol. 407. № 18. P. 5085–5095.

7. Molina C., Toro A R., Morales S R.G., Manzano C., Leiva-Guzmán M. A. Particulate matter in urban areas of south-central Chile exceeds air quality standards // Air Quality, Atmosphere & Health. 2017. Vol. 10. № 5. P. 653–667.

8. Юденков В. А. Дисперсионный анализ. Минск: Бизнесофсет, 2013. 76 с.

O. S. Volodko[1], A. V. Dergunov[2]
[1]Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
[2]Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: osv@icm.krasn.ru, alexdergunov@icm.krasn.ru

ANALYSIS OF VARIANCE BETWEEN CONCENTRATION OF $PM_{2.5}$ AND METEOROLOGICAL CONDITIONS IN THE ATMOSPHERE OF KRASNOYARSK

The paper analyzes the relationship between meteorological conditions and the concentration of particulate matter $PM_{2.5}$ in Krasnoyarsk in the period from June 2019 to March 2022. The set of meteorological data of the NCEP GFS model on air temperature on three isobaric surfaces (1000, 925 and 850 mbar) is used. Data of $PM_{2.5}$ concentration are obtained from ground monitoring stations. A one-way analysis of variance (one-way ANOVA) of the data revealed a statistically significant relationship between $PM_{2.5}$ and temperature inversion, and between $PM_{2.5}$ and seasonal variation. Two-way analysis of variance (two-way ANOVA) showed the significance of the influence of both factors – temperature inversion and seasonal variation, as well as the interaction of these factors.

Keywords: temperature inversion, GFS, PM2.5, air pollution, ANOVA, seasonal variation.

УДК 551.584.2:551.501.86

Т. Ф. Газимов[1,2], Д. В. Антипова[1]

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия
[2]Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия
e-mail: tf.gazimov@gmail.com, dantipowa@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН

Аннотация. Антропогенно-измененные территории оказывают значительное влияние на окружающую среду и способны формировать собственный микроклимат. Одним из проявлений такого влияния является городской остров тепла. В работе представлены результаты оценки интенсивности поверхностного острова тепла (surface urban heat island – SUHI) города Новосибирск в летние месяцы за период с 2013 по 2020 г. Для получения температуры поверхности земли были использованы данные космического аппарата Landsat 8. Интенсивность SUHI рассчитывалась при помощи локальных климатических зон для выявления областей, отвечающих свойствам городских и внегородских поверхностей. Максимальные значения интенсивности соответствуют промзонам и складским помещениям. С увеличением плотности и этажности жилой застройки усиливается и интенсивность SUHI. Отрицательные значения интенсивности поверхностного острова тепла соответствуют случаям с перегретыми свежевспаханными сельскохозяйственными полями.

Ключевые слова: городской остров тепла, локальные климатические зоны, данные дистанционного зондирования, Landsat.

Изменение характеристик теплового баланса города вследствие антропогенного преобразования земной поверхности приводит к формированию особого местного климата. Ярким проявлением такого климата является городской остров тепла (Urban Heat Island – UHI) [1].

Изучение UHI в последние годы становится всё актуальнее вместе с ростом городов и городского населения. Так, по данным ООН, доля городского населения в мире удвоилась с 25 % в 1950 г. и превысило 50 % в 2020 г., а число городов в период с 2020 по 2070 г. в странах с низким уровнем дохода увеличится на 76 %, в странах с высоким уровнем дохода и доходом ниже среднего примерно на 20 %, а в странах с доходом выше среднего – на 6 % [2].

Формирование городского острова тепла летом, как правило, приводит к возникновению негативных последствий. Так, например, увеличивается вероятность теплового стресса, который в свою очередь приводит к увеличению смертности среди городских жителей [3–5].

© Газимов Т. Ф., Антипова Д. В., 2022

В данной работе мы рассмотрим поверхностный городской остров тепла (surface urban heat island – SUHI) города Новосибирск в летние месяцы за период с 2013 по 2020 г. Для этого были использованы данные космического аппарата Landsat 8, который оснащен инструментом TIRS, предназначенный для получения изображений в инфракрасном диапазоне (10, 11 каналы). Далее, согласно алгоритму, подробно описанному в работе [6], отражаемость 10 канала была переведена в значения температуры поверхности земли (land surface temperature – LST). Время съёмки района исследования для всех дней приходилось на полуденные часы по местному времени (05:20–05:30 UTC).

Основным методом выявления UHI является оценка его интенсивности, которая может быть рассчитана как разность между температурой внутри города и температурой вне города [Oke].

Существуют различные методики для выявления зон, отвечающих свойствам городских и внегородских поверхностей. Для этого нами была использована система классификации локальных климатических зон (local climate zones – LCZ). Подробно система классификации описана в работе [7].

Таким образом, интенсивность городского острова тепла, согласно [7], для каждой LCZ можно определить как разность между средними значениями LST типа LCZ_x (одна из 10 антропогенных LCZ) внутри города и типа LCZ_D (низкорослые растения) вне города, то есть $SUHI_{LCZx} = LST_{LCZx} - LST_{LCZD}$. Область, в пределах которой использовались значения LST, ограничивалась зоной внутри города и его окрестностями (буфер с радиусом 20 км).

Ниже представлена карта локальных климатических зон Новосибирска в пределах буфера и значения интенсивности SUHI для всех LCZ внутри города на примере 12 июля 2018 г. (рис. 1) [8].

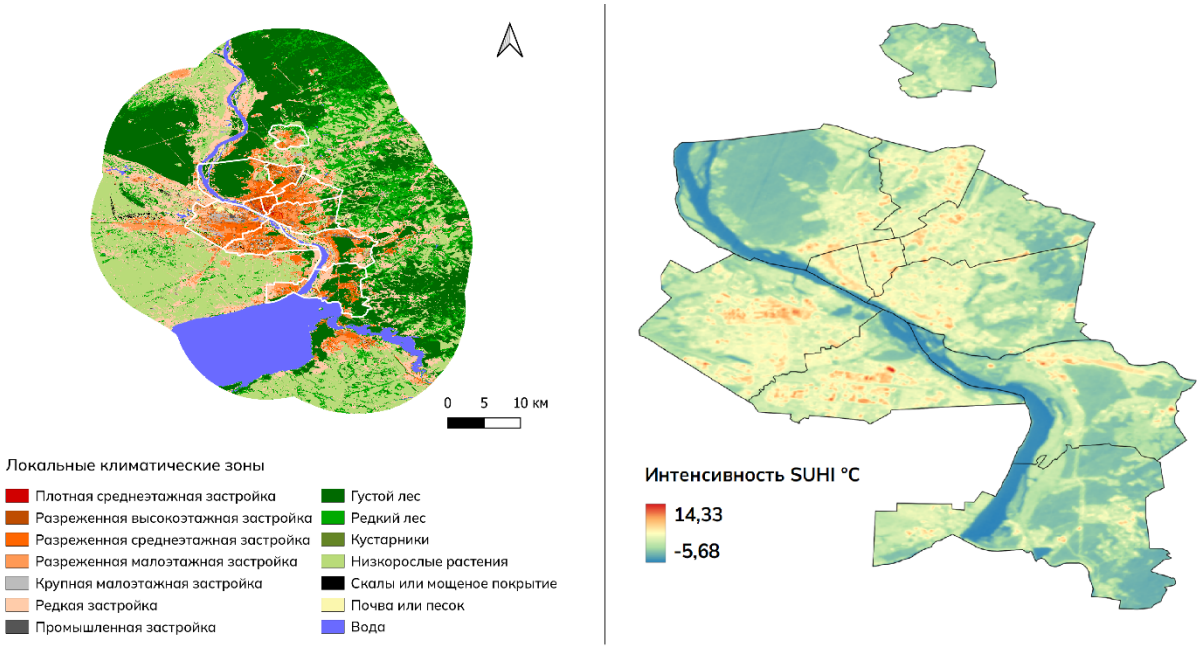


Рис. 1. Карта LCZ Новосибирска и его окрестностей (слева), и значения интенсивности SUHI для всех LCZ внутри города за 12.07.18 (справа)

Полученные значения интенсивности SUHI для всех LCZ Новосибирска представлены на рис. 2.

Дата	LCZ						
	2	4	5	6	8	9	10
14.07.13	2,7	1,8	1,2	1,5	4,2	-1,3	4,1
30.07.13	3,2	2,3	1,8	1,9	3,9	0,1	3,9
15.06.14	0,5	-0,6	-1,3	-0,6	2,2	-3,7	1,9
07.08.14	2,4	1,1	0,5	0,9	3,6	-2,3	4,0
24.07.14	2,6	1,3	0,8	0,7	3,2	-1,2	3,8
18.08.14	0,6	0,3	-0,2	-0,2	1,8	-1,6	1,6
25.06.15	2,6	1,3	0,6	0,8	3,4	-2,0	4,1
04.06.16	-2,3	-2,6	-3,6	-2,8	-0,2	-5,3	-0,7
11.06.16	-0,3	-1,6	-2,2	-1,7	0,6	-4,7	1,0
23.08.16	0,7	0,4	-0,5	-0,4	2,1	-2,2	2,2
12.07.18	4,6	3,2	2,7	2,8	4,6	0,2	4,9
19.07.18	4,6	3,3	2,5	2,6	5,1	-0,4	6,0
04.08.18	3,5	2,1	1,6	1,7	4,1	-0,5	5,0
15.07.19	3,5	2,1	1,6	1,7	4,1	-0,5	5,0
31.07.19	3,8	2,3	1,6	1,6	4,0	-0,9	4,3
08.07.20	3,9	2,5	1,6	1,5	4,4	-1,3	4,5
17.07.20	3,4	2,0	1,2	1,3	3,3	-1,3	2,9
24.07.20	2,5	1,2	0,2	0,2	3,3	-2,7	3,7
09.08.20	1,8	0,7	0,1	0,1	2,4	-1,7	2,6

Рис. 2. Значения интенсивности SUHI в °C для каждого типа LCZ (2 – плотная среднеэтажная застройка; 4 – разреженная высокоэтажная застройка; 5 – разреженная среднеэтажная застройка; 6 – разреженная малоэтажная застройка; 8 – крупная малоэтажная застройка; 9 – редкая застройка; 10 – промышленная застройка)

Наиболее выделяются значения интенсивности для 8, 9 и 10 типа LCZ – крупная малоэтажная, редкая и промышленная застройка соответственно. Для промзоны и крупной малоэтажной застройки (складские помещения) характерны повышенные значения интенсивности SUHI, что говорит о наличии устойчивого поверхностного острова тепла в пределах данных климатической зоны. Для редкой же застройки, представленной преимущественно садовыми участками, напротив, демонстрируется отсутствие городского острова тепла. Также примечательным является 2016 г., когда наблюдались минимальные и отрицательные значения интенсивности SUHI для большинства локальных климатических зон. По всей видимости, это связано с интенсивным прогревом свежевспаханных сельскохозяйственных полей, находящихся за пределами города и соответствующие типу LCZ_D – низкорослые растения. Для жилой застройки (LCZ 2-6) демонстрируются положительные значения интенсивности (исключая 2016 г.) и чем плотнее и выше застройка, тем выше значения интенсивности.

В целом полученные значения соответствуют теоретическим ожиданиям, и метод с использованием локальных климатических зон

применим для оценки поверхностного городского острова тепла городов умеренного климатического пояса.

Список литературы

1. Oke T. R, Mills G., Christen A., Voogt J. A. Urban climates, Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 519 p.

2. World Cities Report 2022. [Электронный ресурс] URL: https://unhabitat.org/wcr/ (дата обращения 01.07.22).

3. Zhao Q., Guo Y., Ye T. et al. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study // The Lancet Planetary Health. 2021. Vol. 5. № 7. P. e415–e425.

4. Heaviside C., Vardoulakis S., Cai X. Attribution of mortality to the Urban Heat Island during heatwaves in the West Midlands, UK // Environmental Health. 2016. Vol. 15. P. 49–59.

5. Tan J. et al. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai // International journal of biometeorology. 2010. Vol. 54. № 1. P. 75–84.

6. Газимов Т. Ф., Кужевская И. В. Оценка летнего поверхностного городского острова тепла города Новосибирск по данным Landsat 8 // Географический вестник. 2021. № 4 (59). С. 84–98.

7. Stewart I. D., Oke T. R. Local climate zones for urban temperature studies // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. Vol. 93. № 12. P. 1879–1900.

8. Gochakov A. (2021). WUDAPT Level 0 training data for Novosibirsk (Russian Federation) [Электронный ресурс] URL: https://lcz-generator.rub.de/factsheets/ba11c3019621f9beb76ec7db558ad664d4a38b4e/ba11c3019621f9beb76ec7db558ad664d4a38b4e_factsheet.html (дата обращения 05.07.22).

T. F. Gazimov[1,2], D. V. Antipova[1]

[1]National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
[2]Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk, Russia
e-mail: tf.gazimov@gmail.com, dantipowa@gmail.com

STUDY OF SURFACE URBAN HEAT ISLAND USING LOCAL CLIMATE ZONES

Urban areas have a significant impact on the environment and are able to form their own climate. One example of this influence is urban heat island. The paper presents the results of an assessment of surface urban heat island (SUHI) intensity of Novosibirsk in summer months for the period from 2013 to 2020. Data from the Landsat 8 were used to obtain land surface temperature. The SUHI intensity was calculated using local climate zones to identify areas corresponding to the properties of urban and rural surfaces. Highest intensity values correspond to heavy industry and large low-rise. As the density and number of stories of residential development increases, so does SUHI intensity. Negative values of surface urban heat island intensity correspond to the cases of freshly ploughed croplands.

Keywords: urban heat island, local climate zones, remote sensing data, Landsat.

УДК 629.786.2:632

Р. Ю. Данилов[1], О. Ю. Кремнева[1], О. В. Тутубалина[2], И. И. Середа[2], М. В. Зимин[2], А. А. Пачкин[1]

[1]Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, 350039, Россия

[2]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

e-mail: daniloff.roman2011@yandex.ru, olgatut@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОСНОВНЫХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БОЛЕЗНЕЙ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ И АВИА-СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ДИСТАНЦИОННЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА

Аннотация. С помощью современного гиперспектрального оборудования получены новые фундаментальные данные по диагностике раннего развития экономически значимых болезней озимой пшеницы на юге России. Изучены особенности изменения спектральных характеристик четырех различных по устойчивости к болезням сортов озимой пшеницы в сопоставлении с данными наземных фитосанитарных обследований посевов. В процессе работы осуществлен переход от наземных к авиационным средствам многозонального и гиперспектрального мониторинга посевов, определены границы применимости воздушных и космических средств.

Ключевые слова: озимая пшеница, возбудители болезней, фитосанитарный мониторинг, гиперспектральный анализ, спектрометрия, дистанционное зондирование Земли, БПЛА.

Озимая пшеница является одной из ведущих культур по площади возделывания как во всем мире, так и в России. К комплексу экономически значимых заболеваний пшеницы относятся – возбудители бурой и желтой ржавчины (*Puccinia triticina* Erikss., *Puccinia striiformis* West.), желтой пятнистости (*Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechsler), септориоза (*Septoria spp*.), мучнистой росы (*Blumeria graminis* (DC.) Speer). Болезни являются очень вредоносными и широко распространенными как в мире [1], так и в России, особенно в ее южном регионе [2].

В современных реалиях интенсивного сельского хозяйства проведение фитосанитарного мониторинга по классическим методикам затруднено наличием больших посевных площадей, вследствие чего отсутствует должный контроль со стороны специалистов.

Наиболее перспективным способом решения данной проблемы является разработка дистанционных методов диагностики состояния посевов сельскохозяйственных культур, основанных на возможности

© Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Тутубалина О. В., Середа И. И., Зимин М. В., Пачкин А. А., 2022

детектирования изменений состояния растительности в результате регистрации отраженного от них электромагнитного излучения [3].

Целью наших исследований являлось выявление информационных признаков для распознавания экономически значимых возбудителей болезней на основе анализа данных наземного спектрометрирования с учетом генотипов разных сортов озимой пшеницы.

Исследования проводили в 2019–2020 гг. на опытном поле Федерального научного центра биологической защиты растений (г. Краснодар). Объектами исследований являлись посевы четырех сортов озимой пшеницы селекции НЦЗ им. П. П. Лукьяненко (г. Краснодар) и Научного центра «Донской» (г. Зерноград, Ростовская область), которые характеризуются разной степенью устойчивости к листостебельным болезням [4].

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 1 000 нм с высоким спектральным разрешением ~ 1 нм.

Синхронно с наземными измерениями были проведены испытания беспилотного летательного аппарата eBee SQ с мультиспектральной камерой Parrot Sequoia.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы. Для инфицированных сортов, подверженных воздействию патогенов характерны общее повышение, или более незначительное снижение значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в период с 19 по 23 мая. Особенно характерно это проявляется для ближнего инфракрасного диапазона спектра (720–800 нм и 800–1 200 нм). Также можно отметить, что для инфицированных сортов, восприимчивых для патогена характерны повышенные значения в диапазонах волн 1 445–1 775 нм и 2 050–2 450 нм в период с 23 по 27 мая. Предположительно, это связано с повышением внутренней температуры растения, возникающей вследствие ее борьбы с болезнями.

Таким образом, для ранней оценки общего негативного влияния патогенного фона на посевы озимой пшеницы, были обнаружены два устойчивых признака, проявляющихся в ходе мониторинга спектрального образа:

1. Повышение или менее значительное снижение значений КСЯ в ближнем инфракрасном диапазоне спектра на ранних стадиях фенологической стадии «колошение».

2. Повышенное значение КСЯ в диапазонах 1 445–1 775 нм и 2 050–2 450 нм на более поздних стадиях фенологической стадии «колошение».

Для того чтобы сопоставить данные аэросъемки с наземными исследованиями, использовались значения КСЯ, полученные в результате наземного спектрометрирования для центральных длин волн каналов камеры Parrot Sequoia (550, 660, 735 и 790 нм). В результате было получено

две серии графиков, в которых для каждого сорта оценивалось изменение спектральных образов во времени как для отдельных дат (рис. 1).

В результате было выявлено, что оба представленных подхода дают схожий результат для всех экспериментальных участков. Тем не менее, динамика абсолютных значений КСЯ для аэросъемки имеет гораздо большую амплитуду (0.4 против 0.1). Особенно характерно это проявляется при рассмотрении динамики в отдельных диапазонах волн. Стоит отметить, что несмотря на значительное несоответствие абсолютных значений спектральной яркости, порядок делянок по значениям сохраняется и выглядит схоже.



Рис. 1. Динамика КСЯ на экспериментальных участках с посевами озимой пшеницы (Каждому вертикальному делению соответствуют диапазоны волн: 550, 660, 735 и 790 нм)

Таким образом, можно прийти к выводу, что при соблюдении достаточной частоты съемки, современные многозональные съемочные системы, размещенные на беспилотных летательных аппаратах, способны детектировать раннее негативное воздействие патогенного фона на посевы озимой пшеницы.

Необходимо отметить, что при этом какой-либо принципиальной разницы по форме воздействия отдельных патогенов на состояние посевов выявить не удалось. В ходе исследований был сделан вывод, что в условиях, приближенных к естественным, крайне затруднительно составить полный перечень факторов, влияющих на состояние растительности. Тем не менее, общее негативное воздействие болезней на определенные участки поля оценить возможно.

Для практической реализации результатов данного исследования можно предложить методику, согласно которой в период выхода в трубку – колошения с периодичностью в 2–3 дня проводится аэросъемка посевов многозональной камерой. В случае если в этот период какие-либо пикселы в ближнем инфракрасном диапазоне спектра имеют повышенный рост значений, стоит обратить на эти участки внимание и провести либо наземный осмотр, либо анализ его спорового состава. При определении конкретного патогена, поразившего данный участок, опытные специалисты могут порекомендовать препараты и технологические рекомендации для устранения негативных факторов на ранних стадиях их проявления.

Исследования спектральных характеристик культурных и сорных растений проведены в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ № 19-416-230043 р _а и Администрацией Краснодарского края.

Список литературы

1. Kolmer J. A. Hughes M. E. Physiologic specialization of Puccinia triticina on wheat in the United States in 2012 // Plant Disease. 2014. Vol. 98. P. 1145–1150.

2. Кремнева О. Ю., Волкова Г. В., Коваленко Н. М. Динамика расового состава Pyrenophora tritici-repentis в Северо-Кавказском регионе // Микология и фитопатология. 2019. Т. 53. № 4. С. 246–253.

3. Исмаилов Э. Я., Надыкта В. Д., Исмаилов В. Я., Костенко И. А., Швец А. А. Гиперспектральные исследования поражения сельскохозяйственных культур фитопатогенами // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 3 (68). С. 98–103.

4. Kremneva O. Yu., Mironenko N. V., Volkova G. V., et all. Resistance of winter wheat varieties to tan spot in the North Caucasus region of Russia // Saudi Journal of Biological Sciences. 2021. Vol. 28. № 3. P. 1787–1794. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.021

R. Yu. Danilov[1], O. Yu Kremneva[1], V. Ya. Ismailov[1], O. V. Tutubalina[2], I. I. Sereda[2], M. V. Zimin[2], A. A. Pachkin[1]

[1]Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Center of Biological Plant Protection», Krasnodar, Russia

[2]Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Mechanical Engineering», Korolev, Russia

DEVELOPMENT OF METHODS FOR THE DIAGNOSIS OF THE MAIN PATHOGENS OF WINTER WHEAT DISEASES USING GROUND AND AVIATION - SPECTRAL MEASUREMENTS AND REMOTE MONITORING TOOLS

With the help of modern hyperspectral equipment, new fundamental data were obtained on the diagnosis of the early development of economically significant diseases of winter wheat in the south of Russia. The features of changes in the spectral characteristics of four varieties of winter wheat with different resistance to diseases were studied in comparison with the data of terrestrial phytosanitary surveys of crops. In the process of work, the transition from ground to aviation means of multi-zone and hyperspectral monitoring of crops was carried out, the limits of applicability of air and space means were determined.

Keywords: winter wheat, pathogens, phytosanitary monitoring, hyperspectral analysis, spectrometry, Earth remote sensing, UAV.

УДК 630*58

Д. М. Дергунов[1], О. Н. Воробьев[2], Э. А. Курбанов[3], С. А. Лежнин[4]

[1]Аспирант
[2]Кандидат сельскохозяйственных наук
[3]Доктор сельскохозяйственных наук
[4]Кандидат сельскохозяйственных наук,
Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия
e-mail: DergunovDM@volgatech.net, Vorobievon@volgatech.net,
kurbanovea@volgatech.net, LejninSA@volgatech.net

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ФИТОМАССЫ ЛЕСОВ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ LANDSAT

Аннотация. Цель этого исследования состояла в том, чтобы оценить наземную фитомассу лесов с помощью снимков со спутника Landsat 7-9 на территории Верхнесурского округа Пензенской области. Для этого использовались данные полученные в результате наземных измерений на 170 тестовых участках. Используя эти данные рассчитывалась фитомасса на каждом тестовом участке. Исходная яркость полос и вегетационные индексы для каждого тестового участка были получены на основе значений их координат, которые были перенесены на снимки Landsat. Взаимосвязь фитомассы с яркостями полос и вегетационными индексами были определены с помощью множественного регрессионного анализа. С помощью алгоритма LandTrend произведена пространственно-временная оценка изменений земного покрова.

Ключевые слова: фитомасса, спутниковые снимки, тестовые участки, регрессионный анализ.

Введение. Фитомасса является одной из основных характеристик, определяющей ход процессов в лесных экосистемах. Она используется в целях экологического мониторинга, устойчивого ведения лесного хозяйства, моделирования продуктивности лесов с учетом глобальных изменений климата, изучения структуры и биоразнообразия лесного покрова, оценки депонирования углерода. В связи с этим оценка и учет биологической продуктивности лесов имеет особое значение при организации ведения лесного хозяйства [1].

Основным традиционным источником информации о лесах являются материалы лесоустройства, но согласно недавнему отчету материалы с не истёкшим сроком давности есть только по 16 % площади российских лесов. Самое перспективное с точки зрения поглощения парниковых газов леса на землях сельскохозяйственного назначения – пока никак не учитывается и не имеет ясного правового статуса. Для реальной оценки поглощающей способности российских лесов требуется много специальных дополнительных исследований. Технологии дистанционного зондирования

© Дергунов Д. М., Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Лежнин С. А., 2022

могут существенно помочь при решении данной проблемы, так как позволят в относительно небольшой промежуток времени дать информацию о лесных ресурсах и динамике их изменений на большой территории [2].

Цель исследования – провести оценку динамики надземной фитомассы лесных насаждений Верхнесурского округа Пензенской области по данным спутников Landsat-7, Landsat-8 и Landsat-9 за 2002–2022 гг. периодичностью в 4 года.

Верхнесурский округ Пензенской области имеет общую площадь 11 747 км^2 и расположен в умеренном географическом поясе, на стыке лесной, лесостепной и степной природных зон. Площадь лесов составляет 461 978 га, лесистость – 39 %. В лесах наблюдается преобладание сосновых, березовых и осиновых лесных насаждений.

Метод исследования. В исследовании использованы спектральные индексы: NDVI (Normalize difference vegetation index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), NBR (Normalized Burn Ratio), NBR2 (Normalized Burn Ratio 2), NDMI (Normalized Difference Moisture Index) и спектральные слои спутниковых снимков Landsat: Band 1 (Coastal aerosol), Band 2 (Blue), Band 3 (Green), Band 4 (Red), Band 5 (NIR), Band 6 (SWIR 1), Band 7 (SWIR 2). Для оценки фитомассы лесных насаждений и точности тематического картографирования были подобраны 170 тестовых участков, заложенных на территории исследования.

В работе проведен множественный линейный регрессионный анализ для моделирования связи между AGB (фитомассой), спектральной яркостью лесного покрова и индексами растительности, полученными по спутниковым изображениям Landsat с целью определения оптимальных переменных и построения с их помощью наиболее точной модели оценки фитомассы лесов. Для получения этой модели множественной линейной регрессии использовался метод наименьших квадратов, основанный на пошаговом выборе переменных:

$$AGB = b_o + b_1 \times X_1 + b_2 \times X_2 \ldots\ldots + b_n \times X_n + \varepsilon,$$

где AGB – надземная фитомасса; $X1 \ldots Xn$ – переменные, соответствующие спектральной яркости, индексам растительности и значениям текстурных признаков; $b1 \ldots bn$ представляют собой коэффициенты модели; ε – аддитивный член ошибки.

На платформе Google Earth Engine использован алгоритм LandTrend для спектрально-временной сегментации, который позволяет обнаруживать изменения во временных рядах спутниковых изображений и создавать данные спектральных временных рядов на основе траекторий [3].

Результаты исследования. Оценка модели проводилась на основе разницы (остаточных значений) между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями фитомассы лесов, по данным тестовых участков в качестве независимых данных. По полученной регрессионной

модели построены тематические карты фитомассы на исследуемой территории в 2002, 2006, 2010, 2014, 2018 и 2022 г. Проведена оценка точности карты и проанализировано пространственное распределение изменений фитомассы лесов Верхнесурского округа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-16-00094, https://rscf.ru/project/22-16-00094/»



Список литературы

1. Nguyen T., Jones S. Soto-Berelov M. et al. Monitoring aboveground forest biomass dynamics over three decades using Landsat time-series and single-date inventory data // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. Vol. 84. URL: https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101952

2. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Честных О. В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Вопросы лесной науки. 2018. № 1. URL: http://jfsi.ru/1-1-2018-zamolodchikov_et_all/

3. Kennedy R., Yang Z., Gorelick N. et al. Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine // Remote Sens. 2018. Vol 10. https://doi.org/10.3390/rs10050691

D. M. Dergunov[1], O. N. Vorobyov[2], E. A. Kurbanov[3], S. A. Lezhnin[4]
[1]Post-graduate student,
[2]Candidate of Agricultural Sciences
[3]Doctor of Sciences in Agriculture
[4]Candidate of Agricultural Sciences
Volga State Technological University, Yoshkar-Ola, Russia, Йошкар-Ола, Россия
e-mail: DergunovDM@volgatech.net, Vorobievon@volgatech.net,
kurbanovea@volgatech.net, LejninSA@volgatech.net

EVALUATION OF PHYTOMASS DYNAMICS IN PENZA REGION FORESTS USING LANDSAT SATELLITE IMAGES

The purpose of this study was to assess the terrestrial phytomass of forests using images from the Landsat 7-9 satellite in the Verkhnesura district of the Penza region. For this, data obtained as a result of ground measurements on 170 test sites were used. Using these data, the phytomass was calculated for each test plot. The initial brightness of the bands and vegetation indices for each test area were obtained based on the values of their coordinates, which were transferred to Landsat images. The relationship of phytomass with band brightness and vegetation indices was determined using multiple regression analysis. Using the LandTrend algorithm, a spatiotemporal assessment of land cover changes was made.

Keywords: phytomass, satellite images, test plots, regression analysis.

УДК 504.3.054+528.88

А. В. Дергунов[1], О. Э. Якубайлик[2]

[1]Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2]Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru, oleg@ icm.krasn.ru

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРЫ В КРАСНОЯРСКЕ

Аннотация. В работе проводится анализ взаимосвязи различных метеорологических факторов с изменением среднесуточных концентрации $PM_{2.5}$ в период с ноября 2020 г. по февраль 2021 г. Метеоданные получены из набора параметров модели GFS, а именно, температура воздуха на трех изобарических поверхностях (1 000, 925 и 850 мбар), порывы ветра (GUST) и высота пограничного слоя атмосферы (HPBL). Данные о концентрациях $PM_{2.5}$ предоставлены системой мониторинга воздуха КНЦ СО РАН. За исследуемый период повышенное загрязнение атмосферы в 79 % случаев сопровождалось температурными инверсиями. В работе показана высокая взаимосвязь между вариациями среднесуточных концентраций $PM_{2.5}$ и выбранными метеорологическими параметрами. Полученные результаты свидетельствуют о высокой применимости метеоданных модели GFS в задачах исследования состояния атмосферы города Красноярска.

Ключевые слова: температурная инверсия, загрязнение воздуха, GFS, $PM_{2.5}$, взвешенные частицы.

1. Введение

Экологическое состояние атмосферы больших городов является актуальной проблемой современного общества. В результате антропогенного фактора в атмосферу попадает большое число вредных веществ [1]. За двадцать лет эпидемиологических исследований ученые обнаружили высокую корреляцию между мелкодисперсными загрязнителями и респираторной заболеваемостью [2]. В [3, 4] показано, что повышенная концентрация взвешенных в воздухе твердых частиц (PM) может напрямую привести к повышению заболеваемости и смертности населения.

Одним из факторов возникновения повышенного загрязнения воздуха может являться температурная инверсия в атмосфере. Температурные инверсии представляют собой слои разной толщины, располагающиеся на разных высотах в приземном слое атмосферы. В этих слоях убывание температуры с высотой сильно замедляется, прекращается или, наоборот, происходит её увеличение. Их свойствами являются высота нижней и верхней границы, вертикальная мощность (толщина слоя) и интенсивность (величина инверсии) [5, 6]. Поэтому, возникает необходимость исследования атмосферных процессов с помощью наборов

© Дергунов А. В., Якубайлик О. Э., 2022

метеорологических данных для анализа периодов, приводящих к ухудшению экологической обстановки.

Традиционные средства мониторинга окружающей среды (наземные метеостанции, метеорологические мачты, радиозонды) предоставляют метеорологические данные с высокой точностью измерений. Однако, такие источники информации, как правило, имеют достаточно низкое пространственное (наземные метеостанции, метеомачты) и временное разрешение (радиозонды), что является ограничивающим фактором в задачах исследования экологической обстановки.

Альтернативой могут служить метеоданные различных моделей прогноза погоды, например, модель Global Forecast System. Эти источники предоставляют множество различных слоев метеоинформации на десятках вертикальных уровней, нанесенные на регулярные прямоугольные сетки, покрывающие весь Земной шар с частотой 4 раза в сутки. Пространственное разрешение таких данных может варьироваться от 2.5 до 0.25 градусов и выше [7]. Разработчики стараются регулярно улучшать этот параметр.

В настоящей работе проводится анализ взаимосвязи метеорологических факторов с изменением среднесуточных концентраций $PM_{2.5}$ в период с 1 ноября 2020 г. по 28 февраля 2021 г. в Красноярске.

2. Методы обработки данных

В работе используется метеоинформация модели прогноза погоды Global Forecast System (GFS). Выбраны фактические данные анализа о температуре воздуха на трех вертикальных уровнях, соответствующих трем изобарическим поверхностям: 1 000, 925 и 850 мбар; а также информация о порывах ветра (GUST) и высоте пограничного слоя атмосферы (HPBL) для периода с 1 ноября 2020 г. по 28 февраля 2021 г. Текущее горизонтальное разрешение данных составляет 0.25 градуса (около 25 км на широте города Красноярска) [7].

Среднесуточные концентрации взвешенных в воздухе твердых частиц $PM_{2.5}$ были получены по данным сети наземных станций мониторинга Красноярского научного центра СО РАН.

Температурная инверсия в атмосфере определялась при сравнении значений температуры воздуха в одной точке на разных вертикальных уровнях. Инверсия в слое 1 000–925 мбар считалась приземной или приподнятой, в слое 925–850 мбар – приподнятой или высотной.

3. Результаты и обсуждение

В работе на рис. 1, *А* продемонстрирована взаимосвязь среднесуточных концентраций $PM_{2.5}$ и периодов наличия температурных инверсий в атмосфере города в течение холодного сезона 2020–2021 г., где пунктирной линией обозначена среднесуточная ПДК $PM_{2.5}$, серыми вертикальными полосами отмечены периоды с температурными инверсиями. В 79 % случаев превышение среднесуточного ПДК концентрациями $PM_{2.5}$ сопровождалось температурными инверсиями.

Сравнение значений интенсивности температурных инверсий (ΔT) и среднесуточных концентраций $PM_{2.5}$ в исследуемый период показало коэффициент детерминации, равный 0,54 (рис. 1, *Б*).

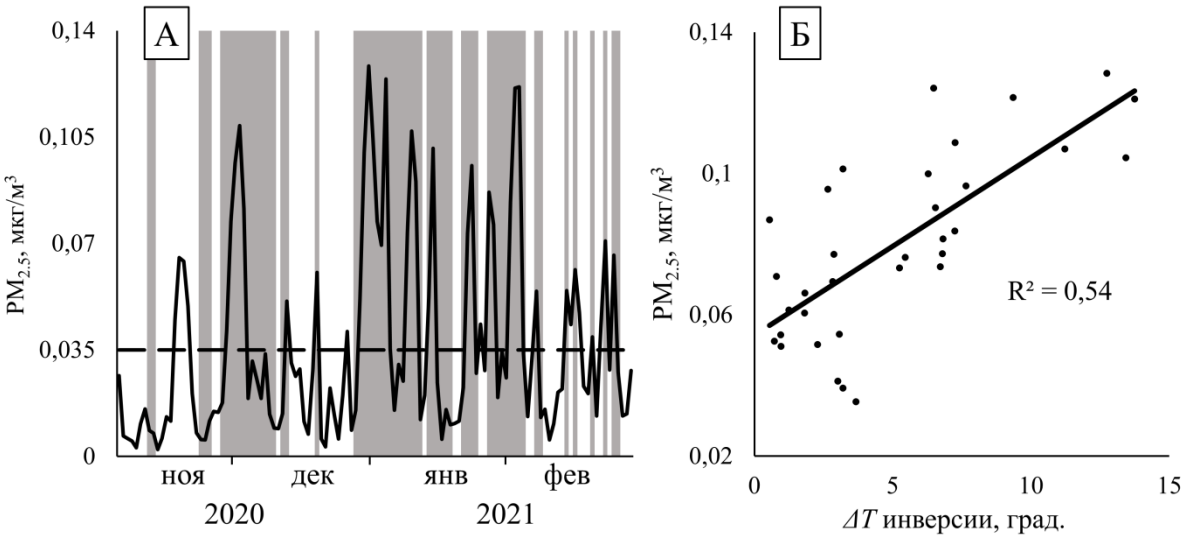


Рис. 1. Взаимосвязь среднесуточных концентраций $PM_{2.5}$ и температурных инверсий в Красноярске в холодный сезон 2020–2021 г.

В работе проведено сравнение среднесуточных концентраций $PM_{2.5}$ и величины порывов ветра (GUST). Анализ показал коэффициент детерминации, равный 0,6 (рис. 2, *А*). Сравнение с параметром высоты пограничного слоя атмосферы (HPBL) показало коэффициент детерминации, равный 0,59 (рис. 2, *Б*). Данные результаты указывают на высокую взаимосвязь с указанными метеорологическими параметрами.

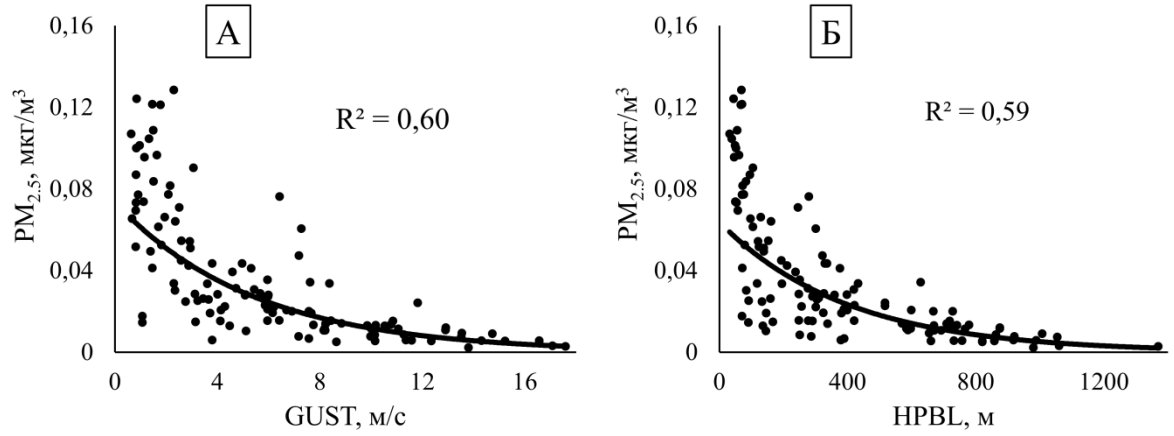


Рис. 3. Сравнение значений интенсивности инверсий (Δ*T*) и среднесуточных концентраций PM2.5

Полученные результаты свидетельствуют о высокой применимости данных метеорологической модели GFS в задачах исследования естественных механизмов возникновения экологически неблагоприятных периодов в городе Красноярске в зимнее время.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-21-20117 «Анализ периодов повышенной концентрации загрязняющих веществ в атмосфере Красноярска на основе метеорологических данных реанализа с помощью методов математического моделирования и искусственного интеллекта».

Список литературы

1. Зарубин Г. П., Новиков Ю. В. Гигиена города. М.: Медицина, 1986. 272 с.
2. Brunekreef B., Holgate S. T. Air pollution and health // Lancet. 2002. Т. 360. № 9341. С. 1233–1242.
3. Nemmar A. et al. Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans // Circulation. 2002. Т. 105. № 4. С. 411–414.
4. Helfand W. H., Lazarus J., Theerman P. Donora, Pennsylvania: an environmental disaster of the 20th century // American journal of public health. 2001. Т. 91. № 4. 553 с.
5. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1984. 752 с.
6. Безуглая Э. Ю. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 251 с.
7. The Global Forecast System (GFS) Documentation Retrieved from: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numericalforecast_systems/gfs.php

A. V. Dergunov[1], O. E. Yakubailik[2]

[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 METEOROLOGICAL FACTORS ON THE ECOLOGICAL STATE OF THE ATMOSPHERE IN KRASNOYARSK

The paper analyzes the relationship of various meteorological factors with changes in average daily PM2.5 concentrations from November 2020 to February 2021. Meteorological data are obtained from a set of GFS model parameters, namely air temperature at three isobaric surfaces (1000, 925 and 850 mbar), wind gusts (GUST) and atmospheric boundary layer height (HPBL). Data on PM2.5 concentrations are provided by the air monitoring system of the KSC SB RAS. During the study period, increased atmospheric pollution in 79 % of cases was accompanied by temperature inversions. The paper shows a strong relationship between variations in daily average concentrations of PM2.5 and selected meteorological parameters. The results obtained show the high applicability of the GFS model meteorological data in the problems of studying the state of the atmosphere in the city of Krasnoyarsk.

Keywords: temperature inversion, air pollution, GFS, PM2.5, particulate matter.

УДК 551.583

Н. В. Долгова[1,2], М. А. Волкова[1]

[1]Национанальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
[2]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск
e-mail: nata.dolgova59@gmail.com, mv2101@mail.ru

ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Для оценки распределения растительного покрова и продуктивности растительности в южной части Сибири были использованы вегетационные индексы NDVI и EVI, рассчитываемые по данным ДЗЗ. Использовались данные за 22-х летний период (2000–2021 гг.) на 32-х метеорологических станциях. Обработка данных проводилась в программном обеспечении ESA Sentinel Application Platform (SNAP). Выявлены тенденции изменения вегетационных индексов, характеризующие динамику продуктивности растительности. Установлено, что значения вегетационных индексов согласуются с данными показателей увлажнения, рассчитанными при помощи данных с метеорологических станций.

Ключевые слова: вегетационные индексы, спутниковые данные, изменение климата, изменения состояния растительности.

Введение. Наблюдающееся климатические изменения влияют на увеличение повторяемости засух, массовое размножение насекомых-вредителей, увеличение числа лесных пожаров, что сказывается на продуктивности экосистем.

В начале XXI в. с изменением климатических условий происходит продвижение лесостепей на север и на восток, а степей – на север и юг [1]. В документе, обобщающем наиболее значимые исследования в проблеме изменения климата, МГЭИК-2014, приведены выводы относительно современной климатогенной динамики степной зоны. Постулируется усиление аридизации степей на фоне роста глобальной температуры в различной степени в разных частях степной зоны. Тем не менее, в ходе предварительных теоретических исследований обнаружено, что некоторые участки внутриконтинентальных степей характеризуются накоплением биомассы вследствие роста увлажненности на фоне роста температуры [2].

При наблюдении за состоянием и динамикой природных комплексов используют наземные мониторинговые исследования. Такие исследования имеют целый ряд достоинств, однако существенным недостатком является редкая сеть пунктов метеорологических наблюдений и узкие способности прогнозирования изменений, которые происходят на региональном и более высоком уровне. Спутниковый мониторинг является более эффективным методом оценки пространственно-временных изменений природных комплексов. Преимуществом данного метода является высокая степень объединения информации во времени и пространстве, возможность

© Долгова Н. В., Волкова М. А., 2022

анализа не точечной, а пространственной информации и отслеживание множества параметров природной среды [3].

Целью работы является выявление тенденции изменения ландшафтов юга Сибири для оценки продуктивности растительности с привлечением спутниковых данных.

Область, взятая для анализа, располагается в пределах 50° с.ш. – 57° с.ш. и 60° в.д. – 110° в.д. Протяжённость территории с севера на юг обуславливает распределение различных природных зон и горных областей высотной поясности: тайга, смешанные леса, лесостепь и степь.

В более раннем исследовании [4] на данной территории была проведена оценка тепло-влажностных условий по данным метеорологических станций с использованием показателей увлажнённости (коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК), коэффициент увлажнения С. А. Сапожниковой, индекс сухости М. И. Будыко). Выявлены разнонаправленные тенденции в изменении сумм осадков вегетационного периода. Отмечается продвижение засушливой зоны (зоны степей) с территории Северного Казахстана в направлении Западной Сибири (Омская, Новосибирская области), а также увеличение увлажнённости вегетационного периода на территории республик Хакасия и Тыва. Таким образом, представляет интерес оценить изменение ландшафтных зон с использованием спутниковой информации и сравнить с полученными ранее результатами.

Материалы и методы. Для расчета вегетационных индексов NDVI и EVI использовались данные за 22-х летний период (2000–2021 гг., 30 июля каждого года) спектрорадиометра Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Vegetation Indexes (MOD13Q1) версии 6.1 с портала EOSDIS Worldview [5]. Данные генерируются каждые 16 дней с пространственным разрешением 250 метров (м) в качестве продукта уровня 3 [6].

Алгоритм выбирает наилучшее доступное значение пикселя из всех данных за 16-дневный период. Используемые критерии – низкая облачность, малый угол обзора и самое высокое значение NDVI и EVI. Продукт MODIS NDVI и EVI рассчитывается на основе коэффициентов отражения поверхности с поправкой на молекулярное рассеяние, поглощение озона и аэрозоли [6].

Обработка данных проводилась с применением программного обеспечения ESA Sentinel Application Platform (SNAP) [7]. Продукты представляют собой HDF-файлы, исходные файлы – обзорные снимки земной поверхности (то есть компиляция всех полувитков за сутки). Данные были сняты по координатам 32-х метеорологических станций.

Результаты. Для оценки временной динамики вегетационных индексов за 22-х летний период были рассчитаны коэффициенты линейного тренда на каждой станции. По исследуемой территории были получены разнонаправленные тенденции в диапазоне от –0,21/10 лет на станции Астана (Казахстан) до 0,2/10 лет станция Балаганск. При этом,

тенденции роста (увеличение продуктивности) преимущественно располагаются на территории республик Хакасия и Тыва, отрицательные тенденции – на юго-западной части рассматриваемой территории.

Были построены карты, отражающие пространственное распределение вегетационных индексов NDVI и EVI за разные периоды с 2000 по 2021 гг.

На рис. 1–3 приведены наиболее характерные годы изменения значений NDVI, полученных при помощи данных дистанционного зондирования. На этих рисунках видно, что в районе станции Омск с 2000 по 2009 гг. происходит увеличение увлажнённости, а с 2009 по 2019 гг. – увеличение засушливости территории. На станции Кызыл наблюдается обратная ситуация. Это согласуется с данными, приведёнными на рис. 4, которые были получены при помощи показателей увлажнённости (ГТК).



Рис. 1. Пространственное распределение значений NDVI за 2000 г.



Рис. 2. Пространственное распределение значений NDVI за 2009 г.



Рис. 3. Пространственное распределение значений NDVI за 2019 г.

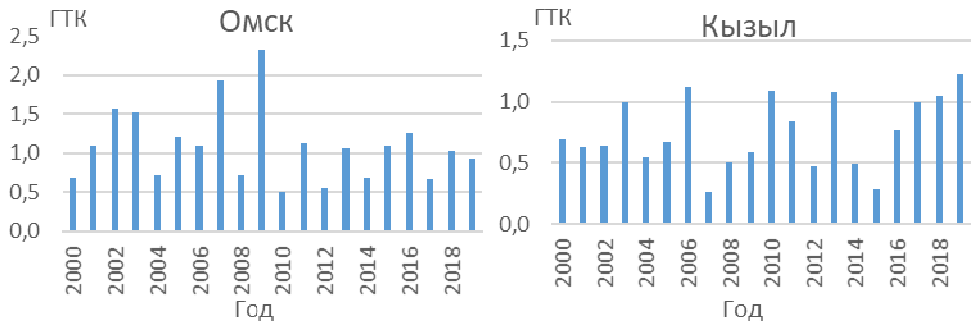


Рис.4. Временной ход гидротермического коэффициента увлажнения за период 2000–2019 гг. по данным станций Омск и Кызыл

Заключение. По результатам проделанной работы выявлено, что данные, полученные при помощи дистанционного зондирования, согласуются с ранее рассчитанными данными показателей увлажнения [4]. За рассматриваемый период отмечается увеличение увлажнения на территории республик Хакасия и Тыва, а также продвижение засушливой зоны с юго-западного района (Северный Казахстан) на территорию юга Западной Сибири.

Список литературы

1. Кобак К. И., Кондрашева Н. Ю., Турчинович И. Е. Влияние изменений климата на природную зональность и экосистемы России // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 269.

2. Курбатская С. С., Прудникова Т. Н., Монгуш Ч. О., Курбатская С. Г. Анализ изменений пастбищных угодий Тувы и их продуктивности с учетом климатических особенностей // Экосистемы Центральной Азии: исследования, сохранение, рациональное природопользование: материалы XI Убсунурского междунар. симп. Кызыл: РИО Тувинского гос. ун-та, 2012. С. 3–8.

3. Розенберг Г. С., Саксонов С. В., Кузнецова Р. С., Сенатор С. А. Космический мониторинг в ландшафтно-экологических исследованиях // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. № 1-1.

4. Долгова Н. В., Волкова М. А. Современные тенденции температурно-влажностного режима на территории Южной Сибири и Северного Казахстана // Динамика и взаимодействие геосфер земли: материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. В 3-х т. Томск, 08–12 ноября 2021 г. Томск: Томский центр научно-технической информации, 2021. С. 128–130.

5. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]: URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov (дата обращения 24.01.2022).

6. MOD13Q1 v061 [Электронный ресурс]: Индексы вегетации MODIS/Terra. URL: https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v061/ (дата обращения 27.01.2022).

7. SNAP [Электронный ресурс]: URL: http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/ (дата обращения 5.02.2022).

N. V. DOLGOVA[1,2], M. A. VOLKOVA[1]

[1]National Research Tomsk State University, Tomsk
[2]Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Tomsk
e-mail: nata.dolgova59@gmail.com, mv2101@mail.ru

ASSESSMENT OF VEGETATION PRODUCTIVITY FROM SATELLITE DATA

Vegetation indices NDVI and EVI, calculated from remote sensing data, were used to assess the distribution of vegetation cover and vegetation productivity in the southern part of Siberia. Data for the 22-year period (2000–2021) at 32 meteorological stations were used. The data were processed using ESA Sentinel Application Platform (SNAP) software. The trends of vegetation indices changes characterizing the vegetation productivity dynamics were revealed. It was shown that the values of vegetation indices agree with the data of moisture indices calculated with data from meteorological stations.

Keywords: vegetation indices, satellite data, climate change, vegetation changes.

УДК 528.87, 528.854

Л. Г. Евстратова, А. А. Антошкин

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
e-mail: lge_21@mail.ru, santex132@gmail.com

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАРАСТАНИЯ ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ ПО МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА, ОСНОВАННОГО НА ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗЕ

Аннотация. По экономическим меркам, вовлечение в оборот сельскохозяйственных земель, которые только начинают зарастать древесно-кустарниковой растительностью, более выгодно, чем земель, которые уже полностью заросли. В работе приведены результаты исследований, разработанной методики выявления зарастаний залежных земель по разновременным космическим снимкам на основе вейвлет-анализа. Исследование проводилось на основе тестовых изображений, а также космических снимков QuikBird и WorldView. Показано, что вейвлет-анализ позволяет быстро установить участки, на которых произошли изменения. Коэффициент корреляции, вычисленный для различных уровней вейвлет-разложения, полученных на разные даты, служит индикатором наличия изменений.

Ключевые слова: разновременные многоспектральные космические снимки, выявление изменений на основе вейвлет-анализа, зарастание залежных земель.

Введение. Для развития сельского хозяйства и рационального использования природных ресурсов Российской Федерации требуется информационное обеспечение мониторинга состояния земель. В Российской Федерации реализуется государственная программа вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения. Начиная с 1980-х гг., из сельскохозяйственного оборота выбыло около 30 миллионов гектар используемых пахотных земель [1, 2], огромное количество которых на данный момент заросло или только начинает зарастать древесно-кустарниковой растительностью. По экономическим меркам, ввод в оборот этих земель более выгоден, чем земель, которые уже полностью заросли.

Большое количество исследований по анализу состояния сельскохозяйственных угодий по космическим многоспектральным снимкам выполняется с использованием алгоритмов распознавания образов для классификации и выделения объектов дешифрирования численными методами, в которых используются спектральные яркости в качестве дешифровочных признаков. Такой автоматизированный поход не позволяет достигать высокой достоверности, и потому прибегают к визуальному анализу, что снижает оперативность обработки данных ДЗЗ и в целом эффективность ведения мониторинга.

Известно, что алгоритмы, основанные на применение текстурных признаков для классификации космических изображений с высоким

© Евстратова Л. Г., Антошкин А.А., 2022

пространственным разрешением на местности, позволяют повысить достоверность классификации природных объектов [3–5].

В данной работе в качестве дешифровочных признаков предложено использовать коэффициенты вейвлет-разложения, полученные по вейвлет-функциям Добеши.

Краткое описание используемого метода. Основная идея вейвлет-анализа состоит в том, чтобы получить функцию $\psi(t)$, известную как материнский вейвлет (1), и сгенерировать семейство масштабированных и преобразованных версий этой функции [6]:

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

где a – масштабирующий параметр; b – параметр сдвига; $\Psi(t–b/a)$ – базисная вейвлет-функция (материнский вейвлет); $1/\sqrt{a}$ – нормирующий коэффициент.

Величина масштабирующего коэффициента $0 \le |a| \le 1$ соответствует «узкому окну» анализирующего вейвлета и обеспечивает точную локализацию высоких частот в функции $\psi(t)$, а параметр $|a| \ge 1$ обеспечивает «широкое окно» и используется для анализа длинных волн соответствующих функции $\psi(t)$.

Базисная функция Добеши, определяется как [6]:

$$H(t) = \left(\frac{1+e^{-it}}{2}\right)^N B(t), \quad (2)$$

где B – полином степени $N-1$ по e^{-it}.

Отметим, что чем большее число нулевых моментов содержит вейвлет, тем более высокочастотную структуру сигнала он позволяет анализировать.

В работе решается задача выявления зарастания древесно-кустарниковой растительностью залежных земель. Изображения древесно-кустарниковой растительности отличаются от окружающей их растительности на залежи по яркости, тону и текстуре. Так, на изображении залежи, где есть резкие перепады значений яркости, будут получены большие значения коэффициентов вейвлет-разложения, чем на однородных участках. Таким образом, используя это свойство, можно определить участки снимка, на которых изображены участки залежных земель, подверженные зарастанию древесно-кустарниковой растительностью.

Исходные данные и методика исследования. Для выполнения экспериментальных исследований использовались космические снимки высокого пространственного разрешения на местности QuikBird (2008 г.) и WorldView (2020 г). Для программной реализации алгоритма автоматизированного выявления зарастания древесно-кустарниковой растительностью залежных земель по многоспектральным космическим изображениям с помощью метода, основанного на вейвлет-анализе, был использован язык Python 3.8.

На первом этапе на основе выполненных теоретических и практических исследований авторами был сделан выбор анализирующей вейвлет-функции Добеши, как подходящей для данной задачи. В качестве дешифровочного признака были выбраны диагональные коэффициенты вейвлет-разложения.

Оценка качества выбранной системы дешифровочных признаков производилась на основе анализа вычисленных коэффициентов корреляции между соответствующими уровнями вейвлет-разложения, полученными на тестовых (на пяти изображениях из альбома Бродатца [7]) и реальных данных. Для тестовых изображений были искусственно внесены изменения.

Анализ полученных результатов показал, что пороговое значение коэффициента корреляции 0,820 между вторым и четвертым уровнями вейвлет-разложения является индикатором определения изменения. На рис. представлены результаты выявления изменений на основе вейвлет-анализа, красными квадратами показаны участки с зарастанием древесно-кустарниковой растительностью: а) участки с зарастанием, выделенные алгоритмом и наложенные на вейвлет-образы; б) участки с зарастанием, выделенные алгоритмом и наложенные на исходные снимки.

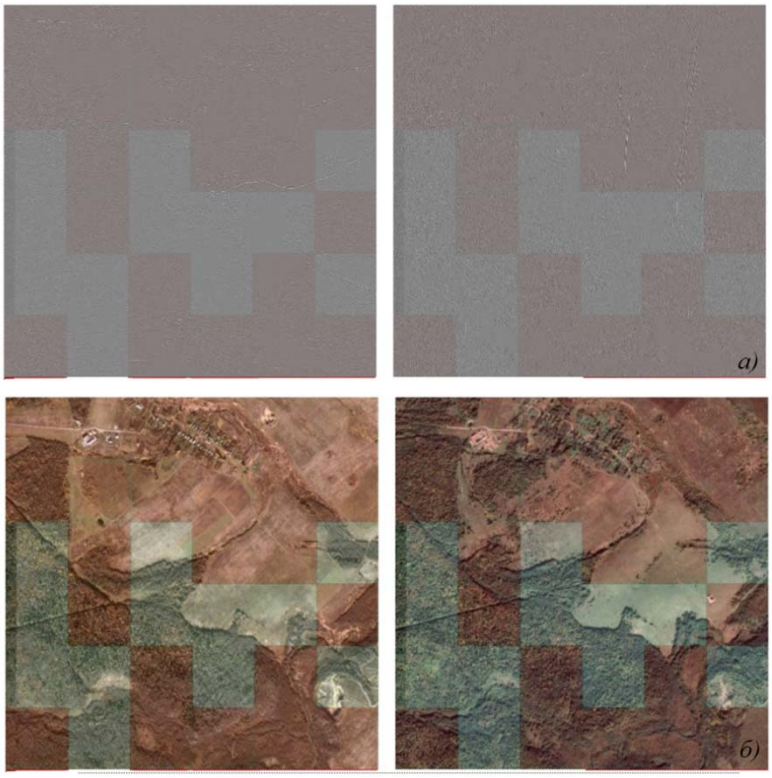


Рис. Фрагменты вейвлет-образов и снимков QuikBird, WorldView

Результаты экспериментальных исследований

В данном исследовании применена методика автоматизированного выявления зарастания древесно-кустарниковой растительностью залежных земель по разновременным многоспектральным космическим снимкам с помощью метода, основанного на вейвлет-анализе, которая показала высокую достоверность (97 %). Степень зарастания залежных земель на исследуемый район по обработанным космическим снимкам составила 22 %.

Программно реализованный алгоритм состоит из следующих этапов: 1) разделение космического снимка исследуемой территории на участки; 2) вейвлет-преобразование; 3) бинаризация; 4) вычитание разновременных бинарных изображений; 5) автоматическая векторизация изменений на снимках. Предварительно выполняется трансформирование космических снимков.

Заключение. Предложенный подход позволяет повысить оперативность и качество ведения государственного земельного надзора на землях сельскохозяйственного назначения и понизить капиталовложения и расходы на выполнение работ, направленных на установление границ неиспользуемых сельскохозяйственных угодий и введение земель в оборот.

Список литературы

1. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 404 с.

2. Крючкова Е. Сельхозземли оросят деньгами // Коммерсантъ. 2020. № 3/П от 13.01.2020. С. 2.

3. Синявский Ю. Н., Пестунов И. А., Дубровская О. А. и др. Методы и технология сегментации мультиспектральных изображений высокого разрешения для исследования природных и антропогенных объектов // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 1. С. 127–140.

4 Харалик Р. М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. 1979. Т. 67. № 5. С. 98–120.

5. Пантюшин В. А. Оценка информативности текстуры и структуры цифровых изображений // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2020. № 6. С. 48–53.

6. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования. Новосибирск: НГТУ, 2003. 104 с.

7. Brodatz P. A. Textures: A Photographic Album for Artists and Designers. Dover Publications, 1966.

L. G. Evstratova, A. A. Antoshkin

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

DEGREE ASSESSMENT OF FALLOW LANDS OVERGROWTH FROM MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES USING A METHOD BASED ON WAVELET ANALYSIS

By economic standards, the involvement in the agricultural lands turnover that are just beginning to overgrow with tree and shrub vegetation is more profitable than lands that are already completely overgrown. The paper presents the research results the developed methodology for fallow lands overgrowth detecting from multi-time satellite images based on wavelet analysis. The research was conducted on the basis of test images, as well as satellite images of Quickbird and WorldView. It is shown that the wavelet analysis allows you to quickly identify the areas where changes have occurred. The correlation coefficient calculated for different levels of the wavelet decomposition obtained on different dates serves as an indicator of the changes presence.

Keywords: multi-temporal multispectral space images, changes detection based on wavelet analysis, fallow lands overgrowth.

УДК 519.6

Н. Б. Захарова[1], Е. И. Пармузин[1], Т. О. Шелопут[1,3], В. И. Агошков[1,2], Н. Р. Лёзина[1]

[1]Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[3]Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
e-mail: n.zakharova@inm.ras.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ИВС «ИВМ РАН – ЧЕРНОЕ МОРЕ» С ЦКП «ИКИ – МОНИТОРИНГ»

Аннотация. Настоящая работа посвящена интеграции двух систем с целью моделирования и мониторинга состояния морских акваторий. В работе используются данные наблюдений со спутников о состоянии Черного и Азовского морей, предоставляемые Центром коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ – Мониторинг». Информационно-вычислительная система (ИВС) вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН – Чёрное море» создана в ИВМ РАН с возможностью ассимиляции данных наблюдений о температуре поверхности моря и позволяет рассчитывать основные гидрофизические параметры исследуемых сред. В ИВС реализован алгоритм вариационной ассимиляции данных наблюдений о температуре поверхности моря с различных спутников, учитывающий специфику получаемых данных. По модели гидротермодинамики Черного и Азовского морей с использованием процедуры вариационной ассимиляции данных построен реанализ. Трехмерные поля температуры, солености и скорости течений передаются в информационную систему «See the Sea», позволяющую визуализировать и анализировать полученные данные, для их дальнейшего использования.

Ключевые слова: температура поверхности моря, вариационная ассимиляция, обработка данных, данные наблюдений со спутников, дистанционное зондирование, центр коллективного пользования.

Введение. Целью работы является интеграция системы моделирования термодинамики морских акваторий, включающей процедуры ассимиляции данных, с данными наблюдений о состоянии морских акваторий, имеющимися в центре коллективного пользования. Система вариационной ассимиляции данных позволяет учитывать реальные данные наблюдений при моделировании и прогнозировании состояния исследуемых сред. Учет данных наблюдений при математическом моделировании может существенно улучшить точность реанализа, что делает задачу ассимиляции данных важным шагом в задачах численного моделирования.

Информационно-вычислительная система вариационной ассимиляции данных «ИВМ РАН – Черное море» основана на модели

© Захарова Н. Б., Пармузин Е. И, Шелопут Т. О., Агошков В. И., Лёзина Н. Р., 2022

термодинамики Черного и Азовского морей Institute of Numerical Mathematics Ocean Model (INMOM) [1], процедурах ассимиляции данных наблюдений [2], и включает блок обработки данных наблюдений, а также пользовательский интерфейс для запуска расчётов [3]. В численной модели термодинамики реализован метод расщепления по направлениям и физическим процессам, сигма-система координат по вертикальной переменной. С помощью модели можно проводить расчёты основных гидрофизических параметров (температура, соленость, уровень, скорости течений), а также получать производные от них (вертикальные скорости, плотность, давление и т. д.). В качестве входящих параметров модели используются внешнее атмосферное воздействие и граничные условия (скорость ветра, солнечная радиация, температура приповерхностного слоя атмосферы, осадки и стоки рек).

В работе используются данные о температуре поверхности Черного и Азовского морей за 2015–2022 гг. для ассимиляции в численной модели термодинамики морей. Данные получены из Центра коллективного пользования «ИКИ – Мониторинг», крупного объекта научной инфраструктуры, созданного для мониторинга природной среды, обеспечения доступа к многолетним архивам спутниковых данных, позволяющим проводить их анализ и обработку [4].

В работе реализованы алгоритмы вариационной ассимиляции и обработки данных, учитывающие специфику получаемых данных наблюдений. Проведены расчеты реанализа по численной модели термодинамики Черного и Азовского морей. Рассчитанные поля основных гидрофизических параметров переданы в систему хранения и визуализации данных «See the Sea» для последующих исследований.

Алгоритмы и методы. Данные наблюдений о температуре поверхности моря получены с различных спутников (Aqua, Terra, SNPP) и приборов (MODIS, VIIRS), поступают нерегулярно и зачастую покрывают только часть исследуемой акватории в силу погодных условий, особенностей измерительных приборов и траекторий спутников. На основе анализа данных и ошибок данных реализован алгоритм, основанный на определении весовых коэффициентов, характеризующих близость данных наблюдений к известным проверенным и (или) принятым «эталонными» значениям [5]. На основании полученных полей данных дистанционного зондирования и дополнительного набора среднесуточных данных с европейского портала Коперникус (www.marine.copernicus.eu) с помощью предложенного метода построены весовые коэффициенты. Вычисленная матрица весовых коэффициентов используется в алгоритме вариационной ассимиляции данных наблюдений в численной модели термодинамики Черного и Азовского морей.

В настоящей работе рассматривается вариационная ассимиляция данных, основанная на теории обратных задач и сопряженных уравнений. В задаче вводится функционал стоимости, характеризующий «близость» решения математической модели к данным наблюдений. Ставится задача

поиска решения, минимизирующего данный функционал. Одним из методов решения поставленной задачи является сведение ее к системе оптимальности, состоящей из уравнения модели, сопряженного уравнения и уравнения для управления. В данном случае управлением является функция потока тепла на поверхности моря. Для учета ошибок наблюдений в функционал вводятся ковариационные матрицы ошибок данных, посчитанные на основе статистических свойств данных наблюдений за 1982–2017 гг.

Результаты. На основе получаемых данных и используемой численной модели термодинамики Черного и Азовского морей построен реанализ за 2019 г. Полученные в результате численных расчетов трехмерные поля температуры, солености, скорости течений подготовлены и переданы в систему «See the Sea» для дальнейшего использования. Спутниковый сервис «See the Sea» – это информационная система, ориентированная на работу с данными спутниковых наблюдений для решения междисциплинарных задач исследования Мирового океана [6]. Для данных, переданных в систему, реализована возможность их визуализации, отображения изолинейных карт для заданного гидрофизического параметра на определенной глубине в выбранное время, вертикальных профилей и разрезов.

В настоящее время в демонстрационном режиме в системе «See the Sea» любому пользователю доступны результаты расчета трехмерного поля температуры Черного, Азовского и Мраморного морей за 2019 г., полученные в рамках данной работы.

Заключение. В работе представлена интеграция системы ассимиляции данных наблюдений в численной модели гидротермодинамики Черного и Азовского морей и центра коллективного пользования «ИКИ – Мониторинг», обеспечивающего доступ к многолетним архивам спутниковых данных. Проведены расчеты численной модели с процедурами вариационной ассимиляции получаемых данных, построены поля основных гидрофизических параметров исследуемых акваторий. Построенный реанализ передан в систему «See the Sea» с целью мониторинга и анализа состояния морских сред.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-20035 «Информационно – вычислительная система вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН – Черное море» и её интеграция с программно-аппаратным комплексом ЦКП «ИКИ – Мониторинг»»).

Список литературы

1. Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. Vol. 27. No. 1. P. 95–111.

2. Agoshkov V. I. et al. Variational Data Assimilation in the Mathematical Model of the Black Sea Dynamics // Physical Oceanography. 2019. Vol. 26. No. 6. P. 515–527.

3. Агошков В. И. и др. Информационно-вычислительная система «ИВМ РАН – Черное море». Москва, ИВМ РАН, 2016.

4. Лупян Е. А. и др. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.

5. Zakharova N. B., Parmuzin E. I. Data analysis for variational assimilation of the surface temperature of the Black and Azov Seas // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21, ES6002.

6. Лупян Е. А. и др. Спутниковый сервис See the Sea – инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.

N. B. Zakharova[1], E. I. Parmuzin[2], T. O. Sheloput[2],
V. I. Agoshkov[2], N. R. Lezina[2]

[1]Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Moscow, Russia
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[3]Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia
e-mail: n.zakharova@inm.ras.ru

INFORMATIONAL COMPUTATIONAL SYSTEM «INM RAS – BLACK SEA» AND CENTER FOR COLLECTIVE USE «IKI – MONITORING» INTEGRATION

This work is devoted to the integration of two systems for the purpose of modeling and monitoring the state of marine waters. Authors uses satellite observation data on the state of the Black and Azov Seas, provided by the Center for Collective Use «IKI – Monitoring». The information and Computing system (ICS) of variational assimilation of observational data «INM RAS – Black Sea» was created at the INM RAS with the possibility of assimilation of observation data on sea surface temperature and allows calculating the main hydrophysical parameters of the water area. The ICS implements variational assimilation of observation data on the sea surface temperature from various satellites. The assimilation algorithm is implemented, which allows taking into account the specifics of the data obtained. According to the model of hydrothermodynamics of the Black and Azov Seas, a reanalysis was constructed using the procedure of variational data assimilation. Three-dimensional fields of temperature, salinity and current velocity are transmitted to the «See the Sea» information system, which allows visualizing and analyzing the data obtained for their further use.

The work is supported by the Russian Science Foundation (project №19-71-20035).

Keywords: sea surface temperature, data assimilation, data processing, satellite data, collective use center.

УДК 528.88, 630

С. Т. Им[1,2,3]

[1]Институт леса (ФИЦ КНЦ СО РАН), Красноярск, Россия
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий, Красноярск, Россия
[3]Хакасский государственный университет, Абакан, Россия
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

ДИНАМИКА ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ

Аннотация. На основе временной серии карт MODIS IGBP MCD12Q1 за 2001–2020 гг. проведен анализ динамики лесных территорий Хакасии. Выявлены два периода, разделенные 2014–2015 гг., в течение которых наблюдалось сокращение площади древостоев (r^2 = 0.99; p < 0.05) и последующих рост (r^2 = 0.98; p < 0.05). Наблюдаемые процессы связаны с рельефом местности. В целом, на высотах выше 1 400 м над у.м. происходило преимущественно возрастание площадей древостоев, а ниже 800 м над у.м. преобладало сокращение древостоев. На динамику площадей древостоев значимо оказывали влияние апрельские и майские температуры (r = 0.52–0.57, –0.65; p < 0.05), и июньские и июльские осадки (r = –0.50, 0.46; p < 0.05).

Ключевые слова: Хакасия, MODIS, динамика лесов, климат.

В начале 21 в. в лесах Алтае-Саянского регионе наблюдалась деградация темнохвойных лесов, связанная с климатическими трендами [1]. Однако в экотонах горной лесотундры происходит распространение деревьев вверх по градиенты высоты и увеличение их сомкнутости [2, 3]. В Хакасии темнохвойные деревья произрастают преимущественно в горной труднодоступной местности. Для их изучения целесообразно применить данные дистанционного зондирования Земли в совокупности с ГИС-технологиями. Цель данной работы заключалась в проведении исследования динамики лесных территорий Хакасии в контексте современного климата.

Объект исследования. Анализировались лесные территории республики Хакасии (51.5°–55° с.ш.; 88°–92° в.д.). Площадь анализируемой территории ~61,5 тыс. кв. км. Лесами покрыто ~55 % территории. В среднем в год выпадает 692 мм осадков. Средняя годовая температура –0.2 °С.

Материалы. Динамика лесных территорий оценивалась на основе серии карт наземного покрова IGBP MODIS MCD12Q1 за 2001–2020 гг. (https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006; пространственное разрешение 500 м) и вегетационных индексов NDVI и EVI на основе продукта MOD13Q1 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v061; пространственное разрешение 250 м). Для анализа связей с топографией местности использовалась цифровая модель рельефа Copernicus DEM

© Им С. Т., 2022

GLO-30 (https://spacedata.copernicus.eu/explore-more/news-archive/-/asset_publisher/Ye8egYeRPLEs/blog/id/434960; пространственное разрешение 30 м). Использовались климатические данные ERA5-Land за 1950–2020 гг. (https://www.ecmwf.int/en/era5-land; пространственное разрешение 0.1 градус).

Методика. Для уменьшения ошибок во временной серии карт IGBP MCD12Q1 произведена их гармонизация с помощью пятилетнего фильтра большинства. Анализировались следующие классы IGBP: вечнозеленые хвойные леса (ENF); лиственничные леса (DNF); лиственные леса (DBF); смешанные леса с сомкнутостью > 60 % (MF); Смешанные леса с сомкнутостью 30–60 % (WS); смешанные леса с сомкнутостью < 30 % (S); кустарники (CS+OS); травяные сообщества (G+C+CNVM). Рассчитана динамика площадей классов лесных территорий, которая сопоставлена с элементами рельефа и климатическими переменными. Для учета неравномерного распределения элементов рельефа площади классов нормировались по методу, описанному в [1]. Связь динамики площадей с климатическими переменными оценивалась с помощью корреляционного анализа.

Геообработка производилась средствами программного пакета ESRI ArcGIS Desktop. Статистические расчеты производились в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. С 2001 по 2014 гг. площадь древостоев сокращалась на 71 кв. км в год (r^2 = 0.99; p < 0.05; минус 945 кв. км), а в последующие годы их площадь почти восстановилась (рис. 1, *а*). В основном это связано с динамикой площади травяных сообществ (рис. 1, *б*). На этом фоне площадь кустарниковых сообществ уменьшалась в течение всего периода наблюдений на 2.9 кв. км в год (r^2 = 0.69; рис. 1, *в*).

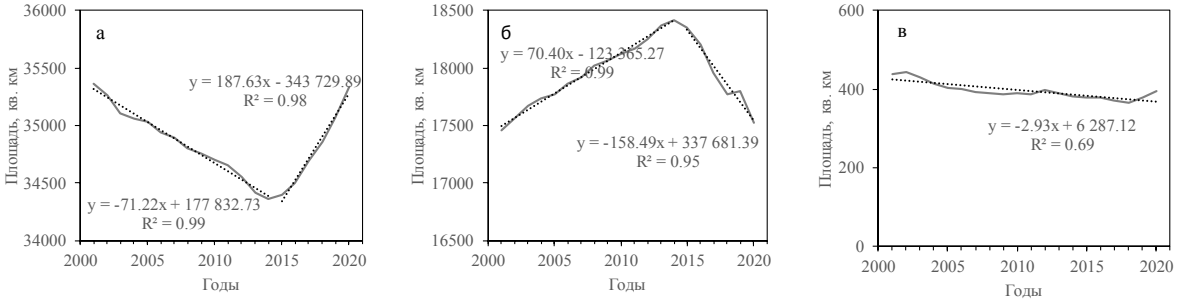


Рис. 1. Динамика площадей обобщенных классов наземного покрова на территории Хакасии в 2001–2020 гг.: *а* – древостои; *б* – травяные сообщества; *в* – кустарниковые сообщества

Динамика различных по породному составу древостоев в зависимости от высоты над уровнем моря значительно отличаются. Так площадь хвойных вечнозеленых лесов (ENF) уменьшалась на высотах до 1000 м в течение 2003–2007 гг., а после стала нарастать (рис. 2, *а*). Наибольший рост площади ENF наблюдался на высотах выше 1 500 м над у.м. Похожее наблюдается для лиственных лесов (DBF; рис. 2, *б*). Также,

из анализа карт IGBP следует, что лиственничные древостои в течение периода наблюдений значительно увеличили свою площадь на высотах 400–1 400 м над у.м. (~400 % к 2018 г.), но при этом их площадь сократилась на высотах больше 1 600 м над у.м. (рис. 2, *в*). В отличие от предыдущих площадь смешанных лесов (MF) сокращалась на всех высотах до 1 800 м над у.м., а выше площадь возросла (рис. 2, *г*).

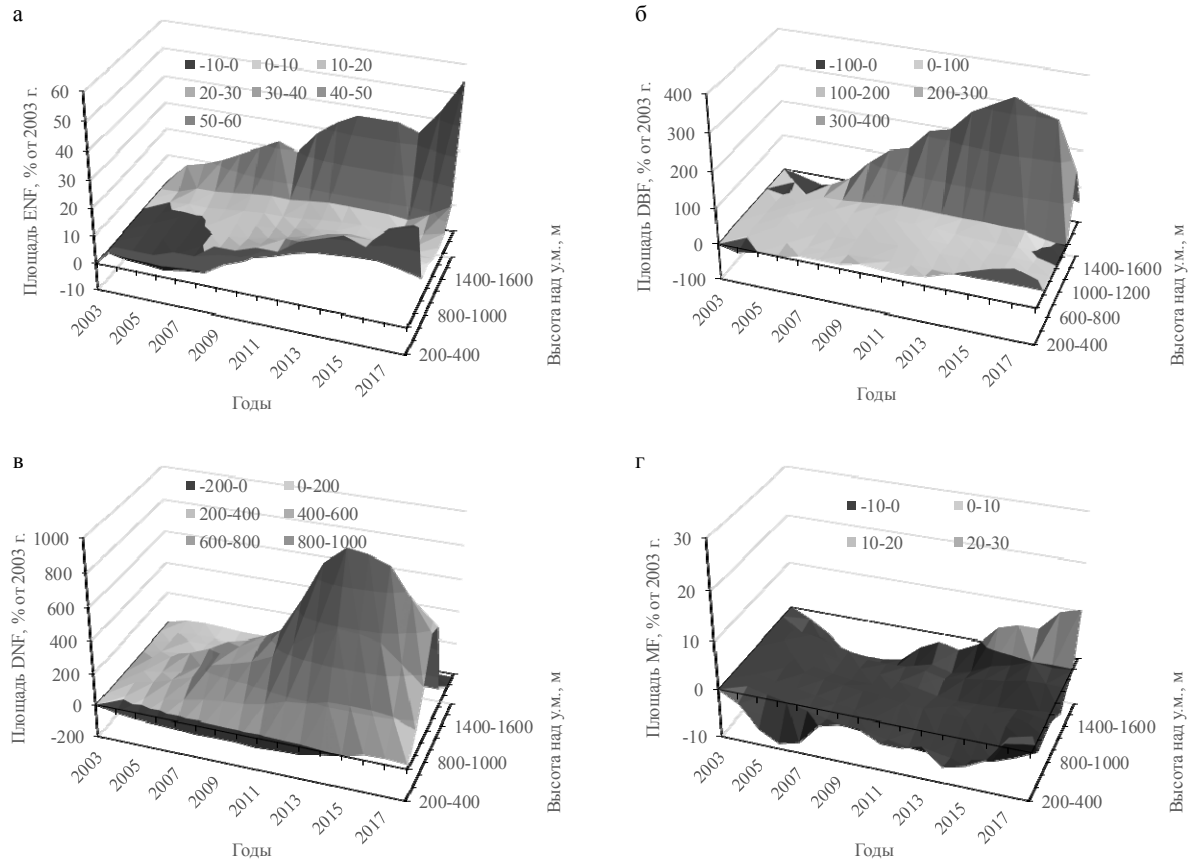


Рис. 2. Динамика площадей хвойных вечнозеленых древостоев на территории Хакасии относительно высоты над уровнем моря по данным гармонизированных карт IGBP

Выявлено, что динамика площадей ENF и DNF положительно связана с температурами апреля (r = 0.52 и 0.54; $p < 0.05$); MF связаны положительно с температурами мая (r = 0.57; $p < 0.05$), а DBF – отрицательно (r = –0.65; $p < 0.05$). Осадки в июне отрицательно влияли на площадь DBF (r = –0.50; $p < 0.05$), а июльские – положительно на MF (r = 0.46; $p < 0.05$).

Заключение. Наблюдаемые по картам IGBP изменения в лесных территориях Хакасии являются неоднозначными. В целом, наблюдается точка перегиба в 2014–2015 гг., когда динамика площади древостоев сменилась с отрицательной на положительную, и к 2020 г. почти достигла величины 2001 г. На происходящие процессы оказывали значимое влияние рельеф местности, апрельские и майские температуры и июньские и июльские осадки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-20012, https://rscf.ru/project/22-17-20012) при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

Список литературы

1. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., Shushpanov A. S., Golyukov A. S. Climate-driven conifer mortality in Siberia // Global Ecology and Biogeography. 2020. Vol. 30, Issue 2. P. 543–556. URL: https://doi.org/10.1111/geb.13243 (дата обращения: 23.06.2022)

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 Sciences. 2017. Vol. 14(3). P. 442–452. URL: https://doi.org/10.1007/s11629-016-4286-7 (дата обращения: 23.06.2022)

3. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. Alpine ecotone in the Siberian Mountains: vegetation response to warming // Journal of Mountain Sciences. 2021. Vol. 18. P. 3099–3108. URL: https://doi.org/10.1007/s11629-021-6876-2 (дата обращения: 23.06.2022)

S. T. Im[1,2,3]

[1]V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS), Krasnoyarsk, Russia
[2]Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
[3] Khakassian State University, Abakan, Russia
e-mail: stim@ksc.krasn.ru

DYNAMICS OF FOREST TERRITORIES IN REPUBLIC OF KHAKASSIA AND CLIMATIC TRENDS

Based on the time-series of MODIS IGBP MCD12Q1 maps for the 2000–2020 years an analysis of the dynamics of forest territories in Khakassia was carried out. Two periods were identified, during those periods the decrease (r^2 = 0.99; p < 0.05) and the following increase (r^2 = 0.98; p < 0.05) of the forested area were observed. Observed processes are related to the relief. In general, at the elevation higher than 1400 m a.s.l. mostly an increase of the stand area was observed but at the lower than 800 m a.s.l. a decrease of stands prevailed. April and May temperatures (r = 0.52–0.57, –0.65; p < 0.05) and June and July precipitation (r = –0.50, 0.46; p < 0.05) affected on the forest area dynamics.

Keywords: Khakassia, MODIS, dynamics of forest, climate.

УДК 551.524, 550.34, 551.510.535

С. А. Имашев[1], Л. Г. Свердлик[1,2]

[1]Кандидат физико-математических наук, Научная станция РАН в Бишкеке, Кыргызстан
[2]Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызстан
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ АНОМАЛИЙ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ НИЗКОШИРОТНОМУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЮ НА СУМАТРЕ

Аннотация. Мы представляем результаты сравнительного анализа аномальных вариаций температуры в нижней атмосфере и полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, которые основаны на глобальных данных реанализа MERRA-2 и навигационной системы GNSS / GPS и относятся к периоду подготовки крупного низкоширотного землетрясения магнитудой M = 8.6, произошедшего 11 апреля 2012 г. на Суматре (Индонезия). Обработка данных спутниковых измерений с применением разработанных алгоритмов позволила выделить и идентифицировать аномалии исследуемых параметров, которые располагались вблизи эпицентра землетрясения и достигали максимума 06 апреля 2012 г. (за 6 дней до события). При всем различии пространственных масштабов и динамики временной эволюции возмущения в ионосфере и атмосфере были достаточно близки по форме. Такое совпадение в пространстве и времени двух независимо полученных результатов можно рассматривать, как свидетельство корреляции между аномалиями атмосферы и ионосферы, а, соответственно, едином механизме их формирования.

Ключевые слова: землетрясение, атмосфера, ионосфера, температура, аномалия, геомагнитная активность.

Предметом многих исследований в последние десятилетия являлась идентификация ионосферных возмущений, связанных с процессами подготовки сейсмических событий. Этому способствовало расширение глобальной сети станций ГНСС и развитие технологий обработки спутниковых данных. Большое количество работ посвящено анализу предсейсмических аномальных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере (Total Electron Content, TEC) [1]. При этом данные ГНСС наблюдения обеспечивают эффективный способ оценки значений ПЭС с высокой точностью и большим пространственным и временным охватом. Исследования предсейсмических аномальных изменений ПЭС обычно основаны на анализе наборов карт распределения ПЭС, что позволяет выделить как расположение и пространственные масштабы самих аномалий, так и их продолжительность во времени.

При анализе карт распределения аномалий ПЭС было выявлено, что за ~6 дней до события M = 8.6 [2], произошедшего 11 апреля 2012 г. на Суматре (Индонезия), в магнитно-сопряженных областях наблюдались

© Имашев С. А., Свердлик Л. Г., 2022

аномалии ПЭС, локализованные в пространстве вблизи эпицентра предстоящего землетрясения (рис. 1), что соответствует результатам предыдущих исследований, например [3]. Продолжительность предсейсмического ионосферного возмущения составляла ~4–6 часов.

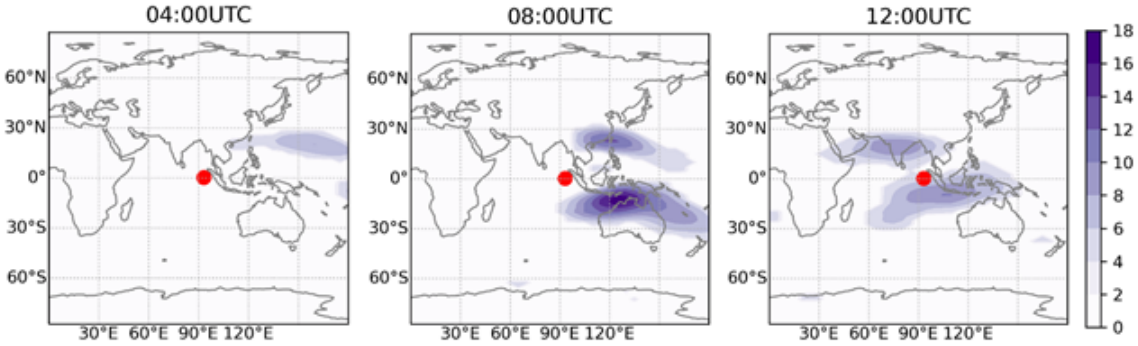


Рис. 1. Развитие во времени пространственного распределения аномалий ПЭС 05.04.2021 (за 6 дней до события M = 8.6, эпицентр которого отмечен маркером)

Результаты спутниковых измерений температуры [4] над эпицентральной областью землетрясения M = 8.6 на изобарических уровнях 100 и 70 hPa показаны на рис. 2, *a*. Амплитуды короткопериодных вариаций температуры в феврале – мае 2012 г. были относительно низкими в абсолютном выражении, что характерно для измерений над океанической поверхностью, и составляли ±3.0–6.0 К.

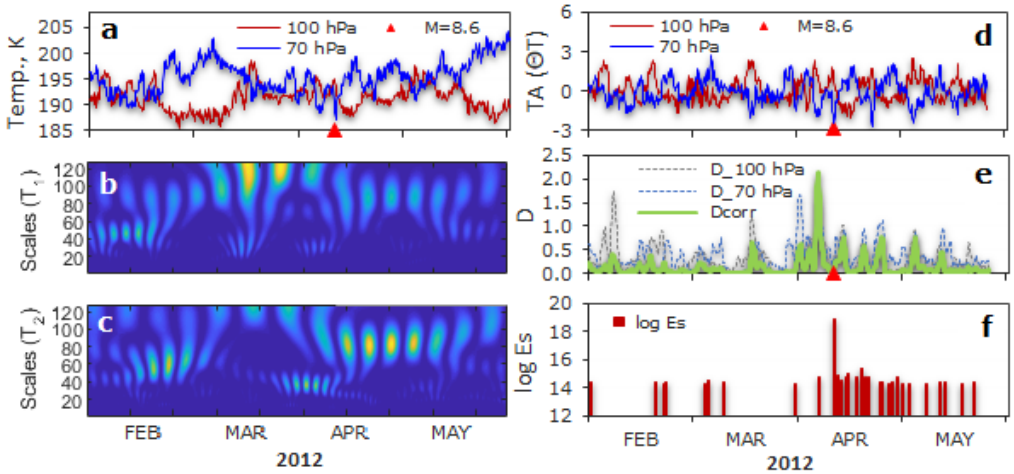


Рис. 2. Временные ряды температуры T_1 и T_2 на уровнях 100 и 70 гПа (*a*), спектры коэффициентов вейвлет-преобразования (*b*, *c*), аномалии температуры ΔT (*d*), параметр D_{CORR} (*e*), логарифм сейсмической энергии log(Es) (*f*) в период с февраля по май 2012 г.

Исследование динамики периодичностей временных рядов температуры, выполненное с использованием непрерывного вейвлет-преобразования (Morlet wavelet) для диапазона периодов от 1 до 15 суток (или 8–120 отсчетов), показало, что интенсивные вариации с периодами 4–6 суток отчетливо проявлялись на обоих изобарических уровнях за 6–7 дней до землетрясения (рис. 2, *b*, *c*). Расчеты параметра D_{CORR}, выполненные в соответствии с алгоритмом [5], показали, что

рассматриваемый период характеризовался четко выраженным максимумом ($D_{CORR} > 2.0$), который указывал на аномальные предсейсмические изменения температуры (рис. 2, *e*). Высокие значения D_{CORR} в условиях спокойной геомагнитной обстановки ($|D_{ST}| < 20nT$) рассматривались, как реакция верхней тропосферы / нижней стратосферы на процесс подготовки землетрясений (рис. 2, *f*).

Набор карт пространственного распределения параметра D_{CORR} демонстрирует динамику процесса эволюции аномалий температуры в период с 05 апреля (00:00 UTC) по 06 апреля (15:00 UTC) 2012 г. (рис. 3). Область наиболее высоких значений параметра D_{CORR} наблюдалась также за 6 дней до землетрясения и была локализована в пространстве с горизонтальными размерами, составляющими порядка нескольких сот километров (рис. 3, *b*). Ее расположение оставалось достаточно стабильным на протяжении ~2 суток, что соответствует данным, приведенным в [6].

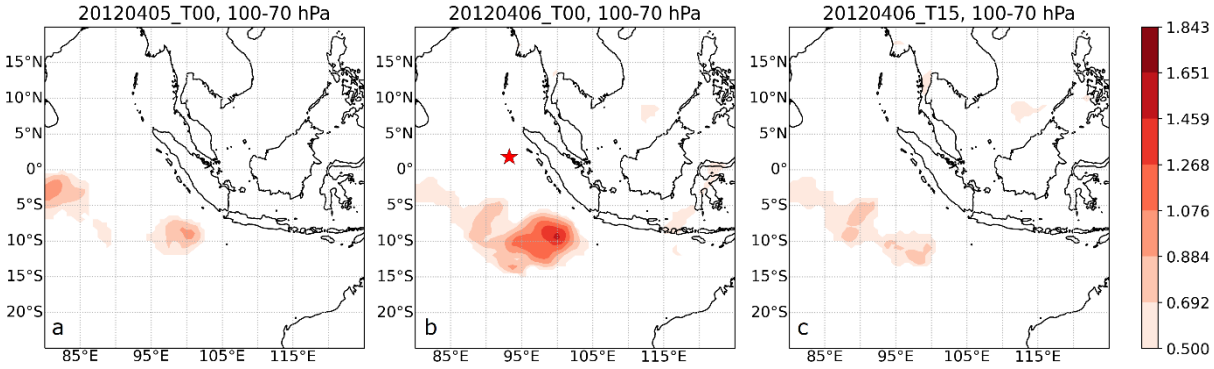


Рис. 3. Эволюция пространственного распределения температурной аномалии 05.04.2012 (00:00 UTC) (*a*), 06.04.2012 (00:00 UTC) (*b*) и 06.04.2012 (15:00 UTC) (*c*). Эпицентр сейсмического события (93.063 °E; 2.327 °N) отмечен красным маркером

При всем различии пространственных масштабов и динамики временной эволюции возмущений в ионосфере (рис. 1) и атмосфере (рис. 3) области аномальных значений исследуемых параметров в момент максимального развития располагались вблизи эпицентра, а их форма достаточно близко соответствовала друг другу. Такое совпадение двух независимо полученных результатов можно рассматривать, как свидетельство корреляции между аномалиями атмосферы и ионосферы, а, соответственно, подтверждение гипотезы о распространении возмущения через атмосферу над эпицентральной областью предстоящего события.

Максимум дисперсии температурной аномалии на изобарическом уровне 100 hPa наблюдался 05 апреля 2012 г. с 3:00 до 6:00 UTC, т. е. на 3–6 часов опережал возмущение ПЭС.

Таким образом, совместный анализ пространственно-временных изменений температуры в нижней атмосфере и ПЭС в ионосфере показал наличие коррелированных аномальных вариаций этих параметров, свидетельствующих вероятной связи с процессами подготовки землетрясения M = 8.6 на Суматре 11 апреля 2012 г. Максимумы в развитии аномалий

исследуемых параметров наблюдались за 6 суток до землетрясения в относительно спокойных геомагнитных условиях. Одним из возможных объяснений этой взаимосвязи может являться то, что рассматриваемое землетрясение являлось мощным источником атмосферных гравитационных волн, которые, распространяясь через атмосферу на ионосферные высоты, привели к образованию соответствующих возмущений.

Авторы выражают благодарность сотрудникам NASA GES-DISC за свободный доступ к данным.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФБГУН Научной станции РАН в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах».

Список литературы

1. Yao Y. B., Chen P., Wu H., Zhang S., Peng W. F. Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 Mw 9.0 Japan earthquake // Chin. Sci. Bull. 2012. 57. P. 500–510.

2. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/

3. Zhu F., Zhou Y., Wu Y. Anomalous variation in GPS TEC prior to the 11 April 2012 Sumatra earthquake // Astrophys. Space Sci. 2013. 345. P. 231–237.

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. Свердлик Л. Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149.

S. A. Imashev[1], L. G. Sverdlik[1, 2]

[1]Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyzstan
[2]Kyrgyz–Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

INVESTIGATION OF ATMOSPHERIC AND IONOSPHERIC ANOMALIES PRECEDING THE LOW-LATITUDE EARTHQUAKE IN SUMATRA

We present results of comparative analysis of anomalous temperature variations in the lower atmosphere and total electron content (TEC) in ionosphere based on data of MERRA-2 reanalysis and GNSS/GPS navigation system and related to the period of preparation of a strong low-latitude earthquake with magnitude of M = 8.6 that occurred on April 11, 2012 in Sumatra (Indonesia). Processing of satellite data using the developed algorithms made it possible to identify anomalies of the studied parameters, which were located near the epicenter of the earthquake and reached a maximum on April 06, 2012 (6 days before the event). With all the difference in spatial scales and dynamics of temporal evolution, the disturbances in ionosphere and atmosphere were quite similar in form. Such a coincidence in space and time of two independently obtained results can be considered as evidence of correlation between atmospheric and ionospheric anomalies, and, thus, a single mechanism for their formation.

Keywords: earthquake, atmosphere, ionosphere, temperature, anomaly, geomagnetic activity.

УДК 528.88, 550.348.098.33

В. Б. Кашкин[1], Р. В. Одинцов[1], Т. В. Рублева[1], К. В. Симонов[2]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: rtcvbk@rambler.ru, pomamow@gmail.com, tvrubleva@mail.ru, simonovkv50@gmail.com

АТМОСФЕРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВО ВРЕМЯ ПОДГОТОВКИ БАЙКАЛЬСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2020–2021 ГГ. ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Аннотация. Исследование посвящено изучению аномальных вариаций температуры в тропосфере во время подготовки землетрясений ($M > 4.0$), зарегистрированных с сентября 2020 г. по май 2021 г. в Байкальской рифтовой зоне, на основе измерений радиометра ATMS/SNPP. В результате возбуждения инфразвуковых волн в атмосфере наблюдались колебания температуры на изобарическом уровне 300 гПа. Увеличение мощности колебания температуры в тропосфере сейсмоактивного региона является следствием движения земных блоков во время сейсмических процессов. Причем это движение было не равномерным и характеризовалось толчками с периодом 96 часов или около 3–4 суток.

Ключевые слова: спутниковые данные, Байкальская рифтовая зона, землетрясения, сейсмогравитационные колебания, тропосфера, температура.

Введение. В сейсмоактивных регионах с крупными блоковыми структурами во время подготовки землетрясения происходят медленные, но интенсивные колебания земной коры [1]. Подобные колебания возникают, как правило, в месте пересечения разломов и имеют период от 2 до 10 (и более) дней, т. е. частота составляет 10^{-6} Гц и менее. Воздействуя на атмосферу подобно поршню большой площади, данные колебания способны генерировать инфразвуковые волны, возбуждающие сейсмогравитационные колебания температуры и давления в тропосфере. Исследование временных вариаций этих физических характеристик позволит получить информацию об изменениях в земной коре, связанных с геодинамическим процессом и подготовкой землетрясений.

В настоящее время в системе «атмосфера-подстилающая поверхность» для оценки профилей температуры, влажности и давления используют данные дистанционного зондирования, полученных со спутников Метеор-М2 № 2 (Россия), SNPP (Suomi NPP, США), FY-3 (Fengyun-3, Китай) и NOAA/POES (National Oceanic and Atmospheric Administration/Polar Orbiting Environmental Satellites, США).

Ранее нами осуществлялся прием и обработка данных о температуре и влажности, полученных с помощью аппаратуры космических аппаратов (КА) NOAA/POES [2]. Цель данной работы состояла в выявлении

© Кашкин В. Б., Одинцов Р. В., Рублева Т. В., Симонов К. В., 2022

аномальных вариаций температуры в тропосфере во время подготовки землетрясений (M > 4.0), зарегистрированных с сентября 2020 г. по май 2021 г. в пределах Байкальской рифтовой зоны на основе измерений радиометра ATMS/SNPP.

Геофизические данные. Для изучения атмосферных возмущений над сейсмоактивным южным районом Прибайкалья использовались геофизические данные о сейсмособытиях, произошедших в исследуемый период. Согласно информации Единой Геофизической службы (ЕГС) РАН [3] очаги Байкальских землетрясений располагались в пределах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), представляющей собой систему кайнозойских рифтовых впадин и окружающих их хребтов. Вдоль границ центральной и северо-восточной части БРЗ проходит граница Амурской микроплиты, которая движется на юго-восток относительно стабильной Сибирской платформы со скоростью 3.4 мм/год [4].

Эпицентры Байкальских землетрясений находились на юго-восточной оконечности Главного Саянского разлома (ГСР), сейсмический потенциал которого оценивается как имеющий максимальные магнитуды до M = 8.0 [5]. Это самая крупная разрывная структура протяженностью более 1000 км и шириной около 10 км. Данный разлом сохраняет высокую геодинамическую активность и входит в Восточно-Саянскую зону возникновения очагов землетрясений.

На рис. 1 показано географическое положение эпицентров Байкальских землетрясений с магнитудами 4.4 < M < 6.7, произошедших с сентября 2020 г. по май 2021 г. в южной части Прибайкалья. Дополнительно на карте представлено местоположение Култукского сейсмособытия 27.08.2008 с магнитудой M = 6.3 [6]. Началом активизации геодинамических процессов в Южном Прибайкалье в изучаемый период времени стало Быстринское землетрясение 21.09.2020 с M = 5.6 [5].

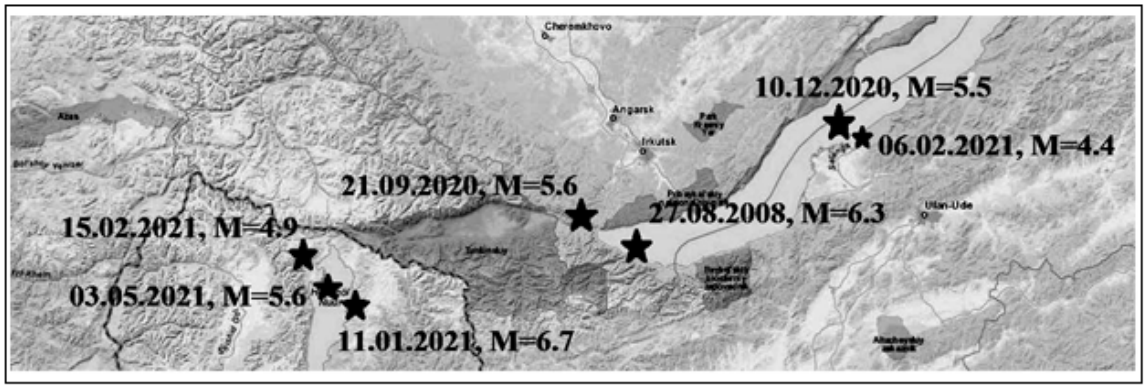


Рис. 1. Местоположение эпицентров Байкальских землетрясений [3]

Спутниковые данные радиометра ATMS/SNPP. Сведения о вертикальных профилях атмосферы получены из измерений сканера ATMS (космический аппарат SNPP), который был выведен на солнечно-синхронную приполярную орбиту 28.10.2011. При движении спутника S-NPP по орбите выполняется перекрестное сканирование [7]. Ширина

полосы сканирования составляет 2 300 км. Пространственное разрешение радиометра около 30–50 км.

Рабочий диапазон сканирующего микроволнового радиометра ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) составляет от 23 до 183 ГГц. Излучение в сенсоре ATMC разделяется на 22 канала по частоте, характеристики которых приведены в [8]. В центре NASA измерения радиометра ATMS преобразуются в величины яркостной температуры по каналам и корректируются на основе калибровочных данных. Погрешность определения абсолютных значений радиояркостных температур составляет 0,6 К. Данные представлены в формате GDAS и заданы на сетке 1º×1º (по широте и долготе), шаг по времени 3 часа. Спутниковые данные представлены в базе NOAA [7].

Анализ и интерпретация результатов. Для усвоения данных нами разработан специализированный пакет прикладных программ, позволяющий получать значения температуры T над исследуемым районом на различных изобарических уровнях за определенный временной интервал. В дальнейшей обработке рядов T использовалась программа Caterpilla SSA, в которой реализован метод главных компонентов [9]. Выполнялось разложение рядов температуры на главные компоненты, далее из ряда T исключался тренд, после чего строились периодограмма ряда.

Результаты обработки температурных рядов на уровне 300 гПа в районе Байкальских землетрясений (21.09.2020, 11.01.2021, 3.05.2021) показаны на рис. 2. На графиках периодограмм по горизонтальной оси отложен период колебаний в часах, по вертикальной – отношение квадрата амплитуды гармоники (мощность) к мощности реперной гармоники. Стрелкой показан специфический пик колебаний с периодом 92–96 часов, который обнаружен в моменты основных толчков Байкальских землетрясений, произошедших с сентября 2020 г. по май 2021 г.

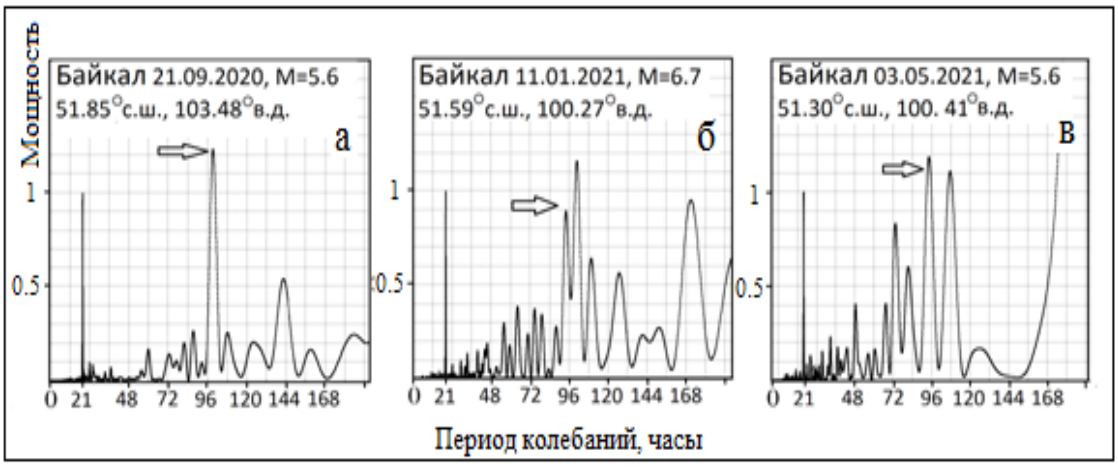


Рис. 2. Периодограммы Байкальских землетрясений 21 сентября 2020 г. (*а*), 11 января 2021 г. (*б*) и 3 марта 2021 г. (*в*)

Можно предположить, что увеличение мощности колебания температуры в тропосфере сейсмоактивного региона является следствием движения земных блоков во время сейсмических процессов. Причем это движение было не равномерным и характеризовалось толчками с периодом 96 часов или около 3–4 суток.

Заключение. Причиной выявленных атмосферных эффектов могло быть постепенное смещение вдоль ГСР со сдвигом относительно друг друга Сибирской платформы и Амурской микроплиты, которое сопровождалось медленными колебаниями земной коры. Возбуждались инфразвуковые волны в атмосфере, которые привели к колебаниям температуры на изобарическом уровне 300 гПа. Вероятно, в период с сентября 2020 г. по май 2021 г. смещение относительно друг друга Сибирской платформы и Амурской микроплиты происходило с приблизительной скоростью, характеризуемой периодом колебаний в 92–96 часов.

Список литературы

1. Остапчук А. А., Павлов Д. В., Марков В. К., Крашенинников А. В. Исследование сигналов акустической эмиссии при сдвиговом деформировании трещины // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 4. С. 503–512.

2. Кашкин В. Б., Григорьев А. С. Обнаружение ионосферных и тропосферных откликов сейсмической активности по спутниковым данным // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 5. С. 152–156.

3. Байкальский филиал Единой Геофизической Службы РАН [Электронный ресурс]. URL: http://seis-bykl.ru/

4. Ritz J.-F., Arzhannikova A., Vassallo R., Arzhannikov S., Larroque C., Michelot J.-L., Massault M. Characterizing the present-day activity of the Tunka and Sayan faults within their relay zone (Western Baikal rift system, Russia) // Tectonics. 2018. Vol. 37, No. 5. P. 1376–1392. https://doi.org/10.1002/2017TC004691.

5. Семинский К. Ж., Борняков С. А., Добрынина А. А., Радзиминович Н. А., Рассказов С. В., Саньков В. А. и др. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_W = 5.4$): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 5. С. 727–743.

6. Мельникова В. И., Гилева Н. А., Арефьев С. С., Быкова В. В., Масальский О. К. Култукское землетрясение 2008 г. с M_w = 6.3 на юге Байкала: Пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 42–62.

7. NOAA [Электронный ресурс]. URL: https://www.ready.noaa.gov›READYcmet.php

8. Smith N., Barnet C. D. CLIMCAPS observing capability for temperature, moisture, and trace gases from AIRS/AMSU and CrIS/ATMS // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. Vol. 13. P. 4437–4459. doi.org/10.5194/amt-13-4437-2020.

9. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.

V. B. Kashkin[1], R. V. Odintsov[1], T. V. Rubleva[1], K. V. Simonov[2]
[1]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[2]Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: rtcvbk@rambler.ru, pomamow@gmail.com, tvrubleva@mail.ru, simonovkv50@gmail.com

ATMOSPHERIC TEMPERATURE VARIATIONS DURING THE PREPARATION OF THE 2020-2021 BAIKAL EARTHQUAKES SATELLITE DATA

Abstract. The study is devoted to the study of anomalous temperature variations in the troposphere during the preparation of earthquakes (M > 4.0) recorded from September 2020 to May 2021 within the Baikal rift zone based on ATMS/SNPP radiometer measurements. As a result of the excitation of infrasonic waves in the atmosphere temperature fluctuations were observed at the isobaric level of 300 hPa. An increase in the power of temperature fluctuations in the troposphere of a seismically active region is a consequence of the movement of earth blocks during seismic processes. Moreover this movement was not uniform and was characterized by shocks with a period of 96 hours or about 3–4 days.

Keywords: satellite data, Baikal rift zone, earthquakes, seismogravitational oscillations, troposphere, temperature.

УДК 504.3.054, 528.88

К. В. Краснощеков[1], О. Э. Якубайлик[2]

[1]ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия
[2]Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: krasko@icm.krasn.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В КРАСНОЯРСКЕ

Аннотация. Реализован метод получения пространственных данных о загрязнении атмосферы Красноярска и его окрестностей на основе данных системы наземного мониторинга и спутникового продукта, предоставляющего данные об аэрозольной оптической толщине MCD19A2. Рассчитана корреляция данных ДЗЗ MODIS с результатами наземной системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра. Полученные значения позволяют рекомендовать данные ДЗЗ как инструмент для определения загрязнения пригородной территории, где отсутствуют станции наземного мониторинга.

Ключевые слова: Красноярск, загрязнение воздуха, PM2.5, наземный мониторинг.

Введение. Многие крупные города подвержены различным факторам, способствующим усугублению экологической обстановки. Аэрозоли, взвешенные твердые частицы (PM) естественного и антропогенного происхождения, находящиеся в большом количестве, оказывают значительное влияние на климат и негативно влияют на здоровье человека [1]. Результаты токсикологических исследований указывают на то, что мелкозернистые частицы размером менее 0,1 мкм обладают значительной токсичностью и могут приводить к различным неблагоприятным последствиям для здоровья человека [2–5]. Следовательно, оценка качества воздуха является актуальной проблемой.

Район исследования. Для получения пространственных данных о концентрации загрязняющих частиц был выбран город Красноярск. Он является активно развивающимся городом. По площади он равняется примерно 350 км^2. Город имеет вытянутую форму вдоль русла реки Енисей и имеет координаты центра 56°00′ с.ш. и 92°52′ в.д. Красноярск имеет очень уникальный рельеф. С юга и запада город окружают леса и холмистая местность, с севера и востока рельеф преимущественно равнинный. Как и все крупные города мира, Красноярск подвержен негативному влиянию на экологическую обстановку. Его ухудшению способствует то, что город является крупнейшим транспортным узлом Восточной Сибири; усугубляет ситуацию наличие ряда крупных предприятий металлургической, машиностроительной и химической

© Краснощеков К. В., Якубайлик О. Е., 2022

промышленности. В [6] показано, что концентрация $PM_{2,5}$ (твердые частицы с диаметром менее 2,5 мкм) в Красноярске на 64 % выше, чем в среднем по России.

Спутниковые измерения. Для получения информации о загрязнении атмосферы методом ДЗЗ в работе использовался параметр Аэрозольная оптическая толщина (AOD), который чаще всего используется в качестве основы для оценки PM [7]. Этот параметр пропорционален количеству частиц в воздухе и, зависит от их массовой концентрации. AOD обычно используется в качестве основы для оценки PM. Данный параметр предоставляет продукт MCD19A2.

Расчёт величины значения AOD основан на отражения различных длин волн от поверхности Земли и регистрации отражённого излучения на сенсоре прибора. Данный метод измерения имеет ряд ограничений измерений на поверхности с высоким коэффициентом отражения (снег, вода, облачность). Следовательно, данные на территорию Красноярска становятся доступны после схода снежного покрова и до его появления, а также ограничены наличием облачностью.

Наземные измерения. Экологическая обстановка в городе оценивалась по данным системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН, которая состоит из 25 станций. Каждая станция предоставляет информацию о загрязнении воздуха ($PM_{2.5}$), температуре, давлении и относительной влажности.

Информация, полученная со станций мониторинга, показывает точечные значения концентрации $PM_{2.5}$ в месте установки станции. Однако никакая городская сеть мониторинга не может показать уровень загрязнения за пределами городской черты и отследить влияние городской атмосферы на пригородные территории и наоборот.

Помимо наземных измерений $PM_{2.5}$ для получения пространственных данных использовались данные о высоте пограничного слоя атмосферы (PBLH), полученные из атмосферной модели Глобальной системы прогнозов (GFS).

Верификация спутниковых данных. Для оценки соответствия спутниковых и наземных данных был рассчитан коэффициент корреляции между ними. Из-за ограничения спутниковых данных на зимний период, для верификации были скачаны данные на летние месяцы за 2018–2021 гг., всего 368 файлов. Однако так как данные ограничены ещё и наличием облачности, после проведения проверки на наличие значений AOD над городом количество файлов уменьшилось до 211.

Для сравнения брались значения AOD находящиеся непосредственно над постом мониторинга. Затем отобранные значения за одни сутки усреднялись между собой, получая среднее значение AOD над станциями мониторинга в каждый отдельный день.

Значения наземных постов мониторинга брались с агрегацией один час в период с 11:00 до 12:00, далее эти значения между постами усреднялись, получая среднее значение $PM_{2.5}$ за сутки.

При линейном сравнении двух полученных рядов данных полученный коэффициент детерминации равняется $R^2 = 0.27$. Полученный результат указывает на низкую согласованность данных. Однако существует метод позволяющий привести данные AOD к значениям $PM_{2.5}$ с использованием метеопараметров. Данный метод описан в [8] и результат его выглядит как формула (1).

$$PM_{2.5} - calc = (AOD/PBLH)/\{K \bullet [(1 - RH)/(1 - RH_0)]^{-\gamma}\}. \quad (1)$$

Для получения расчётных значений по формуле (1) необходимо кроме значений AOD учитывать 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 (1), представлены на рис. 1.

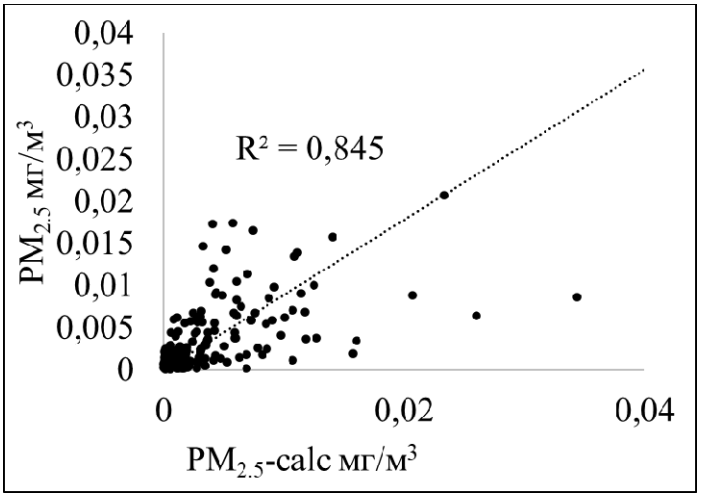


Рис. 1. Сравнение наземных данных (ось *y*) и расчетных значений $PM_{2.5}$

При пересчёте значений AOD в PM-calc с использованием формулы (1), значение коэффициента детерминации увеличилось до $R^2 = 0.845$. Следовательно, данные спутникового мониторинга можно применять в дополнение к наземной сети мониторинга.

Построение пространственных данных $PM_{2.5}$. Из-за ограниченности данных спутниковых измерений в местах с наличием облачности данные отсутствуют. Следовательно, на большую территорию, во избежание пропусков данных имеет смысл построения данных с накоплением и последующим усреднением. На данный момент для нас наибольший интерес представляют среднемесячные значения $PM_{2.5}$ на территорию Красноярска и части ближайших городов. Для построения мы использовали 30 файлов продукта MCD19A2, содержащие значения AOD в период с 1 по 30 июня 2021 г. Для перерасчёта значений AOD в PM, использовалась формула (1), где для каждого значения AOD рассчитывалось PM с использованием средних значений влажности и высоты пограничного слоя над Красноярском. Так как в расчёте

использовались средние значения для Красноярска, то чем дальше от города, тем точность рассчитанных значений PM может быть хуже. В результате при усреднении всех рассчитанных значений за один месяц получены среднемесячные концентрации значений PM над Красноярском и ближайшими населёнными пунктами (рис. 2).

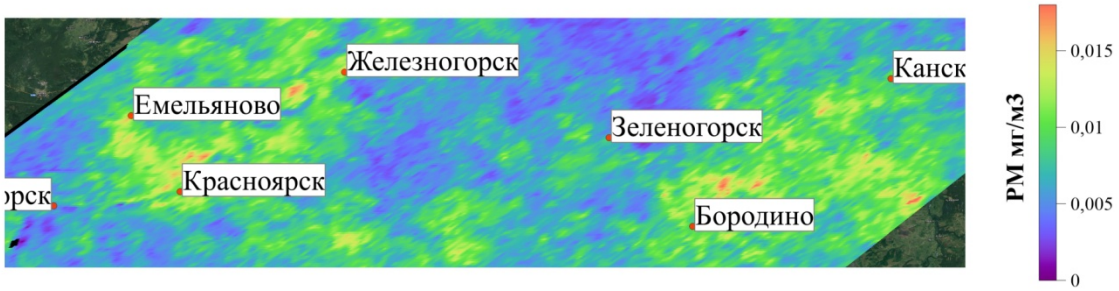


Рис. 2. Среднемесячные значения $PM_{2.5}$ за июнь 2021 г.

На рис. 2 более теплый цвет соответствует более высоким значениям $PM_{2.5}$. В результате при месячном усреднении получилось цельное изображение распределения концентраций PM без пропусков данных с максимальными значениями, приходящимися на территории крупных городов и вдоль трасс между ними. Минимальные значения находятся над территорией, покрытой лесом.

Используя данные спутникового мониторинга, можно значительно расширить информацию о распределении значений PM как внутри города, так и на окружающие территории.

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. Т. 110. № 10. С. 1025–1029.

3. Donaldson K., Li X. Y., MacNee W. Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury //Journal of aerosol science. 1998. Т. 29. № 5–6. С. 553–560.

4. Seaton A. et al. Particulate air pollution and acute health effects // The lancet. 1995. Т. 345. № 8943. С. 176–178.

5. Brunekreef B., Holgate S. T. Air pollution and health // The lancet. 2002. Т. 360. №. 9341. С. 1233–1242.

6. Lin C., Labzovskii L. D., Mak H. W. L., Fung J. C., Lau A. K., Kenea S. T. and Ma J. 2020. Atmos. Environ 227 117410.

7. Koelemeijer R. B. A., Homan C. D., Matthijsen J. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe // Atmospheric Environment. 2006. Т. 40. № 27. С. 5304–5315.

8. Lin C. et al. Observation of PM2. 5 using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring // Atmospheric Environment. 2020. Т. 227. С. 117410.

K. V. Krasnoshchekov[1], O. E. Yakubailik[2]
[1]FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
[2]Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: krasko@icm.krasn.ru

APPLICATION OF REMOTE SENSING DATA FOR SPATIAL ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL SITUATION IN KRASNOYARSK

A method has been implemented for obtaining spatial data on air pollution in Krasnoyarsk and its environs based on data from a ground-based monitoring system and a satellite product that provides data on the aerosol optical depth of MCD19A2. The correlation of remote sensing data MODIS with the results of the ground-based air monitoring system of the Krasnoyarsk Scientific Center is calculated. The obtained values make it possible to recommend remote sensing data as a tool for determining the pollution of a suburban area where there are no ground monitoring stations.

Keywords: Krasnoyarsk, air pollution, PM2.5, ground monitoring.

УДК 629.786.2:632

О. Ю. Кремнева[1], Р. Ю. Данилов[1], О. В. Тутубалина[2], И. И. Середа[2]

[1]Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, 350039, Россия
e-mail: kremenoks@mail.ru
[2]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия
e-mail: olgatut@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ РАЗВИТИЯ ЖЕЛТОЙ ПЯТНИСТОСТИ ЛИСТЬЕВ

Аннотация. Наиболее перспективным направлением в области защиты растений является создание дистанционных методов обнаружения развития болезней растений на основе анализа спектров отраженного излучения. Целью настоящего исследования явилась оценка в полевых условиях информативности спектрально-оптических параметров сортов озимой пшеницы и их смесей с различной восприимчивостью к возбудителю *Pyrenophora tritici-repentis*. Анализ изменений морфологии спектральных признаков исследованных объектов показал, что наиболее перспективными спектральными диапазонами для выявления развития желтой пятнистости на ранних стадиях являются 1 445–1 775 нм и 2 050–2 450 нм, что, вероятно, связано с увеличением температура растений или их водным стрессом.

Ключевые слова: наземное спектрометрирование, озимая пшеница, желтая пятнистость листьев пшеницы, спектральные характеристики.

Озимая пшеница является одной из ведущих культур по площади возделывания, как во всем мире, так и в России. Желтая пятнистость листьев пшеницы (tan spot) – заболевание вызываемое грибом *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs (анаморфа: *Dreschlera tritici-repentis* (Died.) Shoem.). В последнее время отмечено нарастание развития и распространения tan spot в регионах, где выращивается пшеница во всем мире [1, 2].

Обзор литературы показал, что активно проводятся исследования спектральных характеристик озимой пшеницы на возбудителей бурой и желтой ржавчины [3, 4] и септориозной пятнистости [5]. В отношении относительно новой болезни желтой пятнистости подобных исследований не проводилось. Однако возбудитель крайне актуален и экономически значим во всех зерносеющих регионах мира.

Целью наших исследований являлась оценка информативности спектрально-оптических параметров различных по восприимчивости сортов озимой пшеницы и их смесей при воздействии возбудителя *P.tritici-repentis* в полевых условиях.

© Кремнева О. Ю., Данилов Р. Ю., Тутубалина О. В., Середа И. И., 2022

Исследования проводили на опытном поле Федерального научного центра биологической защиты растений (г. Краснодар) на искусственном инфекционном фоне в посевной сезон 2019 г.

Объектами исследований являлись 6 сортов озимой пшеницы селекции НЦЗ им. П. П. Лукьяненко (г. Краснодар, Россия), которые имеют разную степенью устойчивости к *P. tritici-repentis* [6]: Калым – устойчивый к патогену, Гром и Лебедь – умеренно устойчивые, Безостая 100 – умеренно восприимчивый, Грация и Батько – восприимчивые.

Учет развития болезни и проведение спектральных измерений осуществляли 30.04.20 (флаг лист, фаза Z 37), 10.05.2019 (колошение, фаза Z 51-59), 26.05.2019 (конец цветения, фаза Z 61-69), 02.06.20 (молочная спелость, фаза Z 75).

В исследовании использовались данные спектрометрирования в диапазоне электромагнитного излучения от 350 до 2 500 нм со спектральным разрешением 1–10 нм.

Для наземных спектрометрических измерений применялся спектрорадиометр ASD FieldSpec 3 Hi-Res, предназначенный для измерения абсолютных и относительных значений энергетической яркости в спектральном диапазоне 350–2 500 нм [FieldSpec 3 User Manual, 2010].

С целью выявления специфических спектральных диапазонов, свидетельствующих о проявлении изменений, вызванных воздействием болезни, был проведен анализ изменения морфологии спектральных сигнатур коэффициента отражения исследуемых объектов в зависимости от их фактического состояния, учтенного во время полевых обследований.

На рис. показана динамика КСЯ в различных диапазонах спектра, где указана разница между его значениями при сопоставлении трех временных периодов. Диапазоны длин волн были выбраны в соответствии с характерным поведением кривых спектральной яркости. В качестве дополнительного источника информации на представленных диаграммах указана разность за две даты адаптивного разностного вегетационного индекса dNDVI.

Данный узкоспектральный индекс NDVI является показательным для раннего определения посевов, пораженных патогеном. В целом, для него характерно постоянное снижение по мере развития растений. Однако для более устойчивых сортов пшеницы это снижение происходит более равномерно, в то время как для менее устойчивых сортов, для которых доля пораженных растений составила более 50 %, в период с 26.05.19 по 02.06.19 это снижение более резкое. Данный эффект проявляется и для сортосмесей: чем больше доля устойчивого сорта в смеси, тем более постепенное снижение значений наблюдается.

Стоит отметить, что наиболее динамичными и информативными спектральными диапазонами для исследований, в которых наблюдаются наибольшие изменения КСЯ и узкополосного NDVI между датами измерений, являются 720–800 нм, а также 800–1 200 нм. Тем не менее, очевидной зависимости между изменениями КСЯ на этих длинах волн

и патогенным фоном посевов пшеницы озимой различной устойчивости (табл.) не было обнаружено. На поздних стадиях развития желтой пятнистости характерен рост значений КСЯ в большей части диапазонов спектра. Так в период с 26.05.19 по 02.06.19 для восприимчивого сорта Грация снижение значений наблюдалось только для диапазонов 720–800 нм и 800–1 200 нм, а для высоко-восприимчивого к патогену сорта Батько во всех исследуемых диапазонах наблюдался рост значений КСЯ.

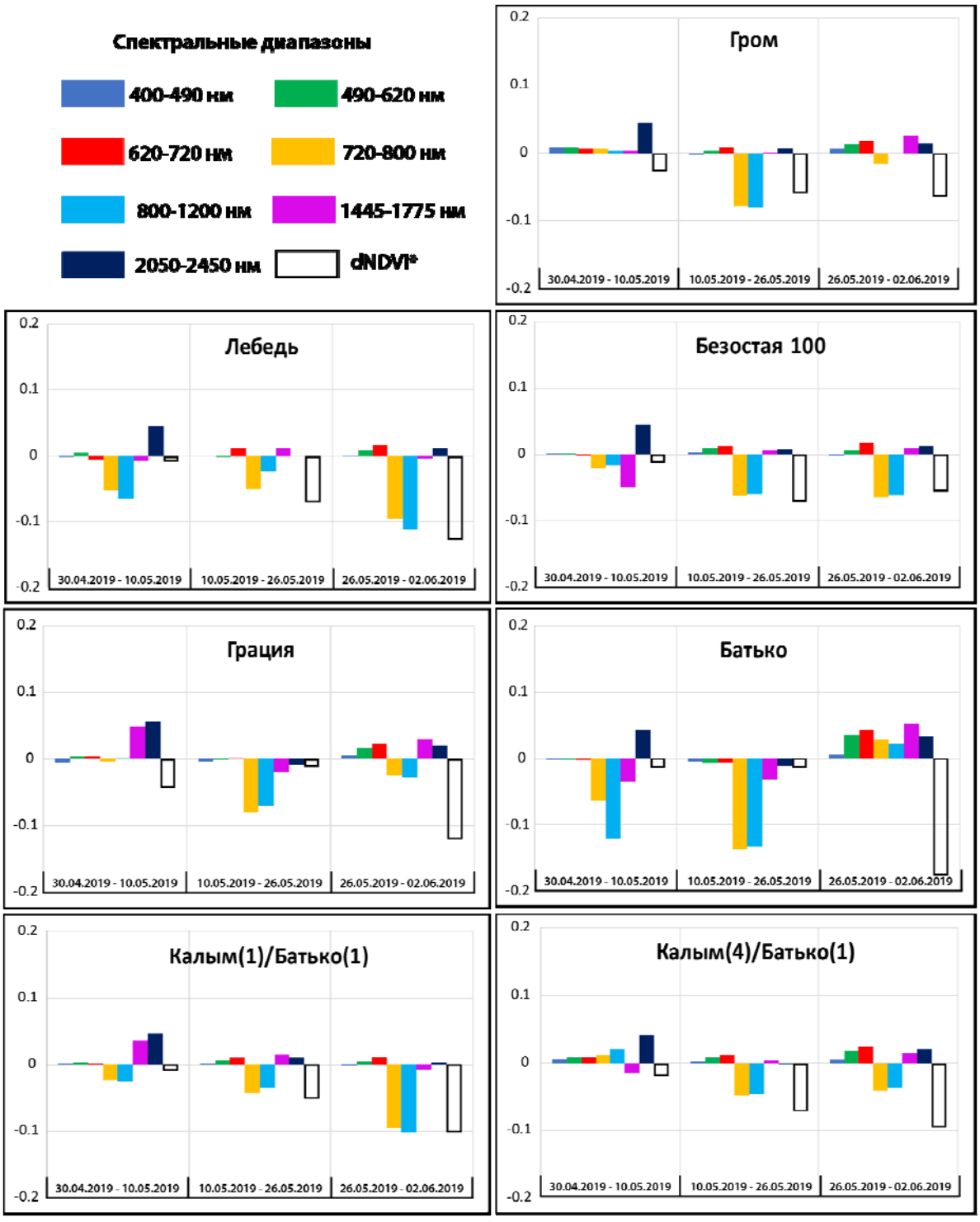


Рис. Изменение значений коэффициента спектральной яркости и узкополосного индекса NDVI между датами измерений

В диапазоне 1 445–1 775 нм на период с 30.04.19 по 10.05.19 динамика значений КСЯ для устойчивых сортов практически отсутствует, в то время как для менее устойчивых она либо заметно растет, либо снижается на значения от 0.03 до 0.05. Отмечен заметный рост значений КСЯ в диапазоне 2 050–2 450 нм для этого периода.

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Гипотеза, что чем менее устойчив сорт пшеницы к желтой пятнистости листьев, тем более быстрым снижение значений КСЯ в ближнем инфракрасном диапазоне спектра и увеличение в красном диапазоне спектра, в целом, подтвердилась.

Однако наиболее четкая зависимость заметна на поздней (высокой) стадии развития патогена, что не позволяет использовать эти результаты для раннего детектирования поражения растений желтой пятнистостью.

Наиболее перспективными диапазонами спектра для выявления развития возбудителя болезни на ранних стадиях его развития являются 1 445–1 775 нм и 2 050–2 450 нм, что, вероятно, связано с повышением температуры растений или их водным стрессом.

Исследования выполнены согласно Государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № FGRN-2022-0001.

Список литературы

1. Momeni H., Aboukhaddour R., Javan-Nikkhah M., Razavi M., Naghavi M. R., Akhavan and A., Strelkov S. E. Race identification of Pyrenophora tritici-repentis in Iran // Journal of Plant Pathology. 2014. 96 (2): 287–294.

2. Kokhmetova A., Kremneva J., Volkova G., Atishova M., Sapakhova Z. Evaluation of wheat cultivars growing in Kazakhstan and Russia for resistance to tan spot // Journal of Plant Pathology. 2017. 99(1). 161–167.

3. Yang K., Xue Zh., Li H., Jia T., Cui Ya. New methodology of hyperspectral information extraction and accuracy assessment based on a neural network // Mathematical and Computer Modelling. 2013. 58. 644–660.

4. Azadbakhta M., Ashourlooa D., Aghighia H., Radiomb S., Alimohammadic A. Wheat leaf rust detection at canopy scale under different LAI levels usingmachine learning techniques // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. 156. 119–128.

5. Odilbekov F., Armoniené R., Henriksson T., Chawade A. Proximal phenotyping and machine learning methods to identify Septoria tritici blotch disease symptoms in wheat // Frontiers in Plant Science. 2018. 9. 685.

6. Kremneva O. Yu., Mironenko N. V., Volkova G. V., Baranova O. A., Kim Yu. S., Kovalenko N. M. Resistance of winter wheat varieties to tan spot in the North Caucasus region of Russia // Saudi Journal of Biological Sciences. 2021. 28 (3). 1787–1794.

O. Yu Kremneva[1], R. Yu. Danilov[1], O. V. Tutubalina[2], I. I. Sereda[2]
[1]Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Center of Biological Plant Protection», Krasnodar, Russia
[2]M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WINTER WHEAT VARIETIES DEPENDING ON THE DEGREE OF DEVELOPMENT OF PYRENOPHORA TRITICI-REPENTIS

The most promising direction in the field of plant protection is the creation of remote methods for detecting the development of plant diseases based on the analysis of reflected radiation spectra. The aim of this study was to evaluate in the field the information content of the spectral-optical parameters of winter wheat varieties and their mixtures with different susceptibility to the pathogen *Pyrenophora tritici-repentis*. An analysis of changes in the morphology of the spectral features of the studied objects showed that the most promising spectral ranges for detecting the development of red spotting in the early stages are 1 445–1 775 nm and 2 050–2 450 nm, which is probably associated with an increase in plant temperature or their water stress.

Keywords: spectrometer ground-based spectrometry, winter wheat, tan spot, spectral characteristics.

УДК 528.88

Е. Н. Кулик[1], А. Т. Байшуаков[2]

[1]Кандидат технических наук, доцент, [2]Магистрант,
Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru, arslan.bayschuakov@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ТЕРРИТОРИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД АНТРОПОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Аннотация. В статье рассматривается применение средств получения и обработки аэрокосмической информации, пространственного геоинформационного анализа при мониторинге территорий, находящихся под антропогенным воздействием. В ходе исследования методов обработки данных дистанционного зондирования Земли были созданы тематические карты-схемы, отображающие очаги повышенных нагрузок и загрязнения. Для мониторинга территорий, находящихся под антропогенным воздействием, предлагается ведение геоинформационной системы, обеспечивающей сбор актуальной информации, её структурирование и анализ, контроль загрязнений, хранение сведений о состоянии окружающей среды в базах пространственных и атрибутивных данных.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, ГИС, нарушенные антропогенным воздействием Земли.

На сегодняшний день геоинформационные системы (ГИС) находят свое применение практически во всех отраслях народного хозяйства Российской Федерации. Активное применение ГИС-технологий позволяет решать многие задачи в управлении территориями, обеспечивая тем самым постоянные контроль и мониторинг происходящих изменений в географическом пространстве [1].

Исследование применения средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных систем при решении задач мониторинга территорий, подвергающихся воздействию антропогенно-техногенных процессов, является основной целью научной работы.

Для достижения поставленной цели были сформулированы задачи, направленные на углубленную географическую изученность территории, на анализ космических снимков с целью выявления природных комплексов, трансформированных различными видами хозяйственной деятельности; на применение методов автоматизированного дешифрирования для выявления источников антропогенного воздействия и степени их влияния на окружающую среду; на создание тематических карт, представляющих актуальное состояние территорий, находящихся под

© Кулик Е. Н., Байшуаков А. Т., 2022

антропогенным воздействием, очагов загрязнений и результаты обработки данных ДЗЗ.

В качестве исходных данных в работе используются космические снимки, полученные спутниками Landsat-8, SPOT-6 и Sentinel-2, изображения космофотокарт с поисковых серверов Яндекс и Bing, а также интерактивная карта Викимапия на основе Google Maps API, состоящая из нескольких информационных слоев пространственной и семантической информации о географических объектах. В дополнение в работе используются тематические картографические материалы, в том числе топографические, почвенные, геологические и др.

Перспективная идея проекта состоит в разработке универсальной методики проведения исследований посредством применения средств ДЗЗ и ГИС на территориях различных регионов Российской Федерации. Однако, в стартовой версии реализации проекта, в качестве экспериментального объекта исследования выбрана территория Искитимского района Новосибирской области. На первом этапе проводилось ознакомительное изучение выбранного региона.

Искитимский район богат органическим и минеральным сырьем. Большое значение имеют крупнейшие в России запасы антрацита.

Участки, подвергшиеся и подвергающиеся антропогенному воздействию, представлены карьерами, как заброшенными, так и местами, где в настоящее время ведется добыча каменного угля. На территории Искитимского района имеется Горловский угольный бассейн, мощность которого составляет от 640 до 940 м. Прогнозные запасы до глубины 900 м оценены в 6,5 млрд т. По ГОСТ 25543-88 угли Горловского бассейна относятся к марке «А» (антрациты), которые по своим свойствам являются лучшим сортом каменного угля. В состав Горловского угольного бассейна входят следующие разрезы, представленные на рис. 1: Колыванский, Ургунский, Горловский и Восточный [2].



Рис. 1. Схема Горловского угольного бассейна

Ежегодный анализ спутниковых изображений позволит достоверно выявить изменение площадей угольных разрезов. Изучая карты планируемого размещения объектов местного значения из генеральных планов муниципальных образований Искитимского района, появляется возможность дать прогнозную оценку производственным территориям и наглядно видеть ситуацию, которая возможно сложится в будущем. Согласно статье 45 части 6 Градостроительного кодека РФ, муниципальное образование не вправе осуществлять планирование, застройку и реконструкцию территории, без согласованного и утвержденного генерального плана. Анализ состояния территории, изображенной на генеральном плане Усть-Чемского муниципального образования Искитимского района, в пределах которого находится территория по добыче и разведке антрацитов, дает информацию о предельной площади распространения добычи и транспортировки углеводородного сырья, что и указывает на увеличение антропогенной нагрузки.

Анализ космических снимков при мониторинге территорий наглядно показывает пример изменения ситуации на землях сельскохозяйственного назначения (рис. 2). За несколько лет на равнинном месте образовался угольный разрез.



Рис. 2. Сравнение разновременных спутниковых изображений 2012 и 2017 гг. территории Восточного угольного бассейна

Автоматизированное дешифрирование космических снимков было выполнено разными методами классификации. В работе использовались разные решающие правила классификации. Лучшим признан результат, полученный по решающему правилу «Спектральный анализ», который позволил определить больше участков, подвергшихся антропогенному воздействию [3].

Применив информацию, полученную в ходе обработки данных дистанционного зондирования Земли, был создан пилотный проект ГИС. Извлекая информационно значимые слои, была оформлена карта-схема, иллюстрирующая положение элементов природной среды, нарушенных антропогенно-техногенными процессами.

Используя аналогичную методику, применяемую при формировании схемы нарушений природной среды антропогенно-техногенными процессами, планируется создание проектов ГИС с интересующими

тематическими слоями и сериями тематических карт-схем для разных регионов страны. В приоритете для исследований будут выбраны территории, где осуществляется добыча и транспортировка углеводородного сырья: нефти и нефтепродуктов, каменного угля, природного газа и т. д.

В результате научно-практического исследования изучена география территории интереса. По итогам первичного визуального анализа спутниковых изображений и ресурсов WEB-серверов были выявлены очаги загрязнения, а именно карьеры и промышленные предприятия, названия которых уточнялись по интерактивному картографическому ресурсу Викимапия. Применяя методы автоматизированной обработки данных ДЗЗ, были выявлены площади угольных разрезов, с последующим созданием векторных тематических слоев проекта ГИС. Оформленная карта-схема нарушений природной среды техногенными процессами, реализована в виде нескольких информационно ёмких тематических слоев.

Прикладные результаты научного исследования, а именно тематические карты-схемы, созданные с применением материалов дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий при мониторинге территорий, находящихся под антропогенным воздействием могут использоваться широким кругом пользователей. Кроме учебных целей, тематические карты, могут найти свое применение в отделах экологии администраций муниципальных районов, органах местного управления, организациях, занимающихся контролем и мониторингом состояния окружающей среды.

Исследования по данной тематике проводились в рамках научного направления СГУГиТ по государственному заданию 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. Байшуаков А. Т., Кулик Е. Н. Возможности применения геоинформационных систем для решения задач эффективного управления сельским хозяйством // Материалы 29 Региональной науч. студ. конф. в 5 ч. «Интеллектуальный потенциал Сибири». 21.05.2021 г. Новосибирск: НГТУ, 2021. С. 24–26.

2. Калиева А. А., Байшуаков А. Т., Ермиенко А. В. Мониторинг нарушений природной среды техногенными процессами при дешифрировании космоснимков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ, 2019. С. 44–48.

3. Дроздов С. Л., Сладкопевцев С. А. Дистанционные методы оценки природных ресурсов (рельеф и почвы). М.: МИИГАиК, 2015. 178 с.

E. N. Kulik, A. T. Bayshuakov
Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru, arslan.bayschuakov@mail.ru

APPLICATION OF REMOTE SENSING DATA AND GEOINFORMATION SYSTEMS IN MONITORING OF TERRITORIES UNDER THE ANTHROPOGENIC INFLUENCE

The article discusses the application of obtaining remote sensing data and their processing by GIS methods in monitoring of territories under anthropogenic influence. In the course of studying the remote sensing means and methods of their data processing, thematic maps were created that display spots of increased anthropogenic pressure and pollution. To monitor territories under anthropogenic influence the maintain a geoinformation systems that provides the collection of up-to-date information of the environment condition, its structuring and storing within spatial and semantic databases, forecasting of pollution effects is proposed.

Keywords: remote data sensing, GIS, disturbed by anthropogenic impact of the soil.

УДК 551.341:550.8(571.56-15)

Я. Б. Легостаева[1], А. И. Журавлев[1], О. В. Шадринова[1], В. Ф. Попов[2], В. А. Иванов[2]

[1]Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
[2]Геологоразведочный факультет, Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия
e-mail: ylego@mail.ru, ai.zhuravlevgeo@gmail.com, ovshadrinova@gmail.com, pvf_grf@rambler.ru, valentin17451@gmail.com

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ДЛЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Аннотация. В Западной Якутии на протяжении последнего полувекового периода интенсивно развиваются алмазодобывающая и нефтегазовая отрасли. Добыче полезных ископаемых, как правило, предшествуют поисковые и разведочные этапы геологоразведочных работ. В статье на примере территории Западной Якутии приведены результаты оценки воздействия геологоразведочных работ на окружающую среду с применением данных дистанционного зондирования. С помощью дешифрирования космических снимков высокого разрешения выявлена масштабность геологоразведочного техногенеза, которая имеет значительную региональную распространенность. Итогом исследований является реестр нарушенных вследствие геологоразведочных работ участков, с указанием площадей, характера и степени нарушенности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, геологоразведочные работы, техногенез, сейсмический профиль, Западная Якутия.

Введение. Геологоразведочные работы (ГРР) представляют собой сложный комплекс исследований, включающий геологическую, гидрогеологическую, геоморфологическую, геохимическую съемки, геофизические методы исследований, опытно-промышленные работы, бурение и опробование скважин. Несмотря на достаточно большой объем исследований воздействия ГРР на компоненты ландшафта и окружающей природной среды в нормативных документах указано, что на этапе регионального геологического изучения недр вреда окружающей среде практически не наносится [1, 2]. Однако геологоразведочные работы могут сопровождаться механическими нарушениями ландшафтов, связанными с проходкой поверхностных и подземных горных выработок, устройством площадок под буровые установки, прокладкой временных дорог, бытовыми и хозяйственными постройками. При проходке горных выработок и прокладке дорог происходит полное уничтожение растительно-почвенного покрова на площади, равной их сечению и в результате развития эрозионных и обвально-оползневых процессов, спровоцированных геологоразведочными работами. Методика разведки

© Легостаева Я. Б., Журавлев А. И., Шадринова О. В., Попов В. Ф., Иванов В. А., 2022

влияет на интенсивность механических нарушений компонентов экосистемы. В настоящее время расширение минерально-сырьевой базы страны предъявляет высокие требования не только к экономическим условиям освоения месторождений, но и требует учитывать экологические и эколого-геохимические последствия, проявляющиеся уже в ходе геологоразведочного процесса [3].

Материалы и методы. Анализ степени и характера нарушенности ландшафтов в результате проведения ГРР на территории Западной Якутии основан на методах дистанционного дешифрирования космоснимков высокого разрешения. Выявление площадей с техногенным воздействием на ландшафт с выделением участков с нарушенным почвенно-растительным покровом и вычисление их размеров (длины, ширины, площади) осуществлялось с помощью ПО QGIS и подключаемого модуля QuickMapServices. Используя модуль, подключались космические снимки высокого разрешения от компаний Yandex, Google, Bing и др., на которых были визуально найдены и отмечены площади со следами техногенного воздействия – просеки, сейсмопрофили и дороги. Затем каждая подобная структура была вручную обрисована в векторный линейный объект.

Вычисление длины каждого линейного объекта проходило с использованием инструмента «Калькулятор полей» в атрибутивной таблице, после экспортирования в «Microsoft Excel», которой выполнено сложение всех длин линейных объектов, что позволило получить общую площадь нарушенности растительно-почвенного покрова.

Результаты и их обсуждение. Территория Западной Якутии в основном находится в пределах листов топографических карт R49, R50, Q49, Q50, P49, P50, а также на севере – S49 и S50. И включает полностью или частично территории 11 административных районов (улусов) Республики Саха (Якутия). В 20 км севернее г. Удачный проходит Северный полярный круг, разделяющий рассматриваемую территорию почти на две равные части. Северные границы Анабарского и Булунского районов омывает море Лаптевых, его бассейну принадлежат все реки. Западная Якутия в большей части территории характеризуется крайне суровым и резко-континентальным климатом, с севера на юг выделяются арктический, субарктический и умеренный климатические пояса, им соответствуют природные зоны тундры, лесотундры, северной и средней тайги.

С 1997 по 2020 гг. было выдано 172 лицензии на право геологического доизучения, оценки перспективности территории и поисков месторождений алмазов и углеводородного сырья. По данным Росгеолфонда на начало 2013 г. открыто 34 месторождения углеводородного сырья, в том числе 7 нефтегазоконденсатных, 10 газоконденсатных, 2 газонефтяных, 9 газовых, 4 нефтегазовых и 2 нефтяных месторождений.

При дешифрировании космоснимков высокого разрешения выявлено, что масштабному техногенному воздействию ГРР оказалась

подвержена территория умеренного климатического пояса Западной Якутии. И, прежде всего, в виде проходки опорных геолого-геофизических профилей, на втором месте организация площадок под параметрические и сверхглубокие скважины, на третьем – насыпи дорог и площадок для временных вахтовых поселков. Всего получено 3 632 линейных объекта, их общая протяженность составила 84 783,32 км (рис.). С учетом средней ширины профилей непосредственная площадь нарушенного почвенно-растительного покрова оценена приблизительно в 850 км^2. При этом общая площадь лицензионных участков, например, на углеводороды составляет 250 843,0 км^2, из них к настоящему времени подвергнуты техногенезу порядка 12 126,0 км^2.

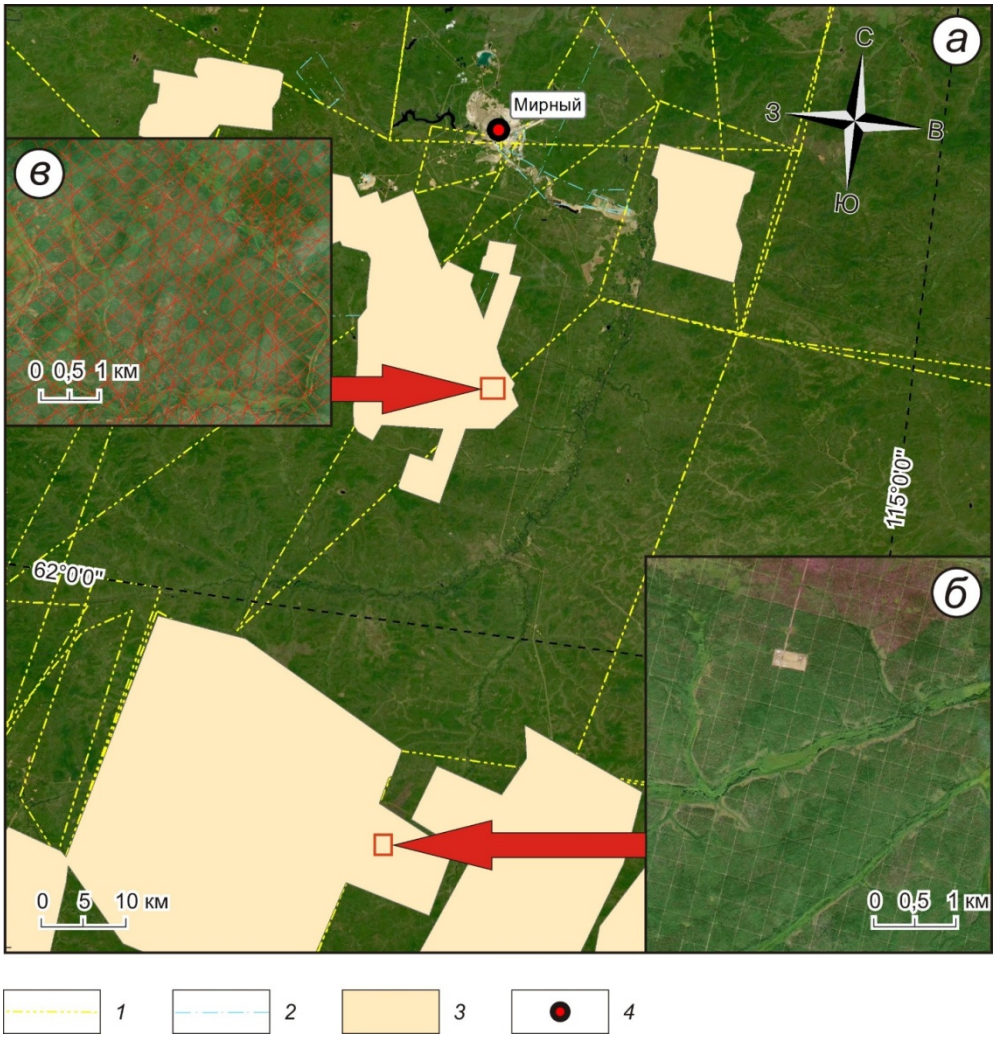


Рис. Фрагмент исследуемой территории: 1 – границы лицензионных участков с ПИ «Углеводороды»; 2 – границы лицензионных участков с ПИ «Алмазы»; 3 – площади с установленным по космическим снимкам техногенным воздействием; 4 – населенные пункты;
а) лицензионные участки; б) космический снимок высокого разрешения, с отчетливо различимой сетью геофизических профилей выполненных по сетке 300×300 м;
в) оцифрованные в результате дешифрирования участки сейсморазведки

Выводы. Основное воздействие в результате регионального геологического изучения недр, проводимого на больших площадях

Западной Якутии, было оказано при сейсмических и геолого-геофизических работах.

Результат техногенного воздействия ГРР на компоненты экосистем Западной Якутии носит широкомасштабный площадной и долговременный характер, существенно превышающий площади открываемых в результате месторождений.

Список литературы

1. Распоряжение Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 05.07.1999 № 83-р. Об утверждении положения о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые).

2. ИТС-16-2016. Горнодобывающая промышленность. Общие процессы и методы. М.: Бюро НТД, 2016. 207 с.

3. Янин Е. П. Оценка влияния геологоразведочных работ на окружающую среду // Экологическая экспертиза. 2019. № 1. С. 2–49.

[1]Ya. B. Legostaeva, [1]A. I. Zhuravlev, [1]O. V. Shadrinova, [2]V. F. Popov, [2]V. A. Ivanov

[1]Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
[2]M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
e-mail: ylego@mail.ru, ai.zhuravlevgeo@gmail.com, ovshadrinova@gmail.com, pvf_grf@rambler.ru, valentin17451@gmail.com

REMOTE SENSING FOR GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF TECHNOGENIC IMPACT OF GEOLOGICAL EXPLORATION

The diamond mining and oil and gas industries have been intensively developing in Western Yakutia over the last half-century. Mining is usually preceded by prospecting and exploration stages of geological exploration. Using the example of the territory of Western Yakutia, the article presents the results of assessing the impact of geological exploration on the environment using remote sensing data. With the help of decoding high-resolution satellite images, the scale of geological exploration technogenesis has been revealed, which has a significant regional prevalence. The result of the research is a register of sites disturbed as a result of geological exploration, indicating the area, nature and degree of disturbance.

Keywords: remote sensing, geological exploration, technogenesis, seismic profile, Western Yakutia.

УДК 528.88: 630*43

Д. В. Лозин[1,2], Е. А. Лупян[1,2], И. В. Балашов[1], С. А. Барталев[1], Ф. В. Стыценко[1]

[1]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[2]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЕСОВ ПОЖАРАМИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРЕНИЯ

Аннотация. Настоящая работа посвящена описанию методики оперативной оценки площадей послепожарных повреждений лесного покрова на основе информации об интенсивности горения пожаров по данным спутникового мониторинга системой MODIS. В качестве меры интенсивности пожара в работе используется радиационная мощность излучения огня (Fire Radiative Power), нормированная на площадь элемента наблюдения (FRPS). В работе предложен подход, позволяющий строить зависимости степени повреждений лесов от значений FRPS. На основе использования полученных зависимостей в работе предложена новая методика оперативной оценки площади пирогенной гибели лесов.

Ключевые слова: *дистанционное зондирование, пожар, FRP, степень повреждения лесов, спутниковый мониторинг.*

Введение. Получение объективной оценки степени повреждения лесов пожарами является важной задачей, актуальность решения которой сильно возросла в последние годы. Это произошло в том числе в связи с проблемами, связанными с мониторингом выбросов углерода в атмосферу, происходящих в результате действия природных и в первую очередь лесных пожаров [1–3].

В настоящей работе предложена методика оперативной оценки площадей погибшего лесного покрова на основе использования полученных зависимостей. На основе предложенной схемы проведена оценка площадей погибших в различные годы лесов на территории РФ и проведено сравнение данной информации с оценками, полученными на основе сравнения наблюдений до и после пожаров.

Используемые данные. В качестве исходных данных об FRP был использован однородный ряд данных о пожарах и горячих точках ЦКП ИКИ-Мониторинг [4], сформированный на основе продукта Collection 6 MODIS Active Fire / Hotspot Data (MCD14DL) [5]. Данные в удобном для анализа формате покрывают территорию РФ с 2001 года по настоящее время и проаннотированы по картам типов территорий, формируемых в ИКИ РАН на каждый год [6]. Следует отметить, что в работе при проведении сопоставления использовалось значение FRP, нормированное на площадь наблюдаемого пиксела (далее, эту величину мы будем

© Мальканова А. В., Пономарев Е. И., 2022

называть FRPS). В качестве данных о повреждении лесов для их сопоставления с информацией об FRPS был использован ряд данных с 2006 по 2021 г. на территорию РФ, полученный с использованием метода оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS, разработанный в ИКИ РАН [7, 8]. Данные представляют собой полигоны повреждений с указанием даты определения и степенью повреждения лесов. Степень повреждения определяется одним из пяти классов средневзвешенной категории состояния (СКС): первый класс – здоровые насаждения, второй – ослабленные, третий – сильно ослабленные, четвертый – усыхающие, пятый – погибшие).

Анализ связи степени повреждения лесов и FRPS. Для исследования зависимости между энергетическими характеристиками пожаров и постпожарными повреждениями была разработана методика сопоставления информации о наблюдаемых FRPS с данными об СКС, основанная на использовании постпожарных карт FRPS. Подробно вопросы распределения FRPS для различных типов территорий освещены в [9]. На основе имеющихся результатов сопоставления FRPS и классов СКС лесов была построена зависимость вероятности гибели (наблюдения пятого класса) леса в зависимости от интенсивности горения наблюдавшегося пожара. На рис. 1 представлены зависимости, полученные при одновременном учете как периода, в который действует пожар, так и преобладающей породы на территории действия пожара. На наш взгляд именно эти зависимости и следует использовать при построении оперативных оценок гибели лесов от пожаров на основе наблюдения интенсивности горения.

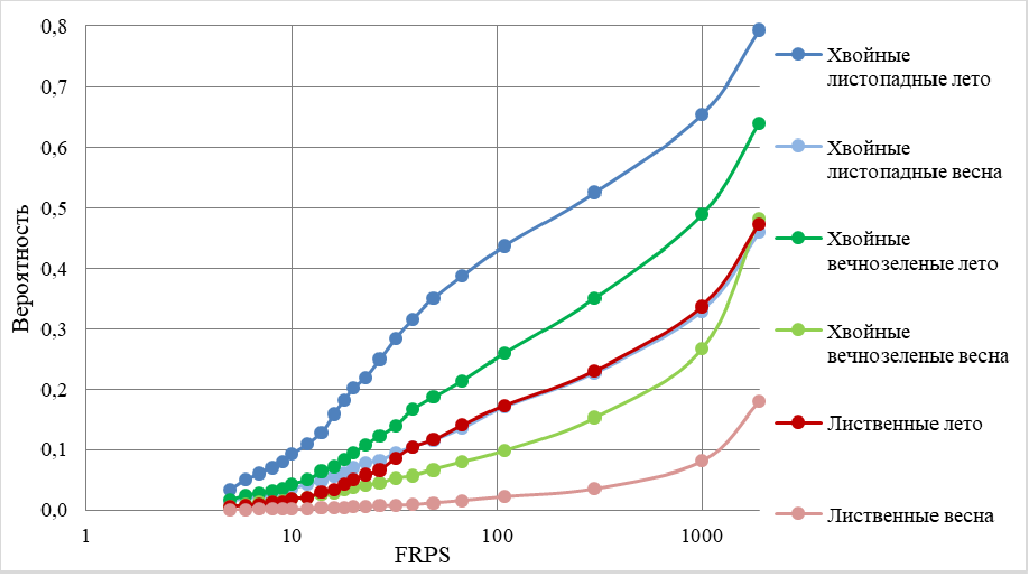


Рис. 1. Вероятность гибели леса от интенсивности горения (FRPS) с учетом сезона и групп древесных пород на территории действия пожара (весна – пожары до 15 июня, лето – после)

Оценки повреждений лесов на основе информации об интенсивности горения. Используя полученные зависимости вероятности гибели лесов от FRPS с учетом времени действия пожара и группы

древесных пород, поврежденного огнем насаждений, можно предложить следующую схему оценки площадей погибших лесов. С использованием постпожарных карт FRPS подсчет площади погибших лесов (лесов, в которых наблюдается 5 класс СКС) производится путем суммирования площади всех точек (пикселов), в которых наблюдался FRPS, умноженных на вероятность гибели леса в конкретном пикселе. Подробно данная методика описана в статье [10]. Полученные таким методом оценки площади погибших лесов на территории РФ достаточно хорошо согласуются с оценками площадей на основе выделения постпожарных повреждений по результатам анализа изменений лесного покрова после пожаров. Это хорошо видно из данных, представленных на рис. 2.

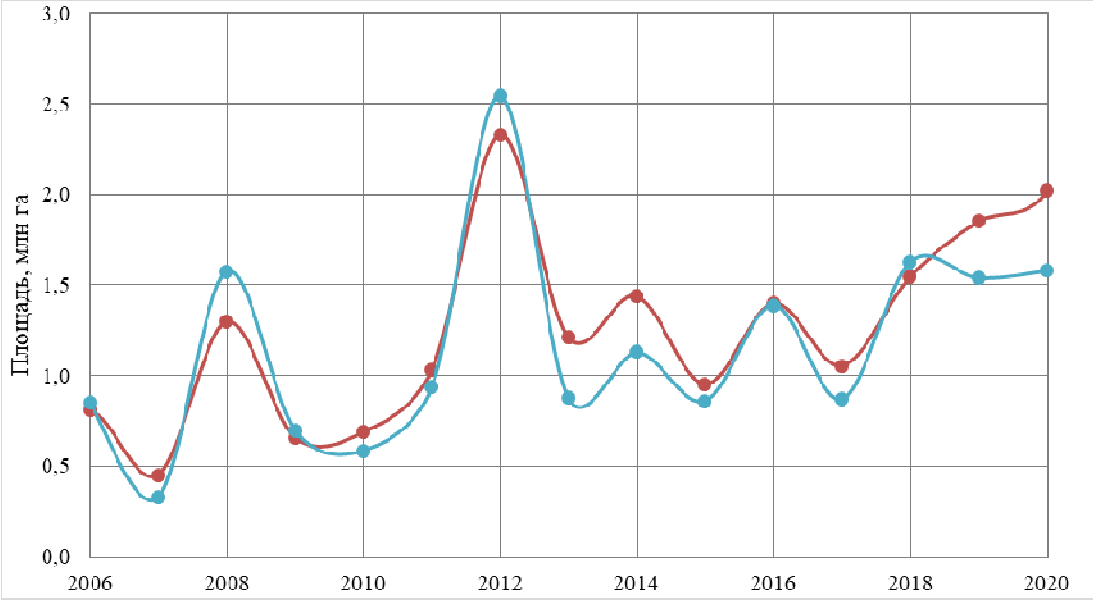


Рис. 2. Оценки площади погибших лесов на территории РФ с 2006 по 2020 гг., полученные на основе анализа FRPS (красный график) и метода, основанного на сравнении состояния растительного покрова до и после пожаров, предложенного в [7] (голубой график)

Выводы. В работе на основе анализа наблюдений лесных пожаров на всей территории России за период с 2006 по 2021 гг. получены зависимости вероятности гибели лесов от интенсивности пожаров с учетом как сезонных особенностей, так и типов лесов, в которых действовал пожар. На основе данных зависимостей в работе предложен метод оценки площадей погибших лесов. Одним из преимуществ предложенного метода является то, что он позволяет делать оперативные оценки гибели лесов не только в момент завершения пожара, но и по мере его развития. При этом проведенное сравнение результатов, получаемых на основе предлагаемого метода, достаточно хорошо согласуется с результатами оценок, получаемых на основе анализа состояния лесного покрова до и после лесного пожара.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8). Работа выполнялась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [4].

Список литературы

1. Wooster M. J., Roberts G., and Perry G. L. W. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // Journal of geophysical research. Vol. 110, D24311, doi:10.1029/2005JD006318, 2005.

2. Ichoku C. and Kaufman Y. J. A Method to Derive Smoke Emission Rates From MODIS Fire Radiative Energy Measurements // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. Vol 43. № 11. 2005.

3. Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.-J., Razinger M., Schultz M. G., Suttie M., & van der Werf G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // Biogeosciences Discussions. 9. 527–554. 2012.

4. 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. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

5. URL:https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14dl

6. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

7. Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.

8. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

9. Лозин Д. В., Балашов И. В. Анализ особенностей распределений наблюдаемого FRP для пожаров различных типов территорий и антропогенных объектов. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 102. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.

10. Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Стыценко Ф. В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.

E. Loupian[1,2], D. Lozin[1,2], I. Balashov[1], S. Bartalev[1], F. Stycenko[1]

[1]Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
e-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru

RAPID ASSESSMENT OF THE DEGREE OF FOREST DAMAGE BY FIRES ON THE BASIS OF BURNING INTENSITY DATA

The present work is devoted to the description of the methodology for the operational assessment of areas of the forest damage by fires degree on their burning intensity characteristics according to MODIS satellite monitoring system. Fire Radiative Power normalized to the area of the observation element (FRPS) is used here as fire intensity measure. A new method for operational assessment of pyrogenic forest destruction area on the basis of using the obtained dependences is proposed in the work.

Keywords: remote sensing, wildfire, FRP, the forest damage by fires, satellite monitoring.

УДК 551.506.9*614.841.2

А. В. Мальканова[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

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ, КАК ФАКТОР ИЗМЕНЕНИЯ ГОРИМОСТИ В РЕГИОНЕ

Аннотация. Исследовались изменения метеопараметров на территории юга Восточной Сибири. Анализировались 8-часовые усредненные данные о температуре и наличие атмосферных явлениях, таких как грозы и осадки, восстановлена динамика длительности пожароопасного периода и тепловлагообеспеченности (показатель ГТК). На основе ретроспективной спутниковой съемки исследована динамика пожаров на территории Восточной Сибири (территория бассейн р. Лена в среднем течении). Показана зависимость горимости лесов локальных территорий от уровня тепло- и влагообеспеченности. Выявлен диапазон показателя горимости (числа и площадей пожаров) в условиях экстремальной засухи. Показано, что анализ метеоданных является инструментом повышения эффективности и достоверности прогноза пожаров растительности.

Ключевые слова: Сибирь, спутниковые данные, лесной пожар, Landsat, метеоданные.

Введение. Значительные климатические изменения являются одной из самых значимых причин динамики пожарных режимов как в целом на планете, так и на региональном уровне [1, 2]. В условиях меняющегося климата, повышение регулярности и длительности засушливых периодов, рост уровня инсоляции, перераспределение осадков, увеличение числа грозовых разрядов определяют динамику частоты возникновения пожаров и пожарных последствий, таких как пожарные эмиссии углеродосодержащих соединений и степень нарушенности растительных покровов [3, 4]. В этой связи актуален вопрос изучения изменений метеорологических параметров на региональном уровне, в частности в Сибири, как комплекса факторов, определяющих пожароопасное состояние по условиям погоды и вероятность возникновения и распространения на больших территориях пожаров растительности.

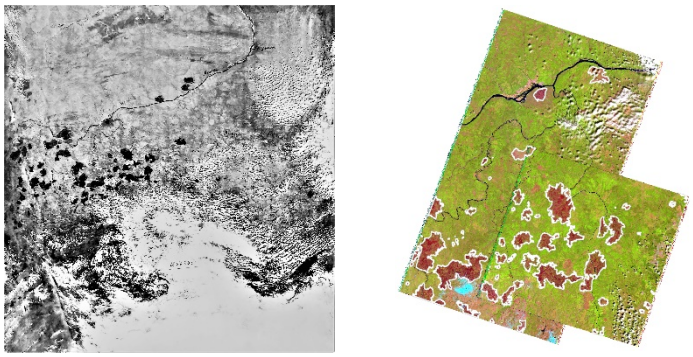
Целью работы являлся анализ динамики метеорологических факторов, определяющих уровень горимости лесов Юго-Восточной Сибири. Для этого:

1. Рассмотрена вариация числа и площадей пожаров по материалам архивной спутниковой съемки;

© Мальканова А. В., Пономарев Е. И., 2022

2. Даны количественные оценки изменения метеопоказателей за период 40 лет.

Исходные данные и методы обработки. В качестве района исследования выбрана территории юга Восточной Сибири (бассейн р. Лена, 58–61° с.ш., 118–122° в.д.). Общая площадь рассматриваемого района исследований 81,53 тыс. км^2. Для работы были выбраны снимки, полученные со спутников Landsat 4-8 TM C1 за четыре периода: 1986 г., 1995 г., 2008 г., 2015 г. Использовались трехканальные композитные изображения, составленные из данных в спектральных диапазонах 0,45–0,52 мкм (1 канал), 0,52–0,60 мкм (2 канал), 0,63–0,69 мкм (3 канал) с пространственным разрешением 30 м. На рис. 1 представлены снимки района исследования со спутника Метеор, 1986 г. (*а*) и спутника Landsat 4-5 MSS C1, 1986 г. (*б*).



а *б*

Рис. 1. Район исследований юга Восточной Сибири (бассейн р. Лена): *а* – снимок спутника Метеор, СССР, 1986; *б* – снимок спутника Landsat 4-5 TM, USA, 1986

По спутниковым данным проводилась оценка числа и площадей пожаров, а также вычислялся показатель горимости лесов в районе исследований [5]. С 1995 г. точная датировка пожаров проводилась на основе базы данных красноярского Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН [6]. Для данных за 1986 г. дополнительно мы оценили снижение альбедо в видимом красном (land surface albedo short, LSA_{short}, λ = 0,63–0,69 мкм) и ближнем инфракрасном (land surface albedo NIR, LSA_{NIR}, λ = 0,76–0,90 мкм) каналах. Как показано в работе [7], снижение в первый год после пожара LSA_{NIR} и LSA_{short} составляет 35 % и 20 % соответственно, а в последующем идет восстановление. В нашем случае, для пожаров 1986 г. эти значения были также в диапазоне 20–40 %, что подтвердило датировку пожаров для этих участков.

Горимость (γ, %) территории оценивалась следующим образом:

$$\gamma = \frac{\sum s_{\text{П}}}{s} \cdot 100\%,$$

где $\sum s_{\text{П}}$ – суммарная площадь пожаров за пожароопасный сезон; S – общая площадь исследуемой территории.

В качестве источника метеоданных использовался открытый каталог «Специализированные массивы для климатических исследований»

(http://aisori-m.meteo.ru/waisori) Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации [8]. Доступные материалы позволили восстановить многолетние ряды метеоданных для метеостанции Олекминск начиная с 1981 г. с повторностью каждые 3 часа (8 раз в сутки).

Оценивалось количество дней с грозой за каждый пожароопасный сезон и вычислялись среднемноголетние показатели для двух периодов: 1981–2010 гг. и 2011–2020 гг. По этим данным рассчитывался относительный рост показателя за эти два периода, а также годовая скорость роста показателя. Аналогично выполняли анализ следующих показателей: количество дней с осадками, длительность пожароопасного периода и уровня тепло и влагообеспеченности территории (ГТК – гидротермический коэффициент).

Результаты и обсуждение. Зафиксирован уровень экстремальной горимости рассматриваемого субрегиона в пожароопасный сезон 1986 г. (γ = 6,96 % общей площади региона). Этот показатель значительно (в 10 и более раз) превышает среднемноголетний уровень горимости за последние 25 лет, который был определен по материалам инструментального спутникового мониторинга пожаров, проводимого в Сибири с 1995 г. (табл. 1) [9].

В табл. 2 представлена динамика исследуемых метеоданных.

Таблица 1

Характеристики исследуемой области

Год	Число пожаров	Площадь пожаров, км^2	Горимость, %
1986	66	5680,96	6,96
1995	20	156,76	0,19
2008	40	706,86	0,87
2015	17	134,82	0,17
Среднее без 1986 г.*	26±13	332,81±366,77	0,41±0,45

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

Таблица 2

Динамика числа метеопараметров за периоды 1981–2010 гг. и 2011–2020 гг. на основе многолетних рядов метеостанции г. Олекминск

	Среднемноголетней показатель		Относительный рост показателя, %	Скорость, дней/год, (ед./год для ГТК)
	1981–2010 гг.	2011–2020 гг.		
Количество дней с грозами	16,03±4,62	14,7±3,53	–8,32	–0,13
Количество дней с осадками	67,9±11,2	67,8±5,59	–0,15	–0,01
Длительность ПП	97,5±8,8	104,0±9,1	6,63	0,65
ГТК	0,85±0,38	0,98±0,33	15,62	0,01

Установлено уменьшение среднемноголетнего количества дней с грозами, незначительное (–0,15 %) уменьшение количества дней с осадками и увеличение длительности пожароопасного периода на ~6 % за последние 10 лет.

Совокупность этих факторов позволяет предположить, что климатические условия последнего десятилетия в данном регионе не имеют значимого влияния на пожарный режим, а причины пожаров в большей степени определяет антропогенный характер. Кроме этого, наблюдается увеличение параметра ГТК на 15,62 % за тот же период, что может способствовать снижению частоты возникновения пожаров.

Таким образом, анализ метеоданных является важнейшей составляющей эффективного прогнозирования горимости лесов. Поэтому, параллельно с анализом спутниковых дынных, может являться одним из направлений оптимизации систем противопожарного мониторинга в различных климатических зонах.

Список литературы

1. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. 50(11). 1953–1974. https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x.

2. Flannigan M., Stocks B., Turetsky M. Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Glob Change Biol. 2009. 15(3). 549–560. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x.

3. Ponomarev E. I., Yakimov N. D., Ponomareva T. V., Yakubailik O., Conard S. G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // Atmosphere. 2021. 12(5). 559. https://doi.org/10.3390/atmos12050559.

4. Hayasaka H. Rare and Extreme Wildland Fire in Sakha in 2021 // Atmosphere. 2021. 12(12). 1572. DOI: 10.3390/atmos12121572.

5. Мальканова А. В., Забродин А. Н., Пономарев Е. И. Ретроспективные данные о пожарах на примере локальных территорий Восточной Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 65–73. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-65-73.

6. Пономарёв Е. И., Швецов Е. Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. DOI: 10.7868/S0205961415010054.

7. Quintano C., Fernandez-Manso Al., Marcos E., Calvo L. Burn severity and post-fire land surface albedo relationship in mediterranean forest ecosystems // Remote Sensing. 2019. 11. DOI: 10.3390/rs11192309.

8. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Коршунова Н. Н., Швец Н. В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394, 2014.

9. 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.

A. V. Malkanova[1,2], E. I. Ponomarev[1,3]
[1]Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», Krasnoyarsk, Russia
[2] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[3]V. N. Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: malkanova@ksc.krasn.ru

SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF METEOROLOGICAL PARAMETERS IN EASTERN SIBERIA AS A FACTOR OF WILDFIRES ACTIVITY IN THE REGION

We investigated changes in meteorological parameters in the south of Eastern Siberia. We analyzed the 8-hour average data on temperature and the presence of atmospheric phenomena, such as thunderstorms and precipitation, and restored the dynamics of the duration of the fire hazard period and heat and moisture supply (HTC indicator). On the basis of retrospective satellite imagery, we studied the dynamics of fires on the territory of Eastern Siberia (the territory of the Lena River basin in the middle reaches). We have shown the dependence of the burning of forests in local areas on the level of heat and moisture supply. We have identified a range of fire rates (number and area of fires) under extreme drought conditions. We have shown that the analysis of meteorological data is a tool for increasing the efficiency and reliability of vegetation fire forecasts.

Keywords: Siberia, satellite data, forest fire, Landsat weather data.

УДК 528.8:551.526

А. К. Матузко[1], Н. Я. Шапарев[1,2], О. Э. Якубайлик[1,2]

[1]Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия
[2]Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия
e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

ЛЕТНИЙ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕКИ ЕНИСЕЙ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

Аннотация. Измерение температуры воды на гидропостах ограничивает временные и пространственные возможности мониторинга гидротермического режима, поэтому существует необходимость дополнительных способов получения данных. Наиболее доступными инструментами является применение данных дистанционного зондирования. Работа направлена на сравнение результатов получения значений температуры воды тремя способами: данные гидропостов, математическое моделирование гидротермического режима и данные дистанционного зондирования. Сравнение результатов проводится на 4 контрольных точках р. Енисей на дату 3 июля 2016 г. до расстояния 124 км от Красноярской ГЭС.

Ключевые слова: температура воды, Landsat 8, спутниковые данные, данные ДЗЗ, гидропосты, математическое моделирование.

Введение. Важнейшим параметром водной среды является температура, которая определяет скорость происходящих в ней гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических процессов.

Измерение температуры воды проводится на гидропостах. Гидропосты установлены вдоль реки в определенных местах. Такой подход ограничивает временные и пространственные возможности мониторинга гидротермического режима, поэтому возникает необходимость расширения способов мониторинга. Наиболее доступными инструментами является применение данных дистанционное зондирования. Работа направлена на сравнение результатов получения значений температуры воды тремя разными способами: считывание данных с гидропостов, математическое моделирование гидротермического режима и от космических аппаратов дистанционного зондирования земли Landsat 8. Сравнение проводится на 4 контрольных точках р. Енисей на дату 3 июля 2016 г. в нижнем бьефе Красноярского водохранилища.

Объект исследования. Бассейн реки Енисей, расположен в средней части Азиатского материка, занимая огромную территорию от границ с Монголией до Карского моря. Протяженность реки в направлении с юга на север более 3 000 км, максимальная ширина бассейна составляет 1 600 км [1].

© Матузко А. К, Шапарев Н. Я., Якубайлик О. Э., 2022

Енисей является самой большой по водостоку рекой России (599 км^3/год) и занимает по этому показателю седьмое место в мире. В результате зарегулированности реки, обусловленной строительством Красноярской ГЭС, изменились гидротермический, гидробиологический, гидрохимический, рекреационный и климатический режимы, а также режим водопользования, и главной причиной этого является температура и расход воды, поступающей из водохранилища.

В результате создания Красноярской ГЭС температура воды в нижнем бьефе понизилась летом и повысилась осенью и зимой, причем эти изменения уменьшаются по мере удаления от плотины. Восстановление естественного летнего температурного режима реки происходит на расстоянии 700–800 км от плотины.

Инструменты и методы. Рассматривался участок реки от плотины Красноярской ГЭС на расстоянии 124 км. На рис. 1 обозначены точки, для которых проводились измерения температуры воды. Точка 1 – гидропост в г. Дивногорске, точка 2 – гидропост в г. Красноярске, точка 4 – гидропост в с. Атаманово. В точке 3 представлены только результаты расчетов и спутниковые данные.

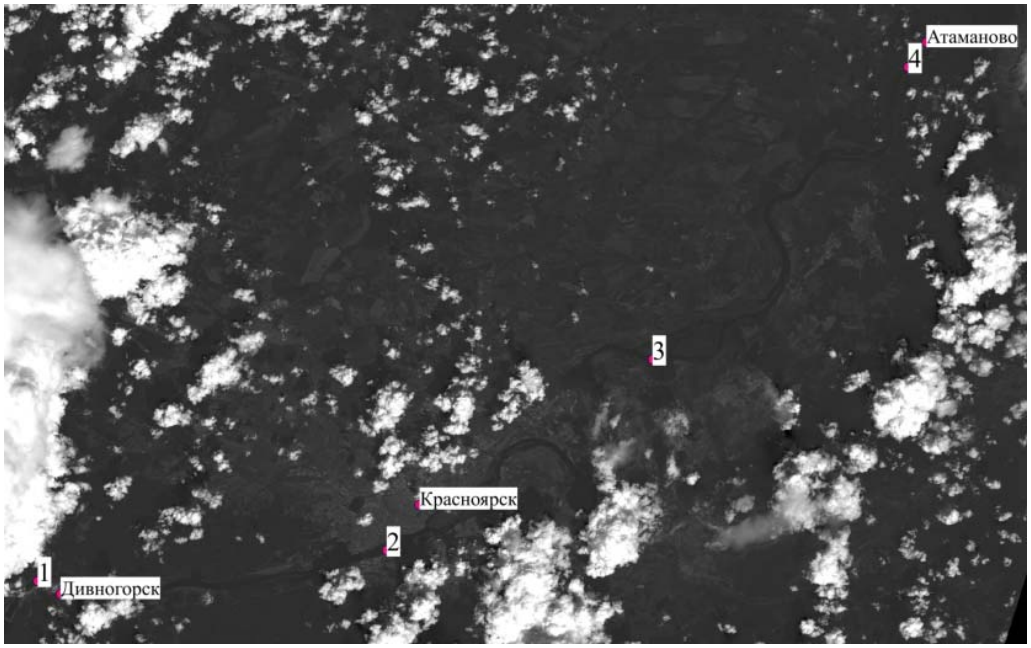


Рис. 1. Снимок Landsat 8 реки Енисей, дата съемки 3 июля 2016 г.

Для второй, третьей и четвертой контрольных точек произведено математическое моделирование гидротермического режима, основанное на детерминированном подходе [2]. Начальные данные для расчетов в первой точке – это данные гидропоста, полученные значения представлены ниже в таблице.

Спутник Landsat 8 выведен на орбиту 11 февраля 2013 г. Получает данные, используя два различных сенсора – Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Сканер теплового диапазона TIRS ведет съемку в двух каналах 10,6–11,2 мкм (10 канал) и 11,5–12,5 мкм (11 канала),

пространственное разрешение составляет 100 м [3]. До марта 2021 г. в стандартном наборе данных не существовало готового решения для получения температуры поверхности. Процедура вычисления температуры описана в работе [4]. Для определения коэффициента эмиссии применялся метод классификации изображения с обучением, где всё изображение разделялось на 4 класса (вода, растительность, строения, открытая почва) [5].

В марте 2021 г. для расчета коэффициента эмиссии стали применять данные ASTER, и для всего архива Landsat 8 были получены новые значения температуры земной поверхности. Новый набор данных получил название Collection 2 Level 2 (C2L2) [3]. При вычислении температуры поверхности учтены атмосферные параметры в день съемки.

Результаты. Получены значения температуры поверхности по спутниковым данным, математическим методом и на гидропостах на дату 3 июля 2016 г., представлено в табл.

Таблица

Температура воды в контрольных точках по данным дистанционного зондирования, по результатам математического расчета, измерения на гидропостах

Контрольная точка	Расстояние от Красноярской ГЭС	Данные Landsat 8 C2L2	Математический расчет	Гидропост
1	4	7,9804	7,2	7,2
2	40	10,33	8,1	8,5
3	77	10,53	9	
4	124	10,95	10,1	10,2

По данным из табл. составлен график для каждого варианта определения температуры воды в контрольной точке (рис. 2).

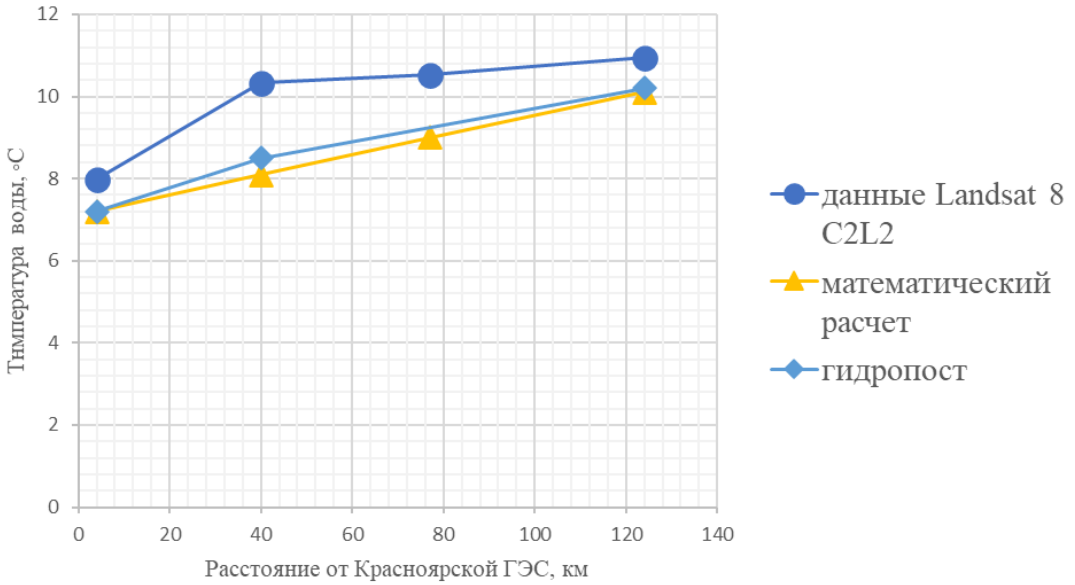


Рис. 2. Температура воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

В первой контрольной точке значения температуры имеют близкие значения, максимальное расхождение на второй контрольной точке, которая расположена в городе Красноярске.

Выводы. Сравнение температуры воды в 4 контрольных точках ниже Красноярской ГЭС на р. Енисей, показало, что значения, полученные дистанционными методами и расчетными, близки к значениям гидропостов. Предлагаемый подход, сочетающий методы физико-математического моделирования и дистанционного зондирования, перспективен и эффективен для его использования в задачах и моделях, связанных с конкретными территориями и учитывающих их специфику в условиях природно-климатических изменений. Это способствует получению качественных научных и практических результатов при принятии управленческих решений в различных задачах анализа и оценки, мониторинга окружающей среды.

Список литературы

1. Корытный Л. М., Безруков Л. А. Водные ресурсы Ангаро-Енисейского региона (геосистемный анализ). Новосибирск: Наука, 1990.

2. Шапарев Н. Я., Шокин Ю. И. Моделирование летнего гидротермического режима в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23. № 6. С. 107–114. DOI 10.25743/ICT.2018.23.6.010.

3. Сайт Геологической службы США [Электронный ресурс] : USGS. Landsat Missions. Landsat8. Режим доступа: URL: http://landsat.usgs.gov/landsat8.php.

4. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 338 с.

5. Laraby K. Landsat surface temperature product: Global Validation and Uncertainty Estimation. Rochester Institute of Technology: RIT Scholar Works – 2017.

A. K. Matuzko[1], N. Y. Shaparev[1,2], O. E. Yakubailik[1,2]

[1]Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), Krasnoyarsk, Russia

[2]Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

SUMMER HYDROTHERMAL REGIME OF THE YENISEI RIVER IN THE LOWER POOL OF THE KRASNOYARSK HPS

Measuring water temperature at gauging stations limits the temporal and spatial possibilities of monitoring the hydrothermal regime, so there is a need for additional methods of obtaining data. The most accessible tools are the use of remote sensing data. The work is aimed at comparing the results of obtaining water temperature values in three ways: data from gauging stations, mathematical modeling of the hydrothermal regime, and remote sensing data. Comparison of the results is carried out at 4 control points of the river. Yenisei on the date July 3, 2016 to a distance of 124 km from the Krasnoyarsk HPS.

Keywords: water temperature, Landsat 8, satellite data, remote sensing data, gauging stations, mathematical modeling.

УДК 528.8.04, 528.88

А. А. Никитин[1], И. Л. Цыпышева[2], Н. М. Мокрин[3]

[1]Кандидат географических наук, Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Россия
[2]Ведущий специалист, Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Россия
[3]Кандидат биологических наук, Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Россия
E-mail: aleksandr.nikitin@tinro-center.ru, irina.tsypysheva@tinro-center.ru, nikolay.mokrin@tinro-center.ru

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРЫ ВОД, БЛАГОПРИЯТНЫЕ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ТИХООКЕАНСКОГО КАЛЬМАРА В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В 2018–2022 ГГ.

Аннотация. По данным архива температуры поверхности моря за 2018–2020 гг., восстановленной по данным спутников AQUA, TERRA (спектрорадиометр MODIS), с пространственным разрешением 1 км, полученной и обработанной в Центре коллективного пользования Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН, были проанализированы термические условия и динамика вод в северо-западной части Японского моря и рассмотрены районы ярусного (джиггерного) промысла тихоокеанского кальмара в Японском море. Анализ спутниковых материалов позволил выявить в поле пространственного распределения температуры поверхности океана гидрологические элементы термической структуры, в которых успешно велся лов тихоокеанского кальмара.

Ключевые слова: Японское море, тихоокеанский кальмар, спутниковая информация, температура воды, вихри, грибовидные течения.

Введение

Тихоокеанский кальмар (Todarodes Pacificus) (ТК) – один из массовых видов эпипелагиали северо-западной части Тихого океана, имеющий важное промысловое значение в странах АТР [1]. Характеризуется наличием протяженных миграций, коротким жизненным циклом (около 1 года) и значительными колебаниями численности [2, 3]. Карты температуры поверхности океана (ТПО) акватории Японского моря, построенные на основе данных дистанционного зондирования, позволяют оценить состояние и динамику температурных условий промыслового района, прежде всего предусматривают оценку пространственно-временной изменчивости проявлений океанической циркуляции: течений, фронтальных зон и вихрей различных масштабов.

Цель работы: по данным спутниковой информации выделить гидрологические элементы структуры вод в северо-западной части

© Никитин А. А., Цыпышева И. Л., Мокрин Н. М., 2022

Японского моря, в которых наблюдались наибольшие уловы тихоокеанского кальмара в путину 2018–2020 гг.

Материалы и методы

Проведено сопоставление районов ярусного (джиггерного) промысла ТК (по судовым суточным данным системы ЦСМС Росрыболовства) и элементов гидрологической обстановки в Японском море, полученных в результате дешифрирования инфракрасных спутниковых изображений в период путины 2018–2020 гг. Использовался архив температуры поверхности моря (ТПМ) за 2018–2020 гг., восстановленной по данным спектрорадиометра MODIS (спутники AQUA, TERRA) в инфракрасном диапазоне спектра с пространственным разрешением 1 км. Данные получены и обработаны в Центре коллективного пользования Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН (ЦКП) [4]. Для визуализации пространственного распределения ТПО использовалась программа Glance1.95. При визуально-ручном дешифрировании, проводя коррекцию яркостных порогов снимков по гистограмме, добивались проявления водных масс по цвету. Не всегда в поле температуры воды выделялись вихревые структуры из-за прогрева поверхностного слоя океана, поэтому дополнительно использовалась информация оптического диапазона (пространственное распределение хлорофилла-а). При этом наблюдались аномалии состояния морской поверхности, такие, как мезомасштабные вихри и струйные грибовидные течения с вихревым диполем на конце. На картах координаты тралений с максимальным уловом обозначены заштрихованными кружками, овалом – районы, где работало несколько судов.

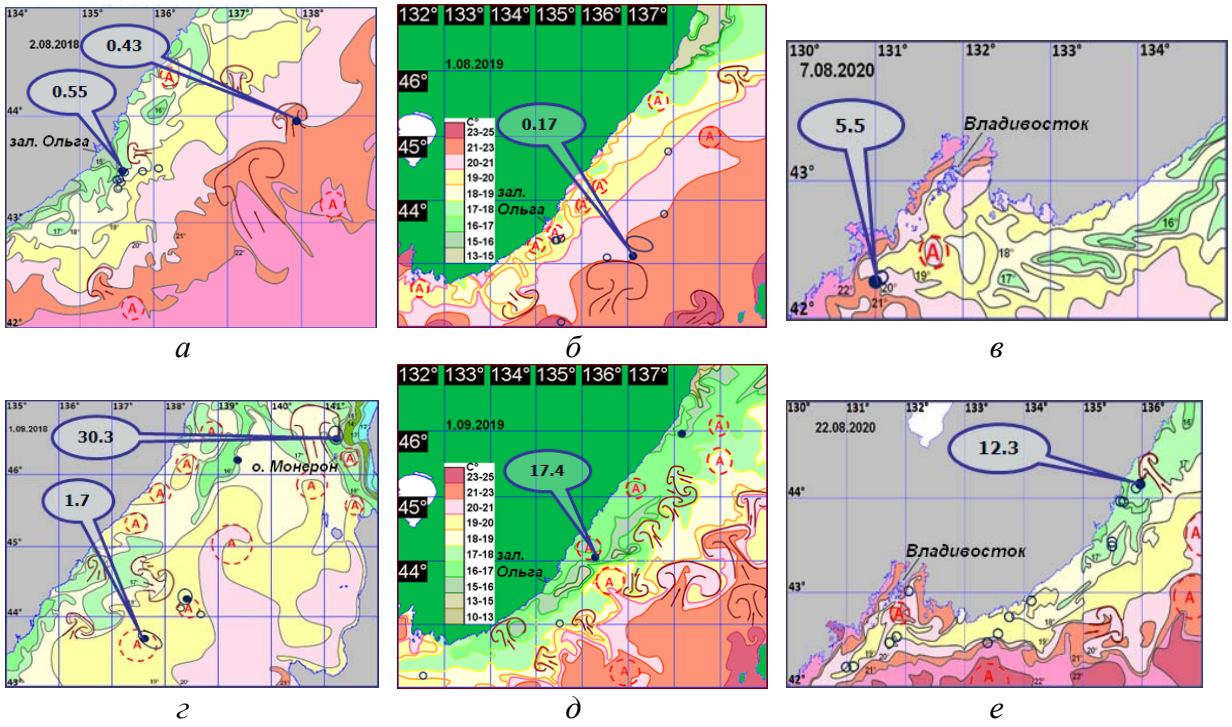
Результаты и обсуждения

Известно, что широтное распределение тихоокеанского кальмара зависит от гидрологических особенностей года. Прежде всего, миграции кальмара в Японском море зависят от интенсивности Цусимского течения и его ветвей, а также Приморского течения, препятствующего подходу теплых субтропических вод к прибрежной зоне Приморья. Промысел тихоокеанского кальмара в августе 2018–2019 гг. начался при усилении адвекция субтропических с выходом тропических циклонов в зону Японского моря. От Цусимского течения и его Восточно-Корейской ветви были направлены в северном, северо-западном направлении довольно мощные струйные течения к побережью Приморья.

Промысел ТК в начале августа 2018 г. велся как на прибрежном фронте мористее зал. Ольги (вылов 0.55 т) при температуре 17–18 °С, так и восточнее, в антициклоническом вихре мезомасштабного грибовидного течения (0.43 т), отходящего от основного потока Цусимского течения, при температуре 20–21 °С (рис. 1, *а*). Многолетние спутниковые наблюдения показали, что динамика водных масс осуществляется струйными течениями, в вершине которых образуется вихревой диполь (слева по движению циклонический вихрь, справа – антициклонический). Грибовидные течения возникают при локальном кратковременном

приложении импульса к поверхности или приповерхностному слою воды за счет локальных источников кинетической энергии различной природы (например, ветровых струй). На спутниковых изображениях этот гидрологический элемент имеет форму гриба. В области образования таких течений наиболее резкие фронты формируются на передней стороне «шляпки» растущего «гриба» и на обеих сторонах его струйной части [5]. В 2019 г. промысел ТК велся южнее зал. Ольга на южной периферии мезомасштабного антициклонического вихря, а также в более теплых водах Цусимского течения. Наибольший улов 0.17 т зафиксирован на «шляпке» вихревого диполя, меньшие уловы отмечались во фронтальной зоне (рис. 1, *б*).

Гидрологические условия в 2020 г. значительно отличались от двух предыдущих лет. Летом интенсивность Приморского течения была велика, а Восточно-Корейского течения – низкой. Лишь отдельные незначительные струйные течения достигали зал. Петра Великого (ЗПВ). 7 августа вылов ТК 5.5 т отмечен в вершине теплого затока при температуре 19–20 °С (рис. 1, *в*).



а *б* *в*

г *д* *е*

Рис.1. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по спутниковым данным, за 2.08.2018 г. (*а*), 1.08.2019 г. (*б*), 7.08.2020 г. (*в*), 1.09.2018 г. (*г*), 1.09.2019 г. (*д*) и 22–28.08.2020 г. (*е*) с районами промысла ТК. Условные обозначения: А – антициклонический вихрь; ○ – координаты уловов ТК; ● – координаты с максимальным уловом

В начале сентября 2018 г. промысловые скопления ТК (вылов до 1.7 т) отмечались в квазистационарных антициклонических вихрях. Вторжение вод Цусимского течения в юго-восточную часть Татарского пролива привело к формированию в районе о. Монерон мезомасштабного антициклонического вихря грибовидного течения, в котором отмечен

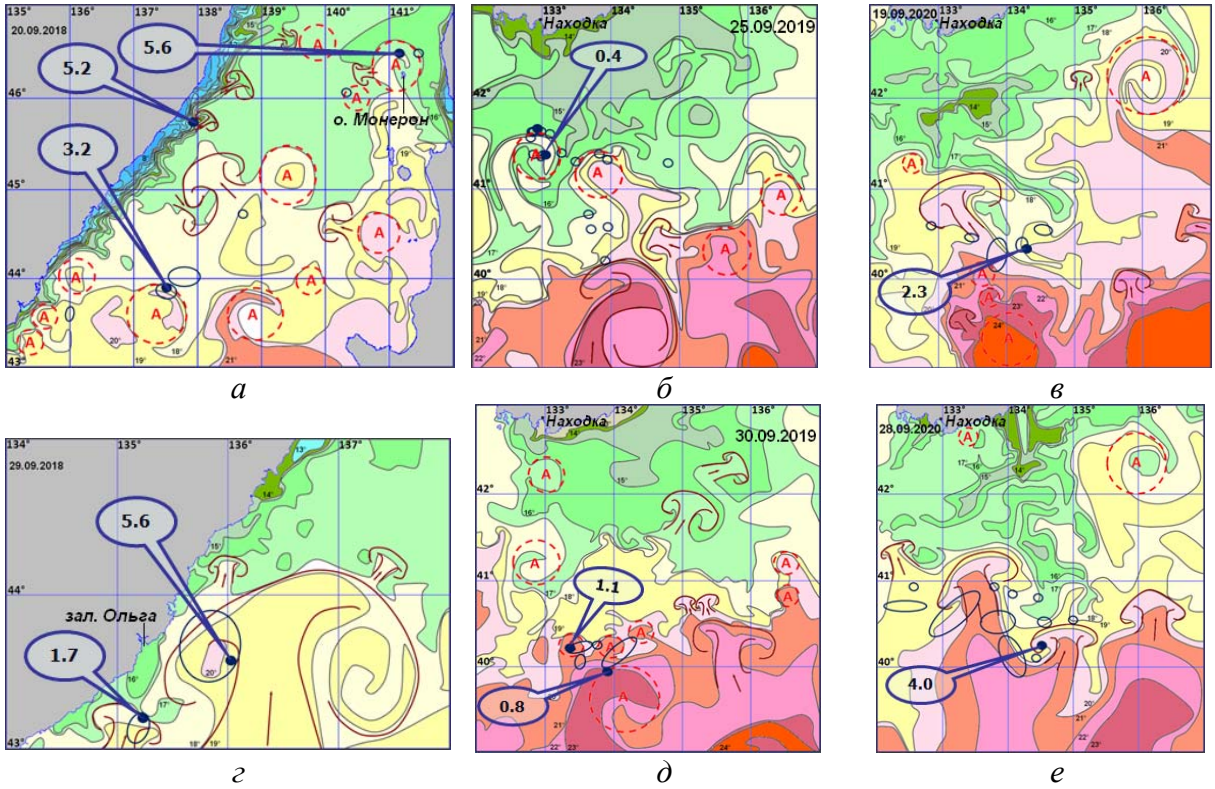
успешный лов ТК от 13 до 31 т (рис. 1, *г*). В 2019 г. значительный вылов ТК в 17.4 т отмечен в районе среднего Приморья на южной периферии мезомасштабного антициклонического вихря (рис. 1, *д*). Успешный промысел велся севернее 46° с.ш. на прибрежном фронте. В первой половине сентября 2020 г. из-за прохождения мощных тайфунов лов кальмара не велся. На карте за 22 августа нанесены координаты участков промысла с 22 по 31 августа (рис. 1, *е*). По сравнению с началом августа (рис. 1, *в*), адвекция теплых вод на север увеличилась. Промысел кальмара велся на прибрежном фронте, в зоне взаимодействия теплых и относительно холодных вод в ЗПВ (уловы от 0.3 до 1.5 т). Успешный улов 12.3 т отмечен лишь вблизи циклонического вихря грибовидного мезомасштабного течения вблизи прибрежья.

Во второй декаде сентября 2018 г. после воздействия северо-западных ветров происходило обострение прибрежного фронта, обусловившего апвеллинговые явления (рис. 2, *а*). Вылов ТК на этом фронте был 5.2 т. Промысловые скопления ТК отмечались в антициклоническом вихре вблизи о. Монерон, который имел спиралевидную форму, при этом наибольший вылов отмечен внутри вихря (5.6 т) при температуре 18 °С. В 2019 г. субтропические воды отступили в южном направлении, также сместились на юг и районы промысла. Промысел ТК (уловы 0.3–0.4 т) были в мористой зоне южнее зал. Находка не только в центре антициклонического вихря в вершине теплого струйного течения, но и на его северной периферии (рис. 2, *б*). Вихрь имел спиралевидную структуру, при этом наблюдалось затекание в него относительно холодных субарктических вод. Также промысел был связан с фронтальной зоной, с северной периферией соседнего мезомасштабного вихря, которым заканчивалось струйное вторжение субтропических вод по 134° в.д. В 2020 г. также как и в 2019 г., промысел находился в интрузиях теплых вод второй ветви Цусимского течения при температуре воды 19–21 °С, где максимальный улов составлял 2.3 т (рис. 2, *в*).

В конце сентября 2018 г. промысел продолжался на прибрежном фронте при усилении адвекции субтропических вод. Значительный улов 5.6 т фиксировался в циклоническом вихре образовавшегося вблизи побережья крупного диполя (рис. 2, *г*). Другой участок промысла наблюдался юго-западнее в антициклоническом вихре мезомасштабного грибовидного течения на границе с субарктическими прибрежными водами. Максимальный улов был 1.7 т на «шляпке гриба».

В то же время в 2019–2020 гг. районы промысла кальмара уже значительно сместились в южном направлении в зону взаимодействия относительно холодных субарктических вод с теплыми субтропическими водами мористой ветви. В 2019 г. районы промысла кальмара были приурочены к северо-западной периферии мезомасштабного антициклонического вихря в вершине теплого затока субтропических вод с температурой 23 °С (рис. 2, *д*). На его северо-западной периферии был улов 0.88 т. Наибольший улов 1.1 т отмечался в центре мезомасштабного

антициклонического вихря с координатами центра 40°12’ с.ш., 133°25’ в.д. В 2020 г. весь промысел велся между 133–134° в.д. в неоднородностях мористой ветви теплого потока (рис. 2, *е*). Наибольший улов 4 т фиксировался в циклоническом вихре грибовидного течения, отделившегося от основного потока в северо-восточном направлении.



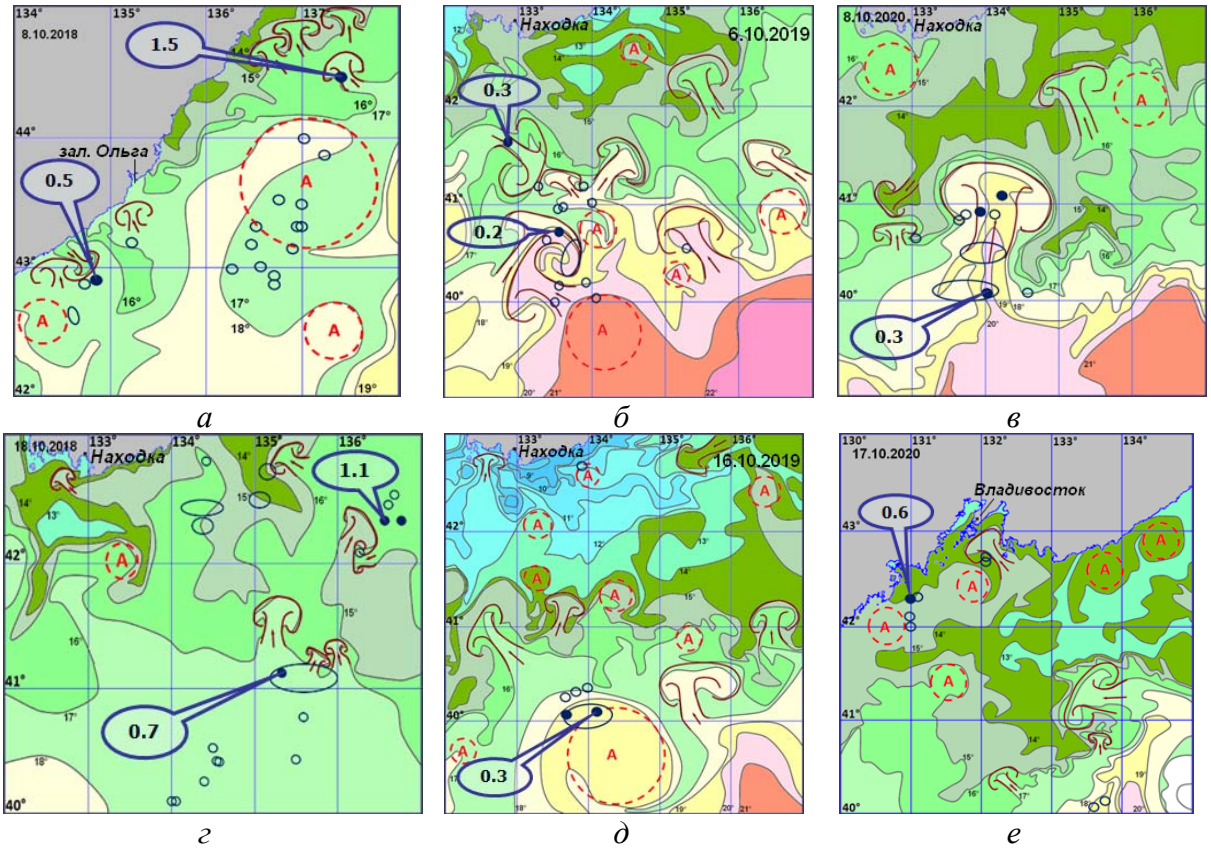
а *б* *в*

г *д* *е*

Рис. 2. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по спутниковым данным, за 20.09.2018 г. (*а*), 25.09.2019 г. (*б*), 19.09.2020 г. (*в*), 29.09.2018 г. (*г*), 30.09.2019 г. (*д*) и 28.09.2020 г. (*е*) с районами промысла кальмара (обозначения как на рис. 1)

В первой декаде октября 2018 г. район промысла кальмара в северном Приморье оставался в потоке теплого течения в крупном антициклоническом вихре и вблизи струи, подпитывающей его (рис. 3, *а*). Уловы составляли от 0.2 до 0.5 т. Максимальный улов 1.5 т наблюдался в циклоническом вихре мезомасштабного грибовидного течения, направленного к берегу в северо-западном направлении (температура воды 17 °С). Уловы кальмара отмечались вблизи мезомасштабной упаковки грибовидных вихрей (максимальный улов 0.5 т) и около антициклонического вихря ближе к берегу при температуре воды 17 °С. В 2019 г. мезомасштабный антициклонический вихрь (рис. 3, *б*), в котором 30 сентября отмечался максимальный улов, увеличился, проявилась его спиралевидная структура. Вихрь подпитывался водами от крупного антициклонического вихря и струйного течения с запада. В результате этот вихрь оказался общим в упаковке двух грибовидных течений, внутри которого отмечался улов 0.22 т. Севернее в основной струе грибовидной структуры из вод Восточно-Корейского течения, вихревой диполь

которого находился между 41–42° с.ш. по 133° в.д. составил 0.3 т. Отдельные небольшие уловы были связаны с зонами взаимодействия вихрей. В 2020 г. районы промысла оказывались в основной струе мористой ветви теплого течения по 134° в.д., где уловы составляли 0.3 т при температуре воды 19–20 °С (рис. 3, *в*). Незначительные уловы наблюдались в циклоническом вихре образовавшегося в вершине диполя, в антициклоническом вихре мезомасштабного грибовидного течения.



а *б* *в*

г *д* *е*

Рис. 3. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по спутниковым данным, за 8.10.2018 г. (*а*), 6.10.2019 г. (*б*), 8.10.2020 г. (*в*), 18.10.2018 г. (*г*) 16.10.2019 г. (*д*) и 17.10.2020 г. (*е*) с районами промысла кальмара (обозначения как на рис. 1)

В середине октября 2018 г. районы промысла сместились в южном направлении (рис. 3, *г*). Максимальный улов кальмара отмечался в водах потока с востока, максимальный улов был 1.1 т. Меньшие уловы (0.7 т) отмечались южнее, около 41° с.ш. В струйных течениях теплых вод (14–17 °С), подходящих к побережью, уловы кальмара составляли 0.1–0.5 т. В 2019 г. общий температурный фон понизился, на северной периферии крупного антициклонического вихря при температуре 18 °С вновь обнаруживались промысловые скопления (рис. 3, *д*). В 2020 г. незначительные уловы кальмара отмечались в ЗПВ (рис. 3, *е*), при этом один район промысла находился в зоне взаимодействия установившегося антициклонического вихря с относительно теплыми водами Восточно-Корейского течения и субарктическими прибрежными водами. Наибольший улов составил 0.6 т. Следующий район промысла был

в циклоническом вихре частично зашедшего в Уссурийский залив грибовидного течения с температурой воды 15 °С.

Заключение

Сопоставление элементов гидрологической обстановки, дешифрированных с инфракрасных спутниковых изображений, с районами промысла позволило установить, что, как правило, лов кальмара ведется при определенных условиях.

В 2018 г. районы лова кальмара находились в северо-западной части Японского моря, включая прибрежную часть Приморья и южную часть Татарского пролива. Лишь во второй половине октября миграция кальмаров начала проходить через центральную часть моря. В путину 2019 г. районы промысла кальмара были в мористой зоне Японского моря. Основная причина слабых подходов кальмара на нагул в прибрежные районы Приморья связана с неблагоприятной динамикой поверхностных течений. Летом и осенью было интенсивным Приморское течение, адвекция субтропических вод к прибрежью была слабой. В 2020 г. лов кальмара начинался в прибрежной акватории Приморья в зоне взаимодействия вод Приморского течения с субтропическими водами. Однако уже в сентябре промысел сместился в центральную часть моря, в мористую ветвь Цусимского течения, направленную на север. Несмотря на различную географию районов рыбалки, промысловые скопления кальмара находились в одних и тех же гидрологических образованиях. Наибольшие уловы ТК отмечались на периферии теплых мезомасштабных антициклонических вихрей, граничащих с субарктическими водами. Если вихрь имел спиралевидную структуру, то скопления кальмара сосредоточивались в центре вихря. Если заток субтропических вод принимал форму грибовидного течения, наибольшие уловы отмечались в струе течения и в зоне антициклонического и циклонического завихрения диполя. Во фронтальной зоне между субтропическими и субарктическими водами районы промысла тихоокеанский кальмар находились с теплой стороны фронта. Температура поверхности моря в районах лова была в диапазоне от 12 °С до 22 °С.

Данная работа выполнялась для накопления статистических данных о нахождении промысловых скоплений ТК в определенной гидрологической структуре для улучшения краткосрочного прогнозирования по спутниковым данным в период путины.

Список литературы

1. Sakurai Y., Kidokoro H., Yamashita N., Yamamoto J., Uchikawa K., Takahara H. Todarodes pacificus, Japanese common squid // In: Advances in Squid Biology, Ecology and Fisheries. Part 2. Nova Science Publishers. Inc. 2013. P. 250–270.

2. Мокрин Н.М. Экология и перспективы промысла тихоокеанского кальмара Todarodes pacificus в Японском море: автореф. дис… канд. биол. наук. Владивосток. 2006. С. 21.

3. Kidokoro H., Goto T., Nagasawa T. et al. Impact of climate regime shift on the migration of Japanese common squid (Todarodes pacificus) in the Sea of Japan // Int. Coun. For the Exp. Of the Sea. Oxord Jornals. 2010. P. 1314–1332.

4. Алексанин А. И., Алексанина М. Г. Мониторинг термических структур поверхности океана по данным ИК-канала спутников NOAA на примере Прикурильского района Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Вып. 3. Т. II. Москва, ООО «Азбука-2000». 2006. С. 9–15.

5. Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с.

A. A. Nikitin[1], I. I. Tsypysheva[2], N. M. Mokrin[3]

[1]Candidate of Geographical Sciences, Pacific Branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia

[2]Leading Specialist, Pacific Branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia

[3]Candidate of Biological Sciences, Pacific Branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia

E-mail: aleksandr.nikitin@tinro-center.ru, irina.tsypysheva@tinro-center.ru, nikolay.mokrin@tinro-center.ru

HYDROLOGICAL ELEMENTS OF THE WATER STRUCTURE FAVORABLE FOR THE MAXIMUM CONCENTRATION OF PACIFIC SQUID IN THE NORTHWESTERN PART OF THE SEA OF JAPAN ACCORDING TO SATELLITE OBSERVATIONS IN 2018–2022

According to the archive of the sea surface temperature for 2018–2020, recovered from the data of the AQUA, TERRA satellites (MODIS spectroradiometer), with a spatial resolution of 1 km, obtained and processed at the Center for Collective Use of the Regional Satellite Environmental Monitoring of the FEB RAS (CCP, Vladivostok), thermal conditions and water dynamics in the northwestern part were analyzed Areas of longline (jigger) fishing of Pacific squid (according to the ship's daily data of the Rosrybolovstvo CSMS system) in the Sea of Japan are considered. The analysis of satellite materials made it possible to identify hydrological elements of the thermal structure in the field of spatial distribution of ocean surface temperature, in which Pacific squid fishing was successfully conducted.

Keywords: Sea of Japan, Pacific squid, satellite information, water temperature, eddies, mushroom currents.

УДК 551.524, 550.34

Л. Г. Свердлик

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

АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ КРУПНЕЙШИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ АЛЬПИЙСКО-ГИМАЛАЙСКОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЯСА

Аннотация. Проанализированы данные спутниковых измерений в периоды подготовки четырех разрушительных землетрясений с магнитудами $M > 7.5$, произошедших в зоне Альпийско-Гималайского сейсмического пояса: в Китае (2008 г.), Иране, Пакистане (2013 г.) и Непале (2015 г.). Для идентификации предсейсмических возмущений предложен новый подход к анализу пространственно-временных вариаций температуры в UTLS, основанный на использовании модифицированного критерия STA/LTA, статистического и спектрального анализа. Применение специально разработанного алгоритма позволило установить, что аномалии сейсмогенного происхождения характеризовались высокими значениями параметра аномальных вариаций (≥ 2.0) и проявлялись в виде хорошо выраженных мезомасштабных (300–800 км), относительно долгоживущих (от 18 до 36 часов) возмущенных областей. Аномалии температуры наблюдались за 1–5 суток до сильных землетрясений и были локализованы в пределах нескольких сотен километров от их эпицентров.

Ключевые слова: землетрясение, атмосфера, температура, критерий STA / LTA, аномалия.

В продолжение выполненных ранее исследований атмосферных эффектов землетрясений [1, 2] рассмотрены события одного из самых сейсмически активных внутриконтинентальных регионов мира, который является частью Альпийско-Гималайского сейсмического пояса, образованного в процессе столкновения движущихся на север Аравийской и Индийской плит с Евразийской плитой. Проанализированы крупнейшие землетрясения с магнитудами $M > 7.5$, произошедшие за последние 15 лет (2006–2021 гг.): в Китае ($M = 7.9$; 12.05.2008), Иране ($M = 7.7$; 16.04.2013), Пакистане ($M = 7.7$; 24.09.2013) и Непале ($M = 7.8$; 25.04.2015). Эпицентры землетрясений располагались примерно в одной широтной области (27–31° N), но были достаточно широко разнесены вдоль параллели (от 62° до 103° E). Глубины гипоцентров изменялись от ~8 до 80 км [3].

Используемые спутниковые измерения температуры атмосферы на 10 стандартных изобарических уровнях (p_k) от 500 до 70 гПа (MERRA-2) охватывали высотный диапазон от верхней тропосферы до нижней стратосферы (UTLS). Пространственное разрешение температурных данных составляло 0.5°×0.625°. Дискретизация по времени $\Delta t = 3$ часа [4].

© Свердлик Л. Г., 2022

Исследование взаимосвязи между аномальными изменениями температуры в верхней тропосфере / нижней стратосфере (UTLS) и вариациями сейсмичности проводилось с помощью обновленной версии разработанного ранее алгоритма [5], основанного на вычислениях модифицированного критерия STA/LTA. Для повышения чувствительности алгоритма выполнялось преобразование исходных временных рядов в приращения температуры (ΔT), которые вычислялись как разность между значениями $T(t_i)$ для одного и того же момента времени, отстоящие на определенное количество суток (N_δ). Фрагменты временных рядов приращений температуры ΔT в верхней тропосфере (400 hPa) и области тропопаузы (200 и 100 hPa) представлены на рис. 1.

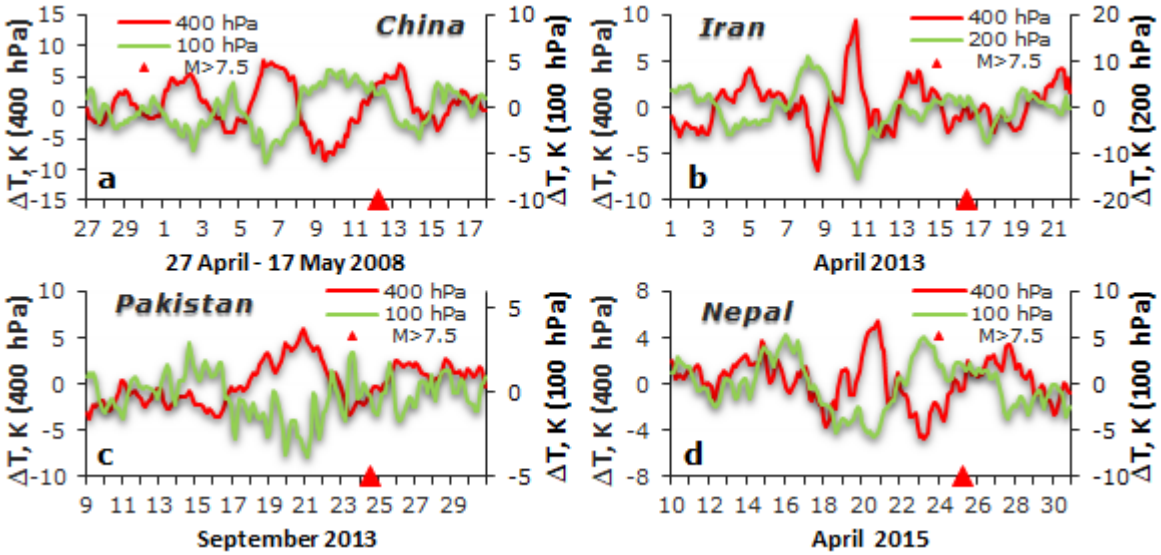


Рис. 1. Вариации приращений температуры ΔT в верхней тропосфере (400 hPa) и области тропопаузы (200 и 100 hPa) в периоды сейсмической активности в Китае (*a*), Иране (*b*), Пакистане (*c*) и Непале (*d*). Маркерами отмечены моменты событий M > 7.5

Возмущения температуры атмосферы проявлялись в виде синхронных противофазных короткопериодных вариаций. После землетрясений амплитуды колебаний температуры существенно уменьшались, что может свидетельствовать о связи наблюдаемых возмущений температуры с сейсмическим процессом.

Рис. 2 иллюстрирует процесс детектирования предсейсмических возмущений температуры на уровнях 300–400 hPa и 100 hPa (рис. 2, *a–f*) над эпицентральными областями землетрясений M > 7.5 в Китае, Пакистане и Непале. Выделение аномалий основано на сравнении дисперсий предыдущих значений температуры в коротком и длинном временных окнах. Аномальному поведению температуры соответствовали выделенные зеленым цветом точки графиков, отвечающие условию $VAR_{STA} > VAR_{LTA}$. Полученные в соответствии с [5] результаты вычисления интегральных параметров δT и δT_C (рис. 2, *g*, *h*, *i*) показали, что наиболее интенсивные короткопериодные возмущения температуры

проявлялись за 1–5 дней до землетрясений M > 7.5 (рис. 2, *j*, *k*, *l*). В другие моменты времени столь выраженные эффекты не наблюдались.

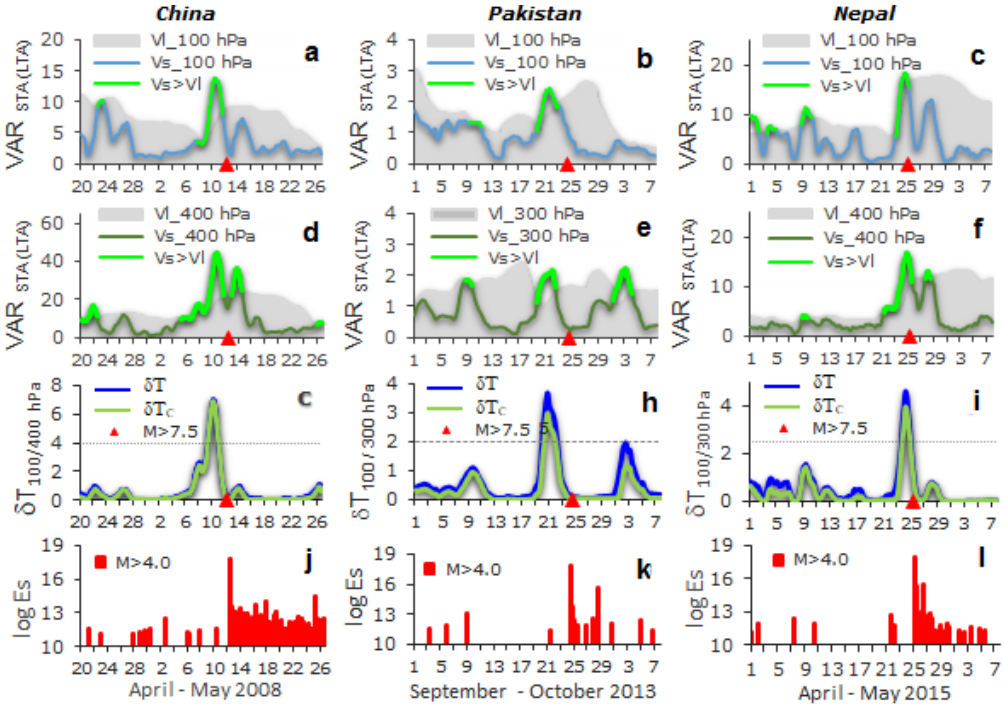


Рис. 2. Временные ряды скользящих дисперсий VAR_{STA} и VAR_{LTA} на уровнях 100 hPa (*a*, *b*, *c*) и 300–400 hPa (*d*, *e*, *f*); соответствующие вариации δT и δT_C (*g*, *h*, *i*) над эпицентрами землетрясений M > 7.5; распределение логарифма сейсмической энергии (log Es) (*j*, *k*, *l*) в рассматриваемые периоды в Китае (20 апреля – 26 мая 2008 г.), Пакистане (01 сентября – 07 октября 2013 г.) и Непале (01 апреля – 07 мая 2015 г.)

Карты пространственно-временного распределения аномальных изменений температуры, построенные для периодов сейсмической активности в Китае (с 01 по 15 мая 2008 г.) и Непале (с 15 по 30 апреля 2015 г.), демонстрируют изменения во времени интегрального параметра δT_C по широте и долготе (рис. 3). В обоих случаях предсейсмические возмущения температуры проявлялись в виде локализованных мезомасштабных областей повышенных значений параметра δT_C.

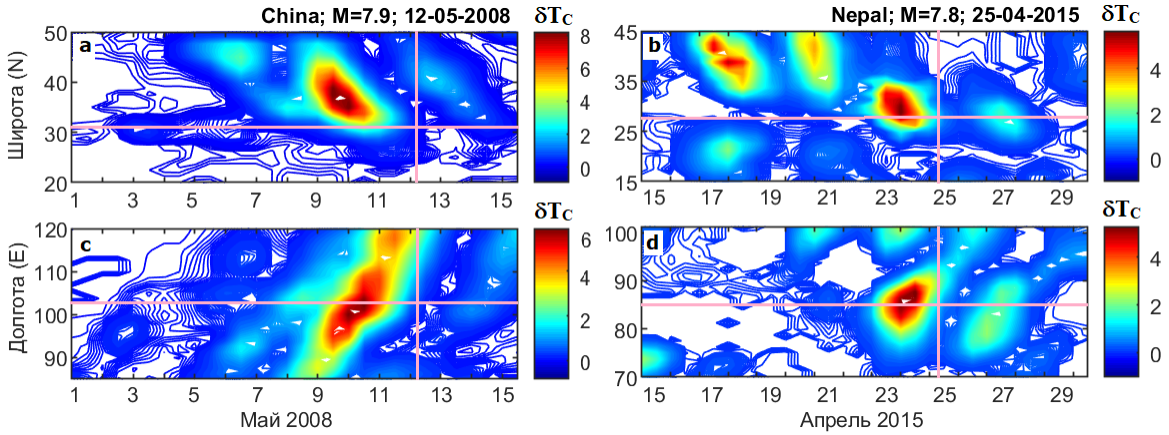


Рис. 3. Распределения параметра δT_C по широте (*a*, *b*) и долготе (*c*, *d*) в Китае (с 01 по 15 мая 2008 г.) и Непале (с 15 по 30 апреля 2015 г.) Вертикальные и горизонтальные линии указывают моменты землетрясений и координаты их эпицентров

Таким образом, обновленная версия алгоритма, основанного на использовании модифицированного критерия STA/LTA, обладает высокой эффективностью выделения предсейсмических возмущений температуры в области UTLS. Применение алгоритма к временным рядам температуры позволило выделить области аномальных изменений, четко связанные как по времени, так и в пространстве с периодами подготовки крупнейших землетрясений $M > 7.5$ Альпийско-Гималайского сейсмического пояса. Наиболее возмущенные области UTLS были расположены на расстояниях, не превышающих 400 км от эпицентров землетрясений и предваряли их на 1–5 суток. Такое совпадение может свидетельствовать о вероятной связи температурных аномалий с активизацией литосферных процессов.

Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC за свободный доступ к данным.

Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах».

Список литературы

1. Свердлик Л. Г., Имашев С. А. О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 19–26.
2. Sverdlik L., Imashev S. Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan // MAUSAM. 2020. 71. 3. 481–490.
3. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/
4. URL: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/
5. Свердлик Л. Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149.

L. G. Sverdlik

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

TEMPERATURE ANOMALIES BEFORE LARGEST EARTHQUAKES IN THE ALPINE-HIMALAYAN SEISMIC BELT

Satellite measurements within periods of preparation of four destructive earthquake of $M > 7.5$ occurred in the Alpine-Himalayan seismic belt: in China (2008), Iran, Pakistan (2013) and Nepal (2015). To identify pre-seismic perturbations a new approach to analysis of spatial-temporal temperature changes in UTLS, based on a modified STA/LTA criterion, statistic and spectral analysis has been suggested. Application of the developed algorithm allowed to establish that anomalies of seismogenic origin were characterized by high values of parameter δT_C ($\geq$2.0) and manifested as explicit mesoscale (300–800 km), relatively long-lived (from 18 to 36 hours) disturbed areas. Temperature anomalies were observed 1–5 days before strong earthquakes and located within several hundred kilometers from their epicenters.

Keywords: earthquake, atmosphere, temperature, STA / LTA A *criterion, anomaly.*

УДК 528.88

В. С. Стародубцев, В. С. Соловьев, С. А. Васильева

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
e-mail: tomskaya@ikfia.ysn.ru

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО МЕТАНА В ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-5P

Аннотация. Приведены предварительные результаты исследования вариаций атмосферного метана в Якутии по данным спутника Sentinel-5P (2018–2021). Была построена карта плотности покрытия территории Якутии данными спектрометра TROPOMI, исходя из которой и данных о лесных гарях прибора MODIS были выбраны два тестовых, нетронутых за последнее десятилетие лесными пожарами, участка, а также две изолированные гари и соответствующие им фоновые участки. Проведен предварительный анализ вариаций атмосферного метана на исследуемых участках за период май-сентябрь 2018–2021 гг. На тестовых участках и гарях наибольшие значения метана регистрируются в конце теплого сезона, когда происходит наибольшая оттайка вечномерзлых грунтов. Значения метана над гарями повышены по сравнению с соответствующими невозмущенными (фоновыми) участками, что обусловлено воздействием лесных пожаров. Межгодовые вариации метана за исследуемый период показывают некоторую тенденцию к повышению содержания метана в атмосфере.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, TROPOMI, MODIS, метан, лесные пожары, криолитозона.

Введение. За последние десятилетия наиболее заметно глобальные изменения климата Земли наблюдаются на северных широтах, где темпы роста температуры в два раза превышают средние по Земному шару [1]. Изменение климата может оказывать значительное влияние на источники метана, который является одним из эффективных парниковых газов [2].

Глобальное потепление, возможно, затронет часть объемов парниковых газов, в настоящий момент находящихся во вмороженном состоянии в виде газогидратов и пласт-хранилищ [3, 4], результатом чего станет резкое увеличение эмиссии парниковых газов из высокоширотных экосистем [5, 6].

Одним из значительных источников парниковых газов, включая метан, являются лесные пожары [7]. Откликом на происходящее изменение климата является увеличение продолжительности пожароопасного сезона, частоты возникновения, а также масштабов лесных пожаров [8, 9]. Эмиссия углерода происходит не только во время горения, но и после пожаров, так как на месте гари увеличивается глубина сезонно-талого слоя [10, 11].

© Стародубцев В. С., Соловьев В. С., Васильева С. А., 2022

Целью данной статьи является исследования вариаций концентрации атмосферного метана в Якутии в теплый период (май-сентябрь) 2018–2021 гг. по данным спектрометра TROPOMI спутника Sentinel-5 Precursor.

Используемые данные. Исследования вариаций метана проводились по данным спектрометра TROPOMI/Sentinel-5P (https://www.earthdata.nasa.gov), предназначенного для исследования химического состава атмосферы. Ширина полосы съемки составляет ~2 600 км на земной поверхности. Размер пикселя (в надире) составляет 7×5.5 км^2. Спектрометр измеряет метан в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) 2305–2385 нм. Чувствительность падает при больших зенитных углах Солнца [12]. Алгоритм восстановления концентрации метана чувствителен к наличию облачности и аэрозольного загрязнения. В связи с этим данные TROPOMI были использованы в теплый сезон (май-сентябрь), с 2018 по 2021 гг.

Для выбора тестовых участков, обособленных локальных гарей и соответствующих гарям фоновых участков были использованы продукты прибора MODIS MCD14DL Hotspot (https://earthdata.nasa.gov/firms) и MCD64A1 Burned Area [13].

Обсуждение. На основании анализа построенной карты плотности покрытия данными TROPOMI территории Якутии в период май-сентябрь 2018–2021 гг. и карты распределения термоточек (2010–2021 гг.) были выбраны два тестовых участка на местности, незатронутой за последнее десятилетие лесными пожарами. Участок № 1 (Север) расположен в зоне тундры, где преобладает кустарниковая и травянистая растительность, второй участок № 2 (Юг) – в таежной зоне, на юге Якутии.

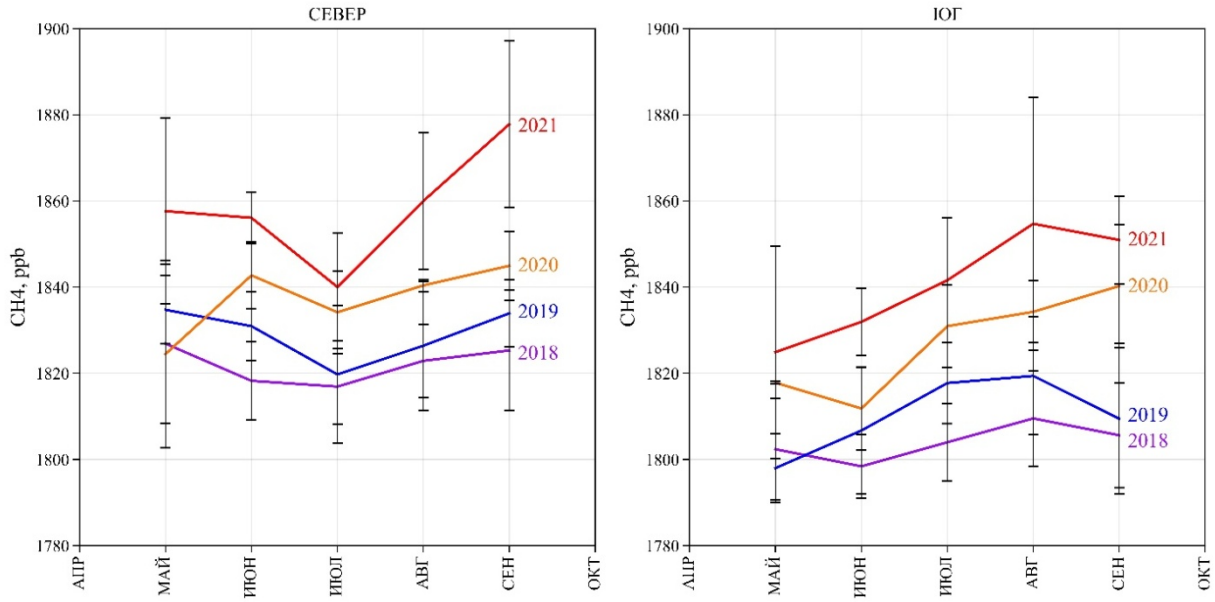


Рис. 1. Концентрация метана по данным TROPOMI на тестовых участках

Вариации концентрации CH4 на тестовых участках (май-сентябрь 2018–2021 гг.) показаны на рис. 1. Отмечается тенденция роста метана на

обоих участках, при этом уровень концентрации CH4 на южном участке ниже, чем на северном. Наибольшие значения метана наблюдаются в конце теплого сезона, когда происходит наибольшая оттайка вечной мерзлоты и, соответственно, возрастает эмиссия метана из почвы.

Для исследования вариаций метана над гарями были выбраны две крупные обособленные гари 2018 г. и соответствующие им фоновые участки, не подвергавшиеся пирогенной активности за последние 10 лет. На рис. 2 представлены графики CH4 для гарей 2018 г. (красные маркеры) и фоновых участков (синие маркеры). Как следует из рис. 2, *а*, значения содержания метана над фоновым участком и гарью № 1 в мае-июне 2018 г. не отличаются. Лесной пожар на месте «будущей» гари длился с 1 июля и до конца месяца. С началом пожара значения метана над гарью резко увеличиваются, существенно превышая фоновые значения; разница сохраняется в течение всего периода исследований. Аналогичная картина наблюдается и на участке № 2 (рис. 2, *б*), где пожар произошел в августе 2018 г.

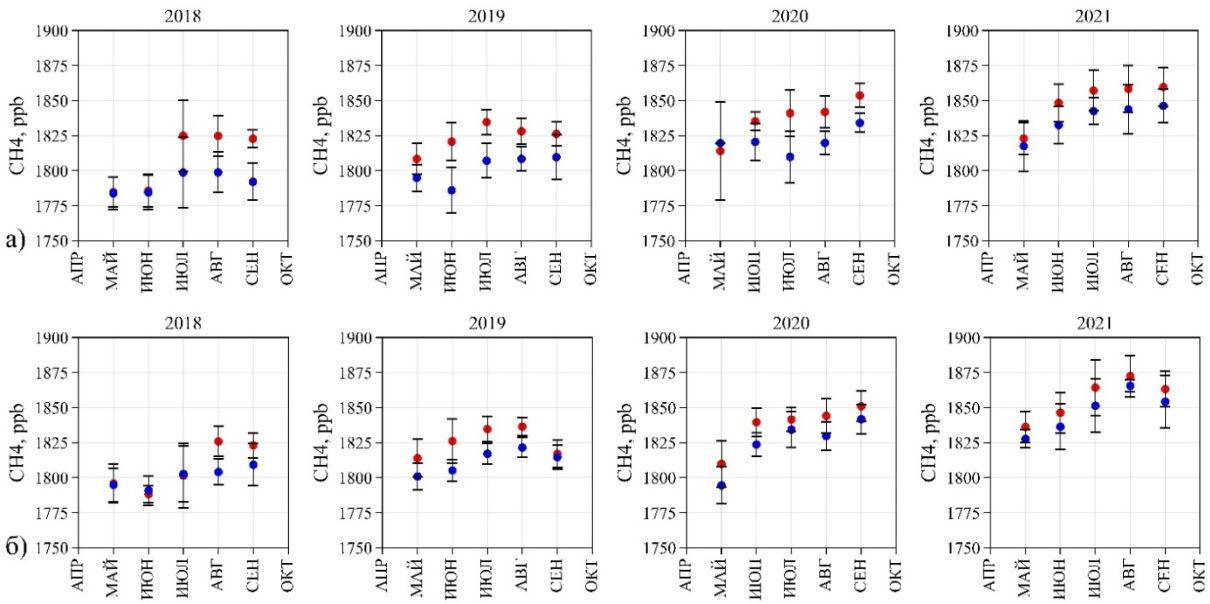


Рис. 2. Концентрация метана по данным TROPOMI на участках гарей (2018 г.) и фона: *а*) верхняя панель участок гари № 1; *б*) нижняя панель участок гари № 2 (красные маркеры – концентрация над гарью, синие – концентрация над фоном)

Выводы. В целом, на выбранных тестовых участках и крупных гарях с 2018 по 2021 гг. наблюдается тенденция к росту концентрации метана.

На месте гарей наблюдается повышенное содержание метана по сравнению с соответствующими фоновыми участками. Эта разница сохраняется на протяжении всего исследуемого временного периода.

Наибольшие значения метана регистрируются в конце теплого периода май-сентябрь, когда происходит наибольшая оттайка вечномерзлых грунтов и, соответственно, выход метана из почвы увеличивается.

На северном фоновом участке содержание атмосферного метана выше, чем на расположенном южнее.

Список литературы

1. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press. 1995. 572 p.

2. Пачаури Р. К., Райзингер А. и основная группа авторов (ред.) МГЭИК: Изменение климата: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата // МГЭИК, Женева, Швейцария. 2007. 104 с.

3. Zimov S. A., Schuur E. A. G., Chapin F. S. Permafrost and the global carbon budget // Science. 2006. Vol. 312. Issue 5780. P. 1612–1613. DOI: 10.1126/science.1128908

4. Schuur E. A. G., McGuire A. D. & Schädel C. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. Vol. 530. P. 171–179.

5. Yakushev V. S. & Chuvilin E. M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia // Cold Region Science Technology. 2000. Vol. 31. P. 189–197.

6. Rivkina E., Shcherbakova V., Laurinavichius K., Petrovskaya L., Krivushin K., Kraev G., Pecheritsina S., Gilichinsky D. Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in permafrost // FEMS Microbiology Ecology. 2007. Vol. 61. Issue 1. P. 1–15. https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00315.x

7 Панов А. В., Прокушкин А. С., Брюханов А. В., Корец М. А., Пономарев Е. И., Сиденко Н. В., Зражевская Г. К., Тимохина А. В., Андреа М. Комплексный подход в оценке эмиссии углеродосодержащих газов от лесных пожаров в Сибири // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 30–38.

8. Tomshin O, Solovyev V. Spatio-temporal patterns of wildfires in Siberia during 2001–2020 // Geocarto International. 19 p. doi:10.1080/10106049.2021.1973581.

9. Gibson C. M., Chasmer L. E., Thompson D. K., Quinton W. L., Flannigan M. D., David Olefeldt. Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands // Nature Communications. 2018. Vol. 9. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1

10. Knorre A. A., Kirdyanov A. V., Prokushkin A. S., Krusic P. J., Büntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 652. P. 314–319. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.124

11. Petrov M. I., Fedorov A. N., Konstantinov P. Y., Argunov R. N. Variability of Permafrost and Landscape Conditions Following Forest Fires in the Central Yakutian Taiga Zone // Land. 2022. Vol. 11. Issue 4. https://doi.org/10.3390/land11040496

12. Veefkind J. P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H. J., de Haan J. F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., and Levelt P. F. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications // Remote Sensing Environment. 2011. Vol. 120. P. 70–83. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027, 2012

13. Giglio L., Loboda T., Roy D. P., Quayle B., and Justice C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. P. 408–420. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.006

V. S. Starodubtsev, V. S. Solovyev, S. A. Vasilieva
Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia
e-mail: tomskaya@ikfia.ysn.ru

PRELIMINARY RESULTS OF THE STUDY OF ATMOSPHERIC METHANE VARIATIONS IN YAKUTIA ACCORDING TO SENTINEL-5P SATELLITE DATA

The preliminary results of the study of atmospheric methane variations in Yakutia according to the data of the Sentinel-5P satellite (2018-2021) are presented. A density map of coverage over the territory of Yakutia by the data of the TROPOMI spectrometer was built. Based on it, and data on forest burns of the MODIS instrument, two test sites untouched by forest fires over the past decade, as well as two isolated burnt areas and background sites for them, were selected. A preliminary analysis of atmospheric methane variations in the studied areas for the period May-September 2018-2021 was carried out. In test areas and burnt areas, the highest methane values are recorded at the end of the warm season, when the greatest thawing of permafrost occurs. The values of methane over the burnt areas are increased compared to the corresponding undisturbed (background) areas, which is due to forest fires. Interannual variations in methane over the period under study show a certain trend towards an increase in the content of methane in the atmosphere.

Key words: remote sensing, TROPOMI, MODIS, methane, forest fires, permafrost.

УДК 528.88-631.559

А. С. Степанов[1], К. Н. Дубровин[2], Л. В. Илларионова[3], Е. А. Фомина[2]

[1]Доктор фармацевтических наук, ДВ НИИСХ, Хабаровск, Россия
[2]Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
[3]Кандидат физико-математических наук, Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
e-mail: stepanfx@mail.ru, nob_keeper_93@mail.ru, illarionova_l@list.ru, eliz37@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ

Аннотация. Для реализации стратегии развития АПК в южной части российского Дальнего Востока необходимо обеспечить использование цифровых технологий, в частности, в области планирования пахотных площадей, идентификации и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. В статье рассмотрены вопросы применения данных дистанционного зондирования Земли для проведения автоматизированной классификации пахотных земель, в том числе использование оптического (NDVI) и радарного (DpRVI) вегетационных индексов. Установлено, что общая точность классификации на уровне полей Хабаровского района превысила 93 %. Проведены исследования по аппроксимации временных рядов сезонного хода NDVI и DpRVI с использованием ряда Фурье, двойной логистической функции, функции Гаусса. Средняя ошибка аппроксимации находилась в пределах от 8 до 10 % для DpRVI и 10–12 % для NDVI. Для раннего прогнозирования урожайности сельхозкультур также было предложено использовать аппроксимирующие функции. Для некоторых муниципальных образований юга Дальнего Востока были построены модели прогнозирования урожайности сои. Средняя ошибка прогнозирования, начиная с 29 календарной недели, не превышала 12 %.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, урожайность, прогноз, аппроксимация, идентификация

Введение. Южная часть российского Дальнего Востока является одним из перспективных регионов Российской Федерации по производству сельскохозяйственной продукции, в частности, зернобобовых и яровых зерновых культур. В соответствии со стратегией социально-экономического развития Дальнего Востока планируется не только увеличить объем производства, но и повысить в нем роль экспортной составляющей. Вместе с тем, для реализации этой программы в дальневосточных регионах необходимо обеспечить контроль за севооборотом на отдельных полях с автоматизированной идентификацией произрастающих культур, а также осуществлять оперативный прогноз урожайности по мере вегетационного цикла. На современном этапе для этого обычно используются современные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. В последнее время реализованы

© Степанов А. С., Дубровин К. Н., Илларионова Л. В., Фомина Е. А., 2022

системы автоматического классифицирования пахотных земель, обладающие достаточной точностью для определенных субъектов РФ [1]. В то же время для южной части Дальнего Востока, в частности, для Хабаровского края и Еврейской Автономной области, на текущий момент отсутствуют структурированные данные по посевным площадям для отдельных видов сельскохозяйственных культур, что делает невозможным как осуществление оперативного контроля за севооборотом, так и прогнозирование урожайности на региональном или муниципальном уровне по маске отдельной культуры.

Для прогнозирования урожайности сельхозкультур чаще всего используются регрессионные модели, где в качестве одного из независимых предикторов модели рассматривается максимальное сезонное значение вегетационного индекса, например NDVI, LAI и т. д. [2, 3].

В основу методики идентификации культур, и, соответственно, последующего классифицирования пахотных земель обычно заложен сезонный ход вегетационных индексов, для чего проводится анализ серии оптических или радарных изображений [4, 5].

Таким образом, во-первых, является актуальным изучение возможности использования для классификации пахотных земель юга Дальнего Востока наряду с оптическими также и современного радарного индекса DpRVI, что позволит избежать ряда проблем, связанных с облачностью. Во-вторых, для решения этой проблемы необходимо рассмотреть способы подготовки временных рядов вегетационных индексов на основе аппроксимации разными функциями. В-третьих, оценить возможность прогнозирования урожайности сои, являющейся приоритетной культурой Дальнего Востока, на муниципальном уровне.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования рассматривались пахотные земли Хабаровского края и Еврейской автономной области. Для расчета значений индексов NDVI и DpRVI использовались оптические и радарные снимки, полученные со спутников Sentinel-1 и Sentinel-2. Идентификация культур, а также оценка точности классификации с использованием машинного обучения проводилась для опытных полей ДВ НИИСХ, локализованных в Хабаровском районе. Для прогнозирования урожайности отдельных культур на уровне муниципальных образований применялись еженедельные композиты NDVI (спектрорадиометр MODIS Terra). Графики сезонного хода вегетационных индексов для сельскохозяйственных культур были построены с использованием разных аппроксимирующих функций: Гаусса, двойной логистической, квадратного и кубического полиномов, ряда Фурье. Прогнозирование урожайности сои проводилось с применением регрессионной модели с двумя независимыми переменными – максимумом NDVI и кол-вом дней со средней температурой, превышающей 10° [6]. Была проведена сравнительная оценка точности раннего прогнозирования урожайности сои для муниципальных образований юга Дальнего Востока с использованием функции Гаусса и двойной логистической функции.

Результаты исследования. В период 2017–2021 гг. были построены графики сезонного хода NDVI и DpRVI для сои, овса, гречихи, а также многолетних трав. Было установлено, что кривые NDVI и DpRVI имеют характерный вид для основных сельскохозяйственных культур южной части Дальнего Востока и могут быть использованы для идентификации и последующего классифицирования пахотных земель. Оценка точности проведенной классификации методами машинного обучения для опытных полей ДВ НИИСХ представлена в табл. 1.

Таблица 1

Оценка точности классификации с использованием индексов NDVI и DpRVI

Вегетационный индекс	Общая точность на уровне пикселей, %	F1-метрика, для сои	Точность на уровне полей, %
NDVI	94,0	0,97	95,3
DpRVI	86,2	0,90	93,5

В табл. 2 приведена средняя ошибка аппроксимации временных рядов NDVI и DpRVI в 2021 г. Как видно, ошибка аппроксимации не превышала 10 % для DpRVI, и 12,1 % для NDVI.

Таблица 2

Средняя ошибка аппроксимации (MAPE, %) временных рядов NDVI и DpRVI для разных функций

Вегетационный индекс	Функция Гаусса	Двойная логистическая функция	Ряд Фурье
NDVI	12,10±1,78	10,92±3,50	10,80±2,01
DpRVI	8,40±2,86	9,78±2,52	9,25±2,63

Вместе с тем, для раннего прогнозирования максимума NDVI и построения регрессионных моделей использовались гауссиана и двойная логистическая функция. Точность прогноза урожайности находилась в зависимости от известных на момент прогноза значений временного ряда NDVI: средняя ошибка прогнозирования при достижении максимума (31–33 календарная неделя) составляла 5–7 %, ошибка прогнозирования в 29–31 календарную неделю не превышала 12 %.

Заключение. В целом, проведенные исследования продемонстрировали возможность использования NDVI и DpRVI для идентификации культур и последующей автоматизированной классификации с достаточно высоким уровнем точности. Для подготовки исходных значений вегетационных индексов было предложено использовать аппроксимирующие функции. Разработанные подходы по прогнозированию урожайности, выполненные в ряде муниципальных образований Дальнего Востока, а также подход к проведению классификации пахотных земель могут быть применены в большинстве субъектов ДФО.

Список литературы

1. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Барталев С. А., Лупян Е. А. Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 112–127.
2. Berger A., Ettlin G., Quincke C., Rodríguez-Bocca P. Predicting the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) by training a crop growth model with historical data // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 161. P. 305–311.
3. Breunig F. M., Galvao L., Formaggio A., Epiphanio J. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011. Vol. 13. P. 34–42.
4. Robertson L., et al. C-band synthetic aperture radar (SAR) imagery for the classification of diverse cropping systems // International Journal of Remote Sensing. 2020. Vol. 41(24). P. 9628–9649.
5. Zhang H., Kang J., Xu X., & Zhang L. Accessing the temporal and spectral features in crop type mapping using multi-temporal Sentinel-2 imagery: A case study of Yi'an County, Heilongjiang province, China // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 176. P. 105618.
6. Stepanov A., Dubrovin K., Sorokin A., Aseeva T. Predicting Soybean Yield at the Regional Scale Using Remote Sensing and Climatic Data // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. P. 12121936.

A. S. Stepanov[1], K. N. Dubrovin[2], L. V. Illarionova[2], E. A. Fomina[2]

[1]FEARI, Khabarovsk, Russia
[2]Computing Center FEB RAS, Khabarovsk, Russia
e-mail: stepanfx@mail.ru, nob_keeper_93@mail.ru, illarionova_l@list.ru, eliz37@mail.ru

REMOTE SENSING APPLICATION IN SOLVING PROBLEMS OF IDENTIFICATION AND FORECASTING OF CROP YIELD IN THE FAR EAST

In order to implement the agribusiness development strategy in the southern part of the Russian Far East, it is necessary to ensure the use of digital technologies, in particular in the field of planning of arable areas, identification and forecasting of crop yields. The article discusses the application of remote sensing data for the automated classification of arable land, including the use of optical (NDVI) and radar (DpRVI) vegetation indices. It was found that the overall classification accuracy at the field level of the Khabarovsk region exceeded 93%. Studies have been carried out on the approximation of the time series of the seasonal course of NDVI and DpRVI using the Fourier series, the double logistic function, and the Gauss function. The average approximation error was in the range from 8 to 10 % for DpRVI and 10–12 % for NDVI. It was also proposed to use approximating functions for early forecasting of crop yields. For a number of municipalities in the south of the Far East, models were built to predict soybean yields. The average forecasting error, starting from the 29th calendar week, did not exceed 12 %.

Keywords: remote sensing, yield, forecast, approximation, identification.

УДК 504.064.37

М. И. Таранюк[1], Ю. П. Мыльников[2], И. А. Полежайкин[2]

[1]Кандидат географических наук, АО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия
[2]АО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия
e-mail: TaranyukMI@tomsknipi.ru, MylnikovYP@tomsknipi.ru, PolezhaykinIA@tomsknipi.ru

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ В ПРОЦЕССЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. В работе тезисно представлен опыт применения материалов космической съемки для экологического сопровождения предприятий нефтегазодобычи. Показано применение геопространственных данных для подготовки экологической документации на разных стадиях освоения месторождений. На этапе предпроектной проработки использование материалов космической съемки позволяет получить качественную и количественную информацию о состоянии окружающей природной среды, для оптимизации хозяйственной деятельности. Применение ДДЗ при проведении мониторинга ландшафтов позволяет выявить изменения антропогенной нагрузки, отследить динамику площадей антропогенных изменений, и степень изменения природных комплексов. Использование космических снимков для паспортизации/инвентаризации загрязненных участков способствует формированию актуализированного реестра загрязненных земель и последующей разработке планов производства работ по рекультивации загрязненных земельных участков.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), дешифрирование, компоненты природной среды, антропогенное воздействие.

Экологическое сопровождение инвестиционно-строительных проектов – это система процедур, направленных на обеспечение экологической безопасности в районе строительства проектируемого объекта, охрану природной среды и здоровья человека от вредных воздействий работающего предприятия [1].

Применение геоинформационных технологий в природопользовании позволяет получать оперативную и актуальную информацию о состоянии компонентов природной среды, определять характер происходящих изменений. Источником объективной информации являются материалы дистанционного зондирования, с учетом которых проводится экологическое картографирование. В докладе представлен накопленный опыт работы управления экологии АО «ТомскНИПИнефть» в части применении геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) для решения задач экологического сопровождения предприятий-природопользователей.

За продолжительный период работ сформировался значительный объем геопространственных данных различного формата, который

© Таранюк М. И., Мыльников Ю. П., Полежайкин И. А., 2022

активно используется для подготовки экологической документации на разных стадиях освоения месторождений. Геопространственные данные (синоним**:** Географические данные, геоданные, геопространственные данные) – это цифровые данные о пространственных объектах, включающие сведения об их местоположении и свойствах, пространственных и непространственных атрибутах [2]. База геоданных включает в себя топографические и тематические геоданные по объектам и месторождениям, материалы проектно-изыскательских работ (ПИР), данные космо-аэрофотосъемки.

Для предпроектной проработки активно применяются имеющиеся материалы съемок с различных космических аппаратов для рассмотрения предлагаемого размещения проектируемых объектов с целью получения качественной и количественной информации о состоянии, составе, структуре природных процессов и объектов рассматриваемой территории, для оптимизации хозяйственной деятельности с учетом полученной информации. Особенно важно это для месторождений Крайнего Севера, где нередко отсутствует актуальная топографическая информация. На этом этапе проводится анализ с учетом имеющихся космических снимков, картографических материалов, результатов инженерных изысканий на смежную территорию. Значительное внимание уделяется выявлению водных объектов, отсутствующих на топографических картах, во исключение размещения в них проектируемых объектов. В этом случае рассматривается вариант смещения месторасположения проектируемого объекта. Выявление водных объектов проводится с учетом спектральных характеристик и структуры рисунка изображения.

Экологическое сопровождение действующих предприятий также опирается на накопленный объем информации об особенностях спектральных характеристик подстилающей поверхности, типичных для региона деятельности недропользователя. Некоторые результаты долгосрочного сотрудничества по территории Западной Сибири получили свое отражение в серии публикаций «Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений» [3].

Для подготовки и проведения работ по паспортизации, инвентаризация и разработки планов производства работ по рекультивации загрязненных земельных участков используется сочетание визуального и автоматизированного дешифрирования материалов космической съемки. Использование полученных результатов полевых и лабораторных работ за несколько предыдущих сезонов, позволили сократить время, затрачиваемое на предварительную обработку, благодаря исключению необходимости повторных этапов классификации. Также применение космических снимков позволяет эффективно планировать логистику техники и оборудования на этапе подготовки и проведения полевых работ, особенно с учетом плохой проходимости территории. Результаты работ по выявлению загрязненных участков на основе ДДЗ и эталонных участков по

материалам полевых работ, используются для формирования актуализированного реестра загрязненных земель.

Работы по мониторингу ландшафтов проводятся для наблюдения за изменением состояния природных комплексов. Для этого используются материалы спектрозональной космической съемки высокого разрешения. Совместный анализ материалов, полученных на этапе определения исходной загрязненности компонентов природной среды лицензионного участка и данных актуальной космической съемки, результатов полевого обследования позволяют выявить изменения антропогенной нагрузки, динамику площадей антропогенных изменений, и степень изменения природных комплексов.

Таким образом, для каждого вида работ подбираются соответствующие материалы с необходимым пространственным, временным разрешением, комбинацией спектральных каналов для оптимального решения возникающих задач в процессе экологического сопровождения. Опыт дешифрирования, основывающийся в т. ч. на балансе интуиции и здравого смысла, и умении видеть, понимать и сопоставлять отмечаемые природные и антропогенные объекты и явления, формируется на стыке науки и искусства. Как отмечает Ю. М. Лотман, «Наука и искусство – это как бы два глаза человеческой культуры. Именно их различие (и равноправие) создают объёмность нашего знания. … Искусство – форма мышления, без которого человеческого сознания не существует, как не существует сознания с одним полушарием» [4]. В связи с чем представляется очень важным в своей работе дополнительно опираться на те знания и информацию, которые проявляются в процессе работы данной конференции, в части обсуждения проблематики построения и развития региональных систем дистанционного зондирования Земли из космоса и их роли в решении социально-экономических задач регионов. Соответственно, применение современных моделей и методов обработки ДДЗ позволяет получать качественную информацию о состоянии окружающей природной среды, использовать ее для учета и анализа изменений под воздействием природных и антропогенных факторов на территории лицензионных участков недр, для выполнения работ, связанных с обеспечением требований природоохранного законодательства предприятий-природопользователей в период разработки, освоения, эксплуатации и ликвидации месторождений нефти и газа.

Список литературы

1. Рекомендации по экологическому сопровождению инвестиционно-строительных проектов. М.: ГП «ЦЕНТРИНВЕСТпроект», 1998.

2. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. Электронный ресурс. http://www.gisa.ru/13589.html

3. Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений. Вып. 3. Современные методы изучения болотных систем. Регламентирование деятельности недропользователей в условиях Западной Сибири: аналит. обзор /

А. Г. Гендрин, Г. Г. Румянцева, В. П. Колмогоров, Ю. П. Мыльников, Е. С. Русинова, М. П. Щеголихина, С. В. Квашнина, У. В. Курганская ; Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, ТомскНИПИнефть ВНК. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2007. 111 с., ил. + вкл. табл. (Сер. Экология. Вып. 84).

4. Лотман Ю. М. О природе искусства. Электронный ресурс. https://www.artcontext.info/articles-about-art/349-lotman-iskusstvo.html

M. I. Taranyuk, Y. P. Mylnikov, I. A. Polezhaykin

JSC TomskNIPIneft, Tomsk, Russia
e-mail: TaranyukMI@tomsknipi.ru, MylnikovYP@tomsknipi.ru,
PolezhaykinIA@tomsknipi.ru

EXPERIENCE OF USING SPACE SURVEY MATERIALS IN THE PROCESS OF ENVIRONMENTAL SUPPORT OF OIL AND GAS PRODUCING ENTERPRISES

The paper presents the experience of using space survey materials for environmental support of oil and gas production enterprises. The application of geospatial data for the preparation of environmental documentation at different stages of field development is shown. At the stage of pre-design study, the use of satellite imagery materials allows us to obtain qualitative and quantitative information about the state of the environment to optimize economic activity. The use of DDZ when monitoring landscapes allows you to identify changes in anthropogenic load, track the dynamics of the areas of anthropogenic changes, and the degree of change in natural complexes. The use of satellite images for certification / inventory of contaminated sites contributes to the formation of an updated register of contaminated lands, and the subsequent development of plans for the reclamation of contaminated land.

Keywords: Earth Remote Sensing (ERS), image analysis and interpretation, components of the natural environment, anthropogenic impact.

УДК 551.584.2

А. С. Томашова[1,2], И. В. Кужевская[1]

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
[2]Институт мониторинга климатических и экологических систем, Томск
e-mail: nt.tom00@gmail.com, ivk@ggf.tsu.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ LANDSAT-8 ДЛЯ ОЦЕНКИ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ХАКАСИИ

Аннотация. Предметом исследования послужила температура подстилающей поверхности (*LST*), рассчитанная с помощью 10-го спектрального канала спутника Landsat-8. В работе проводится сравнение температуры оголенного участка почвы по наземным данным и данным с космического аппарата (КА). Температура оголенного участка почвы на 16 °С больше температуры, полученной на основе спутниковых данных. Полученная зависимость между двумя видами данных описывается линейной функцией с коэффициентом детерминации 65 %. Полученные результаты могут быть использованы в оценке агрометеорологических условий для сельскохозяйственных земель степной зоны Хакасии.

Ключевые слова: спутниковые данные, температура поверхности почвы, LST.

Введение. Оценка агрометеорологических условий на основе информации, полученной только от наземных источников, не может быть полностью объективной и актуальной. Применение спутниковых данных позволяет расширить возможность такой оценки на больших площадях [1]. К настоящему времени, большое количество космических аппаратов (КА) позволяют получать информацию для таких оценок. На основе этих данных к настоящему времени возможно изучение свойств почв (органический состав, влагозапас, динамика опустынивания и деградации), возможно проводить мониторинг сезонных изменений сельскохозяйственных культур, составлять прогнозы урожайности, оценивать агроклиматические условия. На основе спектральной отражательной способности растительности в зависимости от ее состояния уже созданы более 160 индексов, большинство их которых используются для идентификации типа и состояния растительности. Они основываются на двух наиболее стабильных участках кривой спектральной отражательной способности растений: 0,62 и 0,75 мкм (максимум поглощение хлорофиллом солнечной радиации), 0,75 и 1,3 мкм (максимальное отражение энергии клеточной структуры листа), т. е. индексы основаны на красной и инфракрасной зонах спектра, реже – средней инфракрасной зоне. Кроме того, для агрометеорологической оценки можно использовать температуру поверхности земли (Land surface temperature, *LST*), которая может выступить аналогом температуры почвы.

© Томашова А. С., Кужевская И. В., 2022

Расчет *LST* получают со спутников в каналах теплового инфракрасного диапазона.

Целью работы являлось проведение сопоставления данных о температуре почвы, полученных различными инструментами.

Областью исследования послужила территория Хакасии. Данные привязывались к координатам 13 метеорологических станций, расположенных на территории республики. Были отобраны 13 дат (апрель–май 2014–2019 гг.), из которых отобрано 50 случаев, когда процент облачности не превышал 10 %.

Площадь земельного фонда Республики Хакасии составляет более 6 млн га, из которых 1,8 млн га составляют земельные участки сельхозназначения, из которых общая посевная площадь на 2021 г. составила около 225 тысяч га. В последние годы средняя урожайность зерновых и зернобобовых культур составляет 19–22 ц/га. Площадь посевных земель составляет менее 1 % от всех посевных площадей страны, однако территория республики имеет огромный потенциал благодаря большим запасам чернозёма.

Материалы и методы. Материалами послужили данные с американского спутника дистанционного зондирования земли Landsat-8, взятые с сайта геологической службы USGS [2]. Изображения Landsat-8 имеют 15-метровое панхроматическое и 30-метровое мультиспектральное пространственное разрешение на участке протяженностью 185 км [3].

В работе рассчитывался параметр *LST* на основе данных 10-го спектрального канала спутника Landsat-8, и в качестве данных с метеорологических станций была взята максимальная температура поверхности почвы ($T_п$ *max*). Известно, что в большинстве случаев $T_п$ *max* фиксируются в срок, приближенный к 13 часам местного времени. Пролеты КА Landsat-8 над территорией исследования приходятся на время 04.30 и 06.00 UTC, что соответствует для республики 11.30 и 13 часам местного времени.

Расчет данных о температуре подстилающей поверхности (*LST*) производился по следующим формулам:

$$LST = \frac{BT}{1+\left(\frac{\lambda BT}{p}\right)ln\varepsilon}, \quad (1)$$

где *LST* – температура подстилающей поверхности; *BT* – яркостная температура; λ – эффективная длина волны (10,9 мкм для 10 канала КА Landsat-8); ε – излучательная способность земной поверхности; p – излучательная постоянная, которая находится по формуле:

$$p = h\frac{c}{\sigma}, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка ($6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); c – скорость света в вакууме (3·108 м/с); σ – постоянная Больцмана ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К) [4].

Подробная методика расчетов представлена в работе [5].

Результаты. В работе рассмотрено применение данных спутника для расчета поверхностной температуры (*LST*). Установлено, что значения *LST* соответствует температуре почвы в выбранных координатах метеорологических станций. Температуры почвы является один из самых важных факторов в жизнедеятельности растений и почвенных организмов. Давно известно, что температура почвы является ключевым параметром в развитии корневой системы, оказывает влияние на активность почвенных микроорганизмов и усвоение фосфатов и нитратов растениями из почвы.

При сравнении *LST*, рассчитанных на основе данных 10-го спектрального канала КА Landsat-8 и температур поверхности почвы, взятых с метеорологических станций, было выявлено, что разность этих параметров составляет около 16 °С. Это значение отражает физическую зависимость различий оголенной и неоголенной подстилающих поверхностей почвы. В табл. приведены статистические характеристики *LST*, $T_п$ *max* и их разности.

Таблица

Статистические характеристики *LST*, $T_п$ *max* и их разности

		Значение *LST*, °С	$T_п$ *max*, °С	Разность *LST* и $T_п$ *max*, °С
Квартиль, %	25	17,3	30,0	–19,4
	50	19,3	36,5	–15,3
	75	23,6	45,0	–12,8
Коэффициент вариации C_v		0,37	0,25	0,33

Различия между верхним и нижним квартилем значений *LST* составляют 6,3 °С, $T_п$ *max* – 15 °С, при коэффициентах вариации меньше 0,4. Среднеквадратическая ошибка (*RMSE*) для выборки (разность *LST* и $T_п$ *max*) составила 17,1. Была проведена стандартизация выборок, они имеют нормальное распределение. Это позволяет построить уравнение регрессии, которое представлено на рис.

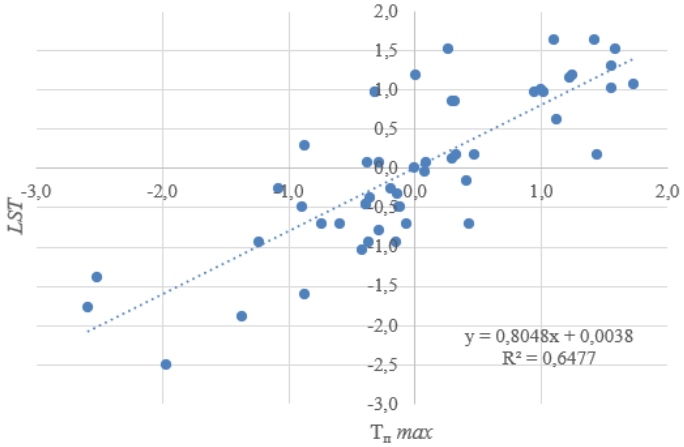


Рис. Регрессионная зависимость стандартизованных значений *LST* и $T_п$ *max*

Значения *LST* и $T_п$ *max* имеют достаточно плотную зависимость, для 50 выбранных случаев она описывается линейной функцией. Коэффициент детерминации этой зависимости около 65 % (на 65 % дисперсии этих выборок совпадают). Однако при дальнейшем увеличении выборки зависимость может измениться на экспоненциальную, а также будет возможно найти поправочные коэффициенты для различных типов подстилающей поверхности, которые позволят восстанавливать температуру подстилающей поверхности по спутниковым данным.

Заключение. В результате сопоставления данных о температуре почвы, полученных различными инструментами, между температурой оголенного участка почвы по наземным данным и данным с космического аппарата выявлена зависимость с теснотой связи 80 %. На момент проведения исследования, диапазон разностей температуры почвы по данным спутника и максимальной температуры оголенного участка почвы на метеорологической станции составил от –19,4 до –12,8 °С.

Список литературы

1. Грингоф И. Г., Павлова В. Н. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 3. Основы сельскохозяйственной метеорологии: учеб. пособие. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2013. 384 с.

2. USGS [Электронный ресурс]. URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8 (Дата обращения 01.04.2022).

3. Landsat 8 Overview [Электронный ресурс]. URL: https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview (Дата обращения 11.04.2022).

4. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data // Journal of sensor. 2016. Vol. 2016.

5. Газимов Т. Ф., Кужевская И. В. Оценка летнего поверхностного городского острова тепла города Новосибирск по данным Landsat 8 // Географический вестник. 2021. № 4 (59). С. 84–98.

A. S. Tomashova[1,2], I. V. Kuzhevskaia[1]

[1]National Research Tomsk State University, Tomsk
[2]Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Tomsk
e-mail: nt.tom00@gmail.com, ivk@ggf.tsu.ru

USING LANDSAT-8 DATA TO EVALUATE AGROMETEOROLOGICAL CONDITIONS IN THE STEPPE ZONE OF KHAKASSIA

The subject of the study was the underlying surface temperature (LST) calculated using the 10th spectral channel of the Landsat-8 satellite. This work compares the temperature of the bare soil area according to ground data and data from the spacecraft (SC). The temperature of the bare soil area is 16 °C higher than the temperature obtained from satellite data. The obtained dependence between the two types of data is described by a linear function with a determination coefficient of 65 %. The results obtained can be used in the assessment of agrometeorological conditions for agricultural lands in the steppe zone of Khakassia.

Keywords: satellite data, soil surface temperature, LST.

УДК 528.8 535

О. А. Томшин, В. С. Соловьев

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН,
г. Якутск, Россия
e-mail: tomshinoa@gmail.com, solovyev@ikfia.ysn.ru

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ В ЯКУТИИ В 2021 Г. И ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

Аннотация. В работе рассмотрена пространственно-временная динамика лесных пожаров и параметров атмосферы в Якутии в 2021 г. по результатам спутниковых наблюдений и данным реанализов. Показано, что возникновению и развитию катастрофических пожаров способствовали значительные положительные аномалии температуры воздуха и отрицательные аномалии осадков, наблюдавшиеся в летние месяцы и создавшие благоприятные условия для пожаров. Блокирующий антициклон, установившийся с конца июля до середины августа, привёл к интенсификации лесных пожаров, а также к стагнации воздушных масс и накоплению продуктов горения в атмосфере и препятствовал проникновению влагонасыщенных воздушных масс с западной части России.

Ключевые слова: лесные пожары, атмосферный аэрозоль, Якутия, перенос продуктов горения.

Введение. В последние десятилетия потепление климата приводит к формированию более благоприятных условий для возникновения и развития природных пожаров как в региональном, так и в глобальном масштабе [1, 2]. Якутия является одним из наиболее пожароопасных регионов в России. По данным ФБУ «Авиалесоохрана» итоговая площадь лесов, пройденная огнём в течение пожароопасного сезона 2021 г. в Якутии составила ~9.4 млн га [3].

В данной работе рассмотрена пространственно-временная динамика лесных пожаров и параметров атмосферы в Якутии в 2021 г. по результатам спутниковых наблюдений и данным реанализов.

Данные и методика. Для исследований был выбран регион центральной Якутии (60–67° с.ш., 110–140° в.д.), на который пришлось подавляющее большинство лесных пожаров в 2021 г.

Для анализа пожарной активности использованы данные спектрорадиометра MODIS (продукт MOD14A1 C6.1) [4], установленного на спутнике Terra. Продукт MOD14A1 C6.1 содержит ежедневные сведения об очагах активного горения («термоточках»), обнаруженных на космоснимках с пространственным разрешением 1 км.

Вариации среднесуточных и среднемесячных значений аномалий температуры приземного воздуха (ΔT) и давления на уровне моря (ΔSLP) получены из NCEP-DOE реанализа [5], пространственное разрешение

© Томшин О. А., Соловьев В. С., 2022

данных 2.5°. Аналогичные значения по количеству осадков получены из данных GPCC [6], пространственное разрешение данных 1.0°. Аномалии рассчитывались как отклонения значений от среднемноголетних, рассчитанных за период 1980–2010 гг. для данных NCEP-DOE реанализа и 1951–2000 гг. для данных GPCC.

Для оценки вариаций аэрозольной оптической толщины (AOT 500 нм) и аэрозольного индекса (АИ) использованы данные приборов MODIS (продукт MOD08D3 AOD DTDB C6.1, ИСЗ Terra) [7], OMI (продукт OMTO3d, ИСЗ Aura) [8] и OMPS (продукт NMMIEAI L2, ИСЗ NPP) [9], пространственное разрешение данных 1°.

Результаты. Развитию катастрофических лесных пожаров в центральной Якутии в 2021 г. способствовали значительные отрицательные аномалии количества осадков (рис. 1, *е*), наблюдавшиеся с начала мая до середины августа (в среднем –9.5 мм/мес.) и положительные аномалии температуры (рис. 1, *д*), наблюдавшиеся в августе (+2.4 °С).

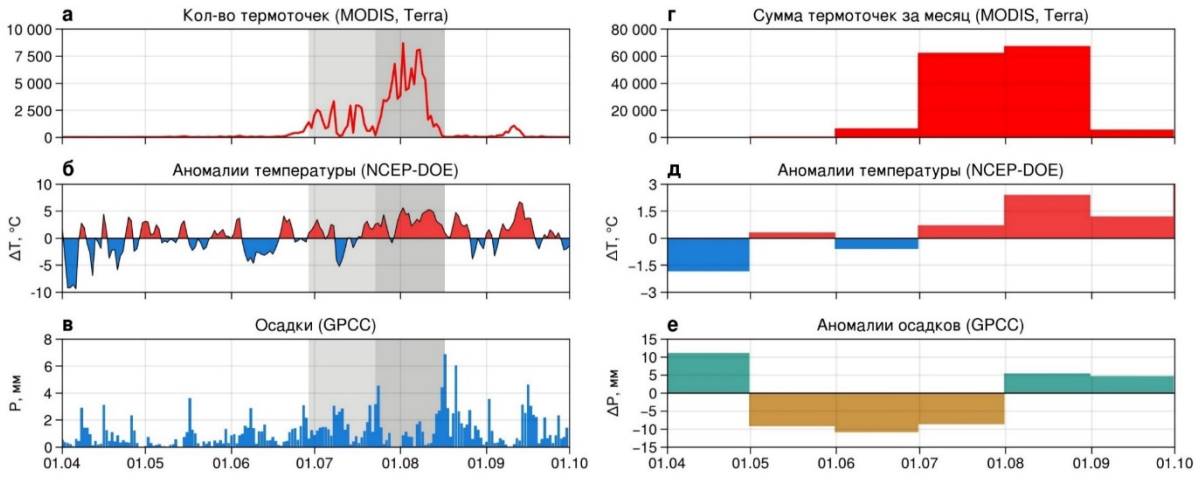


Рис. 1. Лесопожарная обстановка в Якутии в 2021 г.: *а*, *г* – суточное и месячное количество зарегистрированных термоточек; *б*, *д* – среднесуточные и среднемесячные аномалии температуры приземного воздуха; *в*, *е* – суточное количество осадков и их месячные аномалии. Серыми участками на графиках (*а*–*в*) отмечены периоды интенсификации лесных пожаров

Можно выделить два периода интенсификации лесных пожаров (рис. 1, *а*): первый – с конца июня до середины второй половины июля и второй, основной, с конца июля до середины августа. Известно, что антициклонические процессы оказывают значительное влияние на динамику лесопожарной обстановки [например, 10]. Основной период интенсификации лесных пожаров в 2021 г. пришёлся на период сильного атмосферного блокирования, что хорошо видно по аномалиям давления на уровне моря (рис. 2, *ж*). В этот период над исследуемым участком установилась безоблачная погода (рис. 2, *а*) и наблюдались значительные положительные аномалии температуры (рис. 2, *з*), в отдельные дни превышавшие среднемноголетние значения на 5 °С.

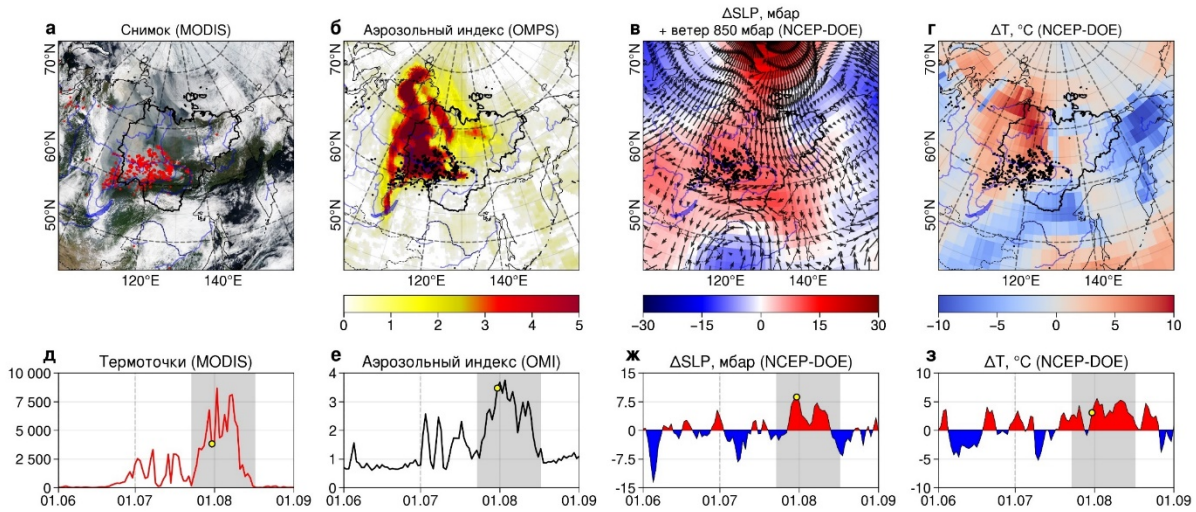


Рис. 2. *а* – Мозаика снимков MODIS; *б* – пространственное распределение АИ по данным OMPS; *в* – пространственное распределение ΔSLP и поле ветров на уровне 850 мбар; *г* – пространственное распределение ΔT; *д* – вариации количества зарегистрированных термоточек; *е* – вариации среднесуточных значений АИ по данным OMI; *ж* – вариации среднесуточных значений ΔSLP; з – вариации среднесуточных значений ΔT. Карты (*а–г*) отражают данные за 31 июля 2021 г. На графиках (*д–з*) серой областью отмечен период сильной интенсификации лесных пожаров, жёлтыми точками отмечены значения за 31 июля 2021 г.

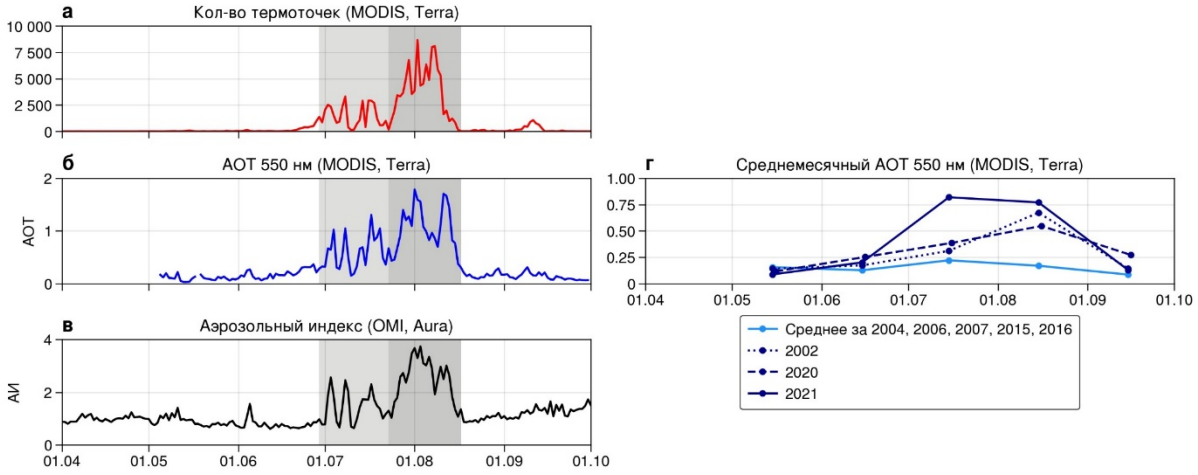


Рис. 3. *а* – вариации количества зарегистрированных термоточек; *б* – вариации среднесуточных значений AOT; *в* – вариации среднесуточных значений АИ; *г* – вариации среднемесячных значений AOT. Серыми участками на графиках (*а–в*) отмечены периоды интенсификации лесных пожаров

В результате лесных пожаров в атмосферу было выброшено огромное количество аэрозолей, что хорошо видно по вариациям AOT и АИ (рис. 3, *б*, *в*). В отдельные дни, среднесуточные значения AOT над отдельными участками региона достигали ~5. Пожароопасный сезон 2021 г. стал рекордным по среднемесячным значениям AOT, наблюдаемым в июле (~0.81) и августе (~0.77), превысив фоновые, невозмущённые значения в ~3–4 раза.

Заключение. Анализ пространственно-временной динамики лесных пожаров в Якутии в 2021 г. показал, что возникновению и развитию

катастрофических пожаров способствовали значительные положительные аномалии температуры воздуха и отрицательные аномалии осадков, наблюдавшиеся в летние месяцы и создавшие благоприятные условия для пожаров.

Блокирующий антициклон, установившийся с конца июля до середины августа, привёл к интенсификации лесных пожаров, а также к стагнации воздушных масс и накоплению продуктов горения в атмосфере и препятствовал проникновению влагонасыщенных воздушных масс с западной части России.

Среднемесячные значения АОТ по Центральной Якутии в 3–4 раза превышали фоновые показатели на фазе максимума активности лесных пожаров. В отдельные дни, среднесуточные значения АОТ над отдельными участками региона достигали ~5.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

Список литературы

1. Abatzoglou J. T., Williams A. P., Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. P. 326–336. doi: 10.1029/2018GL080959.

2. Tomshin O. A., Solovyev V. S. Spatio-temporal patterns of wildfires in Siberia during 2001–2020 // Geocarto International. 2021. doi: 10.1080/10106049.2021.1973581.

3. ФБУ «Авиалесоохрана». Сводный отчет о лесных пожарах (термических аномалиях) на всех видах территорий по данным космического мониторинга по состоянию на 31 декабря 2021 г. (нарастающим итогом с 01.01.2021) [Электронный ресурс]. URL: https://public.aviales.ru/main_pages/openform1.shtml?2021-12-31 (дата обращения 20.02.2022).

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

5. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bulletin of the American Meteorological Society. 2002. P. 1631–1643.

6. Schneider U., Ziese M., Meyer-Christoffer A., Finger P., Rustemeier E., Becker A. The new portfolio of global precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre suitable to assess and quantify the global water cycle and resources // Proc. IAHS. 2016. № 374. P. 29–34. doi: 10.5194/piahs-374-29-2016.

7. Platnick S. MODIS Atmosphere L3 Monthly Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA. 2015 [Электронный ресурс]. URL: http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD08_M3.006 (дата обращения 20.02.2022).

8. Pawan K. Bhartia. OMI/Aura TOMS-Like Ozone, Aerosol Index, Cloud Radiance Fraction L3 1 day 1 degree x 1 degree V3, NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3001 (дата обращения 20.02.2022).

9. Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS). NMMIEAI-L2-NRT product [Электронный ресурс]. URL: https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/download-nrt-data/omps-nrt (дата обращения 20.02.2022).

10. Hayasaka H., Yamazaki K., Naito D. Weather conditions and warm air masses during active fire periods in boreal forests // Polar Sci. 2019. Vol. 22. P. 100472.

O. A. Tomshin, V. S. Solovyev
Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia
e-mail: tomshinoa@gmail.com, solovyev@ikfia.ysn.ru

CATASTROPHIC FOREST FIRES IN YAKUTIA IN 2021 AND VARIATIONS OF ATMOSPHERIC PARAMETERS

The paper considers the spatio-temporal dynamics of forest fires and atmospheric parameters in Yakutia in 2021 according to satellite observations and reanalysis data. It is shown, that significant positive air temperature anomalies and negative precipitation anomalies observed during the summer months led to favorable conditions for fires and contributed to the occurrence and development of catastrophic fires. The blocking anticyclone, which lasted from late July to mid-August, intensified forest fires, stagnated air masses and accumulated combustion products in the atmosphere, and prevented the penetration of moisture-saturated air masses from western Russia.

Keywords: forest fires, atmospheric aerosols, Yakutia.

УДК 004.93'1

Р. К. Фёдоров[1], А. К. Попова[1], Ю. В. Авраменко[1]

[1]Кандидат технических наук, Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail: chudnenko@icc.ru

КЛАССИФИКАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. В работе рассматривается задача классификации мультиспектральных спутниковых изображений на примере территории Иркутской области. Обучающая выборка была размечена с помощью созданного Web-интерфейса на основе космоснимков Sentinel-2 и полевых исследований. На территории определены 12 классов с учетом особенностей ландшафта территории. Классификация спутниковых снимков проводилась с использованием сверточной нейронной сети ResNet-50. Точность полученных результатов показала, что такая классификация может применяться для решения актуальных задач экологического мониторинга территории – для анализа изменений лесного фонда, оценки влияния изменений климата на ландшафт, анализа динамики застройки, инвентаризации сельхозугодий и т. д.

Ключевые слова: данные ДЗЗ, нейронные сети, классификация спутниковых изображений, машинное обучение.

Информацию о типе земной поверхности используют для проведения мониторинга состояния окружающей среды, позволяющего отслеживать изменения природных ресурсов. Для автоматизированного картографирования больших территорий в современных исследованиях активно используют классификацию данных ДЗЗ с помощью методов машинного обучения. При этом высокую точность классификации спутниковых снимков показывают нейронные сети, которые позволяют учитывать специфику спектральных характеристик конкретной территории [1].

В современных исследованиях по оценке и прогнозированию состояния окружающей среды территорий [2, 3] активно используются мультиспектральные изображения со спутников Sentinel-2, которые имеют самое высокое разрешение из свободно распространяемых – 10 метров, что позволяет различать разные типы поверхности (вода, лес, дороги, здания), и отслеживать лесные пожары, вырубки. Съемка территорий спутниками Sentinel-2 проводится в среднем каждые 5 дней. Спутниковые снимки состоят из 12 спектральных каналов, четыре из которых с разрешением 10 метров, остальные – 20 и 60 метров. Для классификации все каналы снимков приведены к разрешению 10 метров.

Данные ДЗЗ любой территории имеют специфические спектральные и текстурные характеристики. Поэтому при мониторинге активно

© Фёдоров Р. К., Попова А. К., Авраменко Ю. В., 2022

применяются методы классического обучения с учителем, позволяющие учитывать эти характеристики. Эти методы позволяют для каждого пикселя спутникового изображения определить его класс – растительность, открытая почва, вода, антропогенные объекты и т. д.

Для проведения классификации спутниковых снимков была подготовлена обучающая выборка. Сначала был определен набор классов, решающих следующие задачи:

• классифицировать всю исследуемую территорию с максимально возможной точностью;

• определить классы, наиболее полезные для решения практических задач.

Природные особенности ландшафтов Байкальской природной территории обусловили состав обучающей выборки [4]. Построение обучающей выборки проводилось с помощью Web-интерфейса на основе данных Sentinel-2 и полевых исследований. Разметка осуществлялась полигональными объектами с указанием класса, директории снимка, даты съемки. На основе полигональных объектов для каждого космоснимка, указанного в атрибутах слоя, сформированы маски в формате GeoTIFF в проекции исходного космоснимка и разделены на ячейки размера 64x64. В каждом пикселе маски указан идентификатор класса.

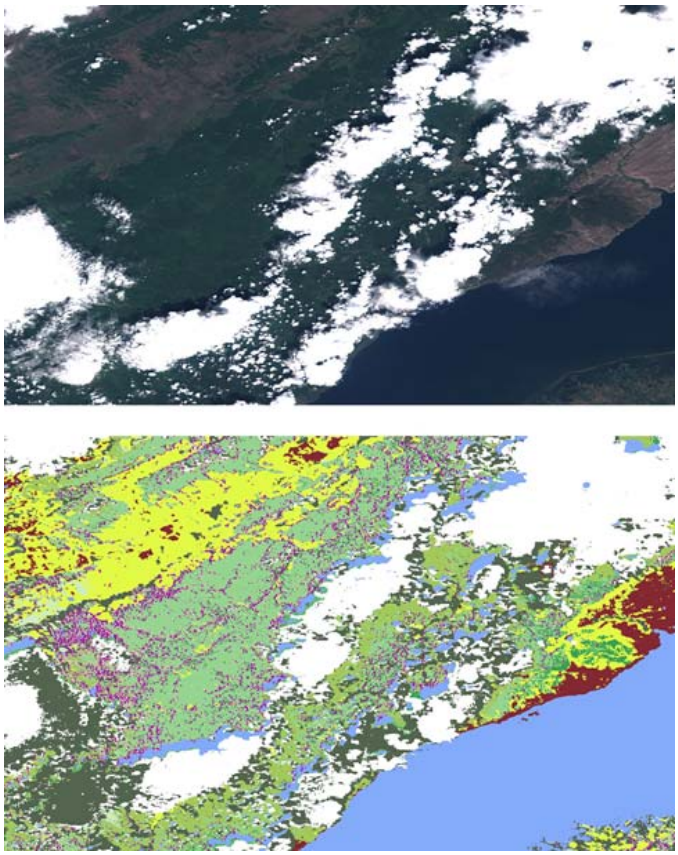


Рис. Результаты классификации спутникового снимка нейронной сетью

Для классификации спутниковых изображений применялась сверточная нейронная сеть ResNet-50. Входными данными для нейронной

сети являются тензоры. Размерность тензоров определена окрестностью, на основе которой сеть должна принимать решение и количество слоев. Окрестностью выбрана ячейка размером 64x64 пикселя, т. е. 640 на 640 метров. Каждый пиксель представлен 12 исходными каналами Sentinel-2. Каждый образец представлен тензором 64x64x12. Результаты классификации сохраняются в формате GeoTIFF.

В исходной классификации участвовала обучающая выборка, в которой для каждого из 12 классов сформировано по 1 000 образцов. Было проведено обучение на 80 эпохах, итоговая средняя точность составила 0,54, F-мера = 0,46.

Одним из методов улучшения результатов классификации спутниковых изображений является увеличение объема обучающей выборки. Была выдвинута гипотеза, что 1 000 образцов на класс недостаточно для обучения нейронной сети. Поэтому было проведено увеличение обучающей выборки до 13 000 образцов на каждый класс. Также были проведены испытания с разным количеством эпох обучения нейронной сети – 80, 120, 160 и 240. Это связано с тем, что слишком маленькое количество эпох обучения может приводить к недообучению нейронной сети, что вызывает снижение точности классификации.

В результате лучшие значения были получены при обучении на 120 эпохах с увеличенной выборкой: итоговая средняя точность составила 0,70, F-мера = 0,65, что заметно лучше первоначального варианта классификации. При большем количестве эпох наблюдается ухудшение качества классификации предположительно из-за переобучения нейронной сети на верификационных изображениях, которые не участвовали в обучении. При этом отделение разных классов лесов (хвойные, лиственные, смешанные) показывает невысокое качество. Мы полагаем, что это связано с близостью их спектральных характеристик. Разделение лесов на более детальные классы требует применения классификаторов, использующих изображения за разные периоды года, учитывающих разные моменты вегетационного периода. В дальнейшем планируется расширение обучающей выборки с целью учета различных природных зон, почв и т. д.

Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объёмов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения» (номер гос. регистрации 121030500071-2).

Список литературы

1. Davies K. P., Murphy R. J., Bruce E. Detecting historical changes to vegetation in a Cambodian protected area using the Landsat TM and ETM+ sensors // Remote Sens. Environ. Elsevier Inc. 2016. Vol. 187. P. 332–344.

2. Abdi A. M. Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data // GIScience Remote Sens. Taylor & Francis. 2020. Vol. 57, № 1. P. 1–20.

3. Carranza-García M., García-Gutiérrez J., Riquelme JC. A framework for evaluating land use and land cover classification using convolutional neural networks // Remote Sensing, 2019. 11(30). 274.

4. Бычков И. В., Ружников Г. М., Федоров Р. К., Попова А. К., Авраменко Ю. В. Классификация космоснимков Sentinel-2 Байкальской природной территории // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 1. С. 90–96.

R. K. Fedorov[1], A. K. Popova[1], Y. V. Avramenko[1]

[1]V. M. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS
Irkutsk, Russia
e-mail: chudnenko@icc.ru

CLASSIFICATION OF SATELLITE IMAGES WITH NEURAL NETWORKS

The paper considers the problem of multispectral satellite images classification on the example of the Irkutsk region territory. The training sample was labeled with created Web-interface based on Sentinel-2 satellite images and field research into 12 classes, selected taking into account the landscape features of the territory. Classification of satellite images was carried out using the convolutional neural network ResNet-50. The precision of the obtained results showed that such a classification can be used to solve actual problems of environmental monitoring – to analyze changes in the forest resources, assess the impact of climate change on the landscape, analyze the dynamics of development, inventory of farmland, etc.

Keywords: remote sensing data, neural nets, satellite image classification, machine learning.

УДК 528.8:633.1

Я. А. Филина[1], Е. А. Дунаева[2], П. В. Денисов[3]

[1]Младший научный сотрудник, [2]кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «НИИСХ Крыма», Симферополь, Республика Крым, Россия
[3]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
e-mail: mrs.filina@gmail.com, water_crimea@hotmail.com

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПО РЕСПУБЛИКЕ КРЫМ С ПОМОЩЬЮ СЕРВИСА ВЕГА

Аннотация. В работе представлены результаты дистанционной оценки состояния озимых зерновых культур степной зоны Республики Крым на 20-ю неделю 2017–2022 гг. с использованием сервиса «ВЕГА-Science» (http://sci-vega.ru/) и прямых измерений, полученных прибором Trimble GreenSeeker Handheld. Отмечается, что в сезоны 2017/18 и 2019/20 гг. на 20-ю неделю состояние зерновых находилось в угнетённом состоянии (по значению индекса NDVI) и было ниже среднемноголетней нормы NDVI на 5–15 %, а некоторых районах снижалось до 25 %. В сезоны 2017/18, 2019/19 и 2021/22 гг. наблюдалось нормальное развитие растений. Сопоставлены значения NDVI за период 2019–2022 гг., полученные по данным спутника Sentinel-2/MSI (сервис «ВЕГА-Science») с результатами NDVI датчика Trimble GreenSeeker Handheld (коэффициент корреляции 0,71). Результаты исследований показали, что в Республике Крым условия для развития озимых зерновых в период 2017–2022 гг. были различными. Отмечено, что существуют риски неблагоприятного развития озимых культур из-за дефицита осадков и нехватки запасов продуктивной влаги в почве, а также обильного выпадения осадков в период формирования и созревания колоса.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, сервис «ВЕГА-Science», нормализованный относительный индекс растительности, озимые зерновые.

Введение. Земли сельскохозяйственного назначения в Республике Крым (по данным [1] на 01.07.2016) занимают 1,15 млн га, из них сельскохозяйственных угодий – 1,11 млн га, пашни – 0,88 млн га. Регион обладает благоприятными агроклиматическими условиями для возделывания зерновых и зернобобовых культур. В зерновом балансе региона значительный вес принадлежит озимым зерновым культурам, которые дают порядка 83–89 % валового сбора зерна, производимого в республике.

Целью данного исследования является возможность оценки состояния озимых культур степной зоны Республики Крым с использованием спутникового сервиса «ВЕГА-Science» [2] и наземных данных, полученных прибором Trimble GreenSeeker Handheld [3].

Материалы и методы. Для оценки состояния растительности использовали индекс NDVI, полученный из сервиса «ВЕГА-Science» (спутниковые снимки Sentinel-2/MSI) и измеренные данные Trimble GreenSeeker Handheld.

© Филина Я. А., Дунаева Е. А., Денисов П. В., 2022

В Республике Крым озимые культуры характеризуются появлением всходов в осенний период и ранней вегетацией в весенний период, что позволяет отделять их от посевов остальных культур (рис. 1).

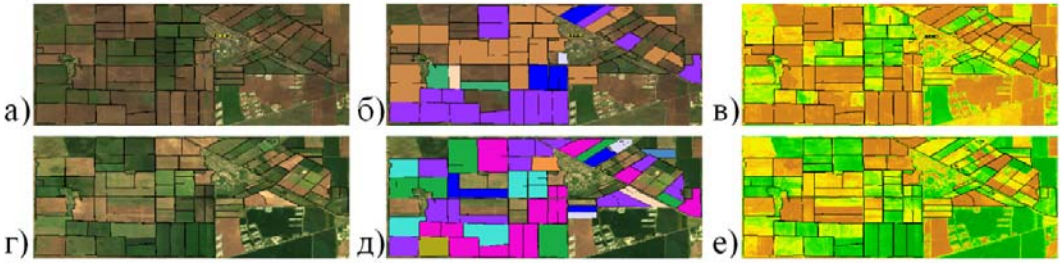


Рис. 1. Определение озимых культур на примере Клепининского сельского поселения Красногвардейского района по данным Sentinel-2/MSI композитное изображение за май 2021 г. (*а–в*) и 2022 г. (*г–е*): слева – естественный синтез, по центру – маска культур (коричневый, розовый и светло-зелёный цвет – озимые культуры), справа – индекс NDVI

Оценка состояния озимых культур за период 2017–2022 гг. проведена на 20-ю неделя с использованием индекса NDVI для степной зоны Республики Крым. Измерения Trimble GreenSeeker Handheld проводились с марта по июнь в 2019–2022 гг.

Результаты. Исследования показали, что в Республике Крым наибольшие площади угнетённого состояния озимых зерновых в весенний период (20-я неделя) наблюдались в 2018 и 2020 гг. На рис. 2 представлена карта отклонения NDVI от среднемноголетней нормы (далее – нормы) для озимых культур. Таким образом, за 2018 г. (рис. 2, *б*) в Черноморском районе отклонение NDVI от нормы для озимых культур было минимально, для большинства территории республики отклонение ниже нормы на 5–15 %, в Красногвардейском районе – достигало до –25 %. В 2020 г. данные культуры находились в нормальном состоянии (рис. 2, *г*): большая часть территории находилась в пределах нормы, Джанкойский и Кировский районы отклонение от нормы составило от –5 до –15 %. Нормальное развитие растений наблюдалось в 2017, 2019 и 2021 гг. – превышение отклонения NDVI от нормы составило 5–15 % и аномальное – 15–25 % в 2022 г.

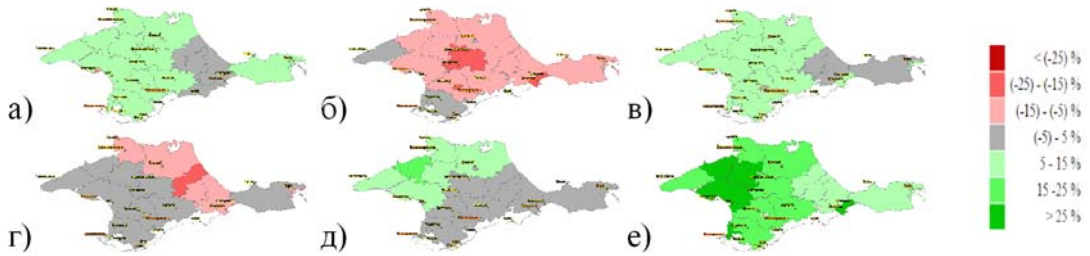


Рис. 2. Карта отклонения NDVI от нормы для озимых культур на 20 неделю: *а* – 2017 г.; *б* – 2018 г.; *в* – 2019 г.; *г* – 2020 г.; *д* – 2021 г.; *е* – 2022 г.

В сезоны 2017/18 и 2019/20 гг. наблюдались минимальные осадки как осенью, так и зимой, что привело к замедлению появления всходов,

а также к весеннему дефициту запасов продуктивной влаги в почве, необходимого для дальнейшего развития озимых (по данным сервиса «ВЕГА-Science»). На территории Красногвардейского муниципального района в с. Клепинино установлена автоматизированная метеостанция Meteobot®Pro, и на рис. 3 приведена динамика температуры воздуха и осадков за период 2020–2022 гг. Благоприятные условия для получения максимальных урожаев наблюдались в сезон 2021/22 гг., поскольку конец 2021 г. и начало 2022 г. характеризовались значительным количеством осадков. Однако, выпавшие осадки во второй половине июня затрудняют проведение уборки, при сохранении такой тенденции может увеличится засорённость посевов и снизится урожайность.

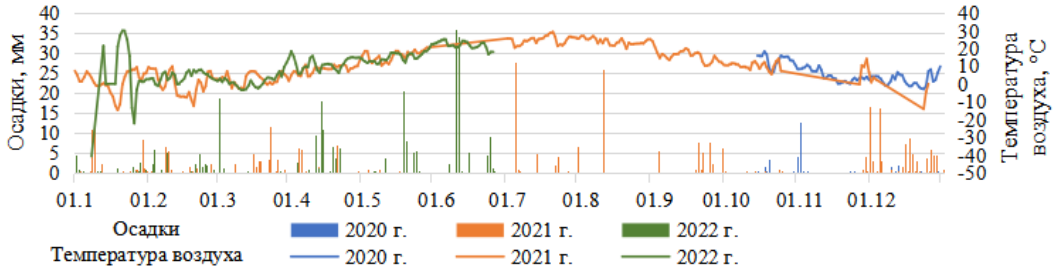


Рис. 3. Динамика температуры воздуха и осадков (метеостанция Клепинино)

На рис. 4 проведена идентификации озимых культур по данным «ВЕГА-Science». Ранее по картам озимых культур за 2018 г. и 2019 г. некоторые культуры были ошибочно распознаны как озимые. Для улучшения идентификации проведено усовершенствование метода [4].



Рис. 4. Карта идентификации озимых по «ВЕГА-Science» (сверху) и данным ФГБУН «НИИСХ Крыма» (снизу) за*: *а* – 2018 г.; *б* – 2019 г.; *в* – 2020 г.; *г* – 2021 г.; *д* – 2022 г.
*в «ВЕГА-Science» данные за 2017 г. отсутствуют.

Также были сопоставлены значения NDVI за период 2019–2022 гг., полученные по данным спутника Sentinel–2/MSI (сервис «ВЕГА-Science») с результатами NDVI датчика Trimble GreenSeeker Handheld (табл.).

Таблица

Значения NDVI озимых культур по данным спутника Sentinel–2/MSI (сервис «ВЕГА-Science») и Trimble GreenSeeker Handheld за 2019–2022 гг.

	Sentinel–2/Trimble GreenSeeker Handheld				
Неделя	16	17	19	20	23
2019 г.		0,58/0,57			
2020 г.			0,41/0,44		0,44/0,34
2021 г.	0,59/0,52				
2022 г.				0,72/0,72	0,58/0,73

Установлено, что для озимых культур значения NDVI могут отличаться на величину от 0,01 до 0,15. Коэффициент корреляции за период 2019–2022 гг. составил 0,71.

Выводы. Результаты исследований показали, что в Республике Крым условия для развития озимых зерновых в период 2017–2022 гг. были различными. Существуют риски неблагоприятного развития озимых культур из-за дефицита осадков и нехватки запасов продуктивной влаги в почве, а также из-за обильного выпадения осадков в период формирования и созревания колоса.

Список литературы

1. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года на территории Республики Крым. Земельные ресурсы и их использование. Крымстат-Симферополь. 2018. Т. 3. С. 8–9. URL: https://crimea.gks.ru (дата обращения: 03.06.2022).

2. Лупян Е. А., Савин И. Ю., Барталев С. А. и др. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.

3. Дунаева Е. А. Оценка уровня варьирования биопродуктивности посевов // Региональные проблемы дистанционного зондирования земли. 2020. С. 203–206.

4. Плотников Д. Е., Ёлкина Е. С., Дунаева Е. А. и др. Развитие метода автоматического распознавания озимых культур на основе спутниковых данных для оценки их состояния на территории Республики Крым // Таврический вестник аграрной науки. 2020. № 1(21). С. 64–82.

Ya. A. Filina[1], Ie. A. Dunaieva[1], P. V. Denisov[2]

[1]FSBSI «RIA of Crimea», Simferopol, Crimea, Russia

[2]Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

e-mail: mrs.filina@gmail.com, water_crimea@hotmail.com

ASSESSMENT OF THE STATE OF WINTER GRAIN CROPS IN THE REPUBLIC OF CRIMEA USING THE VEGA SERVICE

The paper presents the results of remote assessment of the state of winter crops in the steppe zone of the Republic of Crimea for the 20th week of 2017–2022 using the VEGA-Science (http://sci-vega.ru/) and direct measurements obtained with the Trimble GreenSeeker Handheld. It is noted that the state of cereals in the seasons 2017/18 and 2019/20 on the 20th week was in a depressed state (according to the NDVI) and was below the average long-term NDVI norm by 5–15%, and in some areas it decreased to 25%. For the 2017/18, 2019/19 and 2021/22 seasons normal development of plants was observed. The NDVI values for the period 2019–2022 obtained from the Sentinel-2/MSI satellite data (VEGA-Science) are compared with the results of the Trimble GreenSeeker Handheld NDVI sensor (the correlation coefficient 0.71). The results of the research showed that the conditions for the development of winter crops in the period 2017-2022 in the Republic of Crimea were different. It was noted that there are risks of unfavorable development of winter crops due to a lack of precipitation and a lack of productive moisture reserves in the soil, as well as abundant precipitation during the formation and maturation of an ear.

Keywords: remote monitoring, "VEGA-Science", normalized difference vegetation index, winter crops.

УДК 528.88

М. М. Шляхова[1], В. В. Дедкова[2]

[1]Кандидат технических наук, [2]Ассистент
Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
e-mail: plazma_space@mail.ru, v.v.dedkova@sgugit.ru

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО МАТЕРИАЛАМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ГЕОСКАН 401

Аннотация. Представлен опыт применения беспилотного воздушного судна Геоскан 401 для аэрофотосъемки защитных сооружений магистральных трубопроводов, а также приведено описание процесса обработки полученных материалов в программном обеспечении Agisoft Metashape. В результате обработки получен ортофотоплан, удовлетворяющий требуемой точности, в результате чего сделан вывод о возможности использования материалов аэрофотосъемки.

Ключевые слова: аэрофотосъемка, беспилотное воздушное судно, магистральный трубопровод, защитные сооружения, цифровая камера.

Магистральный трубопровод является опасным объектом транспортировки нефтяного сырья и требует оперативного мониторинга, так как его неисправность может повлечь аварийные ситуации [1, 2]. Для предотвращения аварий, возникающих вследствие повреждений трубопровода, создаются земляные и бетонные защитные сооружения. Критерии контроля точности мониторинга зависят от структурного материала защитных сооружений [3, 4].

Использование материалов аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна (БВС), полученных цифровой камерой, позволяют справиться с такой задачей в сжатые сроки и предоставить результат обработки в виде ортофотоплана для дальнейших исследований изменения технического состояния защитных сооружений.

Аэрофотосъемка с БВС Геоскан 401 была проведена в октябре 2021 г. на территорию магистрального трубопровода, высота полета составила 80 м, было получено 312 снимков цифровой камерой со шторно-щелевым затвором Sony Alpha 6000 (разрешение 24 Мп, фокусное расстояние 20 мм). На рис. 1. представлен фрагмент снимка с точкой планово-высотного обоснования.

Обработка снимков выполнялась в программном продукте Agisoft Metashape и состояла из следующих процессов:

- загрузка снимков;
- выравнивание снимков;
- классификация точек рельефа;

© Шляхова М. М., Дедкова В. В., 2022

– построение модели;
– построение карты высот (рис. 2);
– построение ортофотоплана.



Рис. 1. Фрагмент снимка с опорной точкой

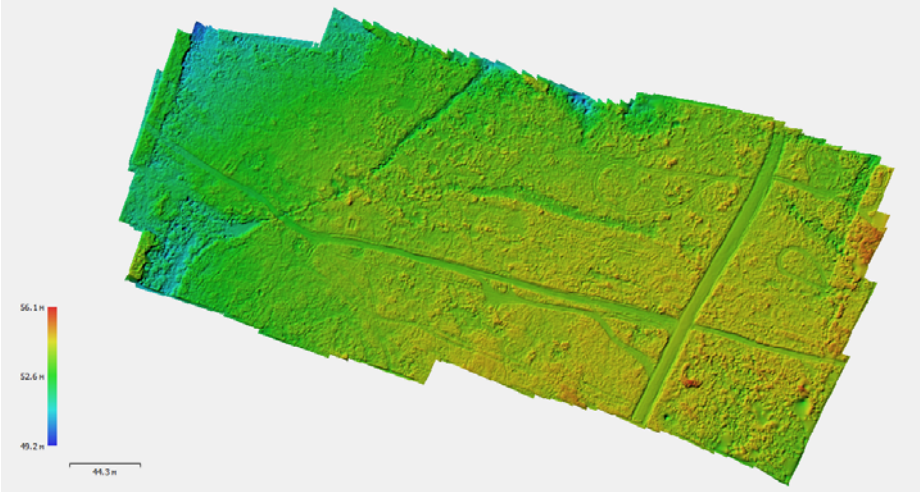


Рис. 2. Карта высот

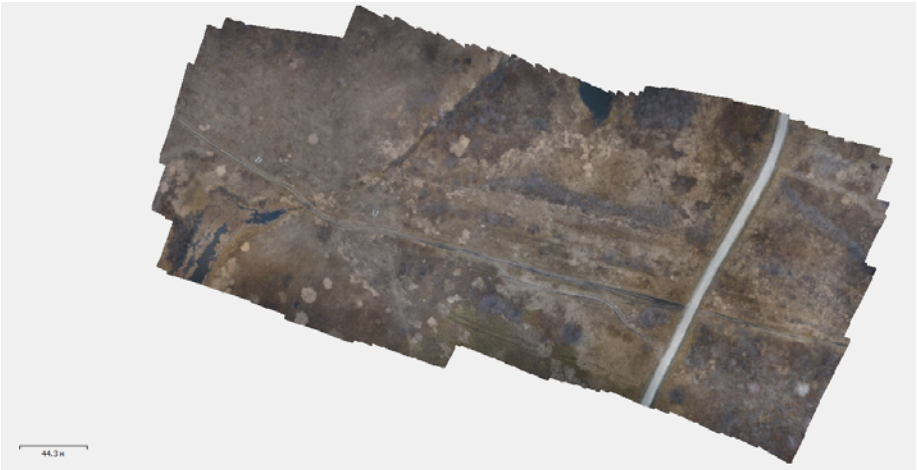


Рис. 3. Полученный ортофотоплан в Agisoft Metashape

Точность полученного ортофотоплана составила 0,15 м в плане и по высоте, что соответствует установленным критериям точности мониторинга земельных защитных сооружений магистрального трубопровода (рис. 3) [1].

В результате проделанной работы сделан вывод о том, что данные полученные с БВС Геоскан 401 пригодны для проведения исследований состояния защитных сооружений магистральных трубопроводов, а точность результатов обработки снимков соответствует установленным критериям [1].

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. Еськов Д. Ю., Шляхова М. М. Риски и причины развития аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах // Регулирование земельно-имущественных отношений в России. Национальная науч.-практ. конф, 2021. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 1. С. 28–33.

3. Дедкова В. В., Шляхова М. М. Мониторинг технического состояния магистральных трубопроводов методами дистанционного зондирования // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Междунар. науч. конф., Красноярск, 29 сент. – 2 окт. 2020. С. 192–195.

4. Шляхова М. М., Дедкова В. В. Перспективы применения аэросъемок для контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Междунар. науч. конф., Красноярск, 29 сент. – 2 окт. 2020 г. Красноярск, 2020. С. 316–319.

M. M. Shlyahova, V. V. Dedkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: plazma_space@mail.ru, v.v.dedkova@sgugit.ru

MONITORING OF THE MAIN PIPELINES' PROTECTIVE STRUCTURES BASED ON AERIAL SURVEY FROM GEOSCAN 401 UAV

The article describes the experience of using the Geoscan 401 unmanned aerial vehicle for aerial survey of protective structures of main pipelines, and also describes the photogrammetric processing of obtained images in the Agisoft Metashape software. The resulting orthophotoplan corresponds to required accuracy of monitoring and can be used to study the state of the protective structures of main pipelines.

Keywords: aerial survey, unmanned aerial vehicle, main pipeline, protective structures, digital camera.