

ISSN 0205-9614

Номер 2

Март - Апрель 2023



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2023

Использование космической информации о Земле

Оптические характеристики аэрозоля и содержание угарного газа в атмосфере над районами Иркутской области и Бурятии в 2010–2021 гг. <i>Н. В. Родионова</i>	3
Прямые и обратные связи между температурой подстилающей поверхности и листовым индексом на территории Беларуси в летний период <i>С. А. Лысенко</i>	16
Отражение мантийных плюмовых процессов в спутниковом магнитном поле над территорией Африки <i>Л. М. Абрамова, И. М. Варенцов, Д. Ю. Абрамова</i>	31
Мониторинг сенокосных полей по геоботаническим, наземным спектрометрическим и спутниковым данным <i>И. Ю. Ботвич, Н. А. Кононова, Д. В. Емельянов, Т. И. Письман</i>	43
Мониторинг состояния земель в переходной природно-географической зоне Волгоградского Заволжья <i>В. А. Силова</i>	54

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

Оценка пригодности территорий для проведения детального геолого-минералогического картирования на основе статистических методов обработки данных дистанционного зондирования КА LANDSAT-8: на примере Юго-Восточного Забайкалья, Россия <i>И. О. Нафигин, В. Т. Ишмухаметова, С. А. Устинов, В. А. Минаев, В. А. Петров</i>	61
--	----

Физические основы исследования Земли из космоса

Модельные расчеты содержания озона в атмосфере по уходящему излучению Земли <i>С. А. Шишигин</i>	84
---	----

Космические аппараты, системы и программы ИЗК

Международное сотрудничество в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях (к 55-летию программы “Интеркосмос”) <i>Л. А. Ведешин</i>	93
---	----

Contents

No. 2, 2023

Utilization of the Earth Space Data

- Optical Characteristics of Aerosol and Carbon Monoxide Content in the Atmosphere over the Irkutsk Region and Buryatia in 2010-2021
N. V. Rodionova 3
- Land Surface Temperature and Leaf Area Index Forward and Backward Linkages for Summer Time Period in Republic of Belarus
S. A. Lysenko 16
- Image of Mantle Plume Processes in the Satellite Magnetic Field over Africa Territory
L. M. Abramova, I. M. Varentsov, D. Yu. Abramova 31
- Grassland Monitoring Based on Geobotanical, Ground, Spectrometric and Satellite Data
I. Yu. Botvich, N. A. Kononova, D. V. Emelyanov, T. I. Pisman 43
- Satellite Monitoring of Desertification in the Transitional Natural-Geographical Zone of the Volgograd Region
V. A. Silova 54
-

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

- Territory Suitability Assessment for Conducting Detailed Geological and Mineralogical Mapping Based on Statistical Methods of Remote Sensing Data Processing Landsat-8: A Case Study in the Southeastern Transbaikalia, Russia
I. O. Nafigin, V. T. Ishmuhametova, S. A. Ustinov, V. A. Minaev, V. A. Petrov 61
-

Earth Research from Space Physical Ground

- Model Calculations of Ozone Content in the Atmosphere by Earth's Outgoing Radiation
S. A. Shishigin 84
-

Spacecraft, Systems and Programs for ERS

- International Cooperation in the Exploration and Use of Outer Space for Peaceful Purposes (To the 55th Anniversary of the Interkosmos Program)
L. A. Vedeshin 93
-
-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЯ И СОДЕРЖАНИЕ УГАРНОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ НАД РАЙОНАМИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ И БУРЯТИИ В 2010–2021 гг.

© 2023 г. Н. В. Родионова*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Московская обл., Фрязино, Россия*

**E-mail: rnv1948123@yandex.ru*

Поступила в редакцию 07.08.2022 г.

В работе определены сезонные и межгодовые вариации аэрозольной оптической толщины (АОТ) и общего содержания угарного газа в столбе атмосферы за период 2010–2021 гг. по измерениям приборов MODIS и MORITT спутника Terra для нескольких городов Иркутской области (Иркутск, Зима, Вихоревка, Железногорск-Илимский, Усть-Кут) и Бурятии (Селенгинск и Улан-Удэ), входящих в категорию городов с высоким уровнем загрязнением атмосферы (ЗА). Для Иркутска показано уменьшение межгодового значения АОТ с 0.278 в 2012 г. до 0.14 в 2020 г. с общим отрицательным трендом. Однако в 2021 г. межгодовое значение АОТ для Иркутска выросло и составляло 0.22. Для Иркутска показан отрицательный тренд для межгодовых вариаций общего содержания СО в столбе атмосферы. При сравнении многолетних сезонных вариаций АОТ по наземным измерениям фотометром CIMEL в п. Торы (Бурятия), входящем с систему сети AERONET, и спутниковыми OMI/Aura данными отмечена близость значений АОТ для летнего и осеннего сезонов и значительное превышение АОТ по спутниковым данным над наземными измерениями для весенних месяцев. Наибольший коэффициент корреляции Спирмена между наземными и спутниковыми измерениями АОТ принадлежит 2021 г. и равен $\rho_s = 0.64$.

Ключевые слова: наземные и спутниковые измерения, аэрозольные оптические характеристики атмосферы, общее содержание угарного газа в столбе атмосферы, загрязнение атмосферы, коэффициент корреляции Спирмена

DOI: 10.31857/S0205961423020033, **EDN:** ТСХJCV

ВВЕДЕНИЕ

По итогам экологического состояния атмосферы в 2021 г. (<https://rtneo-irk.ru/news/irkutskaya-oblast-voshla-v-top-5-regionov-po-kolichestvu-zagryazneniy-vozdukha-v-2021-godu/>) Иркутская область (города Братск, Байкальск, Свирск, Шелехов, Вихоревка) вошла в пятерку лидеров среди регионов РФ по количеству загрязнений воздуха в 2021 г. За Иркутской областью следует Бурятия (города Селенгинск, Улан-Удэ). “В отслеженных случаях основными загрязняющими веществами выступали сероводород, бензпирен, а также диоксид серы. Также отмечались загрязнения взвешенными веществами, которые образуются в результате сгорания всех видов топлива и при производственных процессах, но могут иметь и естественное происхождение, например, выделяться в результате эрозии почв”. В докладе Министерства природных ресурсов и экологии РФ “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации”, посвященный экологической ситуации в 2020 году (<https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2021/12/13/900429-min->

[prirodi-opublikovalo-doklad-o-sostoyanii-okruzhayuschei-sredi-v-rossii-v-2020-godu](https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2021/12/13/900429-min-prirodi-opublikovalo-doklad-o-sostoyanii-okruzhayuschei-sredi-v-rossii-v-2020-godu)) отмечалась положительная динамика в сравнении с 2019 годом по некоторым показателям для Иркутской области. Так, Иркутск был переведен из списка городов с очень высоким уровнем загрязняющих веществ (ЗВ) в список городов с высоким уровнем ЗВ. Снизились средние за год концентрации взвешенных веществ (ВВ) на 20–30% благодаря теплой зиме и большому количеству осадков. В табл. 1 приведен список некоторых городов в Иркутской области и Бурятии с высоким уровнем загрязнения атмосферы (ЗА) в 2020 г. и указаны вещества, определяющие эти загрязнения (<https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2021/12/13/900429-min-prirodi-opublikovalo-doklad-o-sostoyanii-okruzhayuschei-sredi-v-rossii-v-2020-godu>), где БП – бенз(а)пирен, ВВ – взвешенные вещества, NO₂ – диоксид азота, СО – оксид углерода, SO₂ – диоксид серы, Ф – формальдегид, РМ – взвешенные частицы фракций РМ10 и РМ2.5, О₃ – приземный озон, ВС – черный углерод, HCl – хлорид водорода.

Таблица 1. Города с наибольшим уровнем ЗА в 2020 г. и вещества, его определяющие

Города	Вещества ЗА	Города	Вещества ЗА
Вихоревка	БП, ВВ, NO ₂ , CO, SO ₂	Селенгинск	БП, ВВ, PM2.5, PM10, O ₃
Зима	БП, NO ₂ , CO, Ф, HCl	Улан-Удэ	БП, ВВ, NO ₂ , PM2.5, PM10
Иркутск	БП, ВВ, NO ₂ , CO, Ф, BC	Чита	БП, ВВ, NO ₂ , O ₃ , фенол

Целью данной работы является определение вариаций и возможных трендов содержания ВВ и СО в атмосфере некоторых городов Иркутской области и Бурятии, находящихся в списке городов с высоким уровнем ЗА и сравнение наземных измерений АОТ с помощью прибора Cimel (www.cimel.fr) на станции AERONET в поселке Торы недалеко от Иркутска (103 км по прямой) (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) со спутниковыми измерениями OMI/Aura, находящимися в свободном доступе в системе анализа и визуализации данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov>) за период 2010–2021 гг.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

В район исследования входят несколько городов Иркутской области: Иркутск (52°17'52" с.ш., 104°17'47" в.д.), Зима (53°55' с.ш., 102°03' в.д.), Вихоревка (56.1207° с.ш., 101.1704° в.д.), Железногорск-Илимский (56°34'36" с.ш., 104°07'18" в.д.), Усть-Кут (56°48' с.ш., 105°50' в.д.) и три пункта Бурятии: п. Торы (51.8° с.ш., 103.087° в.д.), Селенгинск (52°00'23" с.ш., 106°51'52" в.д.), Улан-Удэ (51°49'26" с.ш., 107°36'27" в.д.) (рис. 1).

Включение в район исследования Железногорска-Илимского и Усть-Кута, расположенных к востоку от Братска (города не входят в категорию городов с высоким уровнем ЗА), связано с повышением значениями индекса качества воздуха (ИКВ) (AQI – Air Quality Index) для этих территорий на карте ИКВ (<https://air.plumelabs.com/air-quality-map>) для отдельных дат 2022 г., что вызвало интерес к этому району. Так, на рис. 2 показаны два фрагмента карты ИКВ для исследуемой территории для 16 июня и 27 июля 2022 г. (расшифровку цветовой легенды можно найти, к примеру, на сайте <https://aqicn.org/scale/ru>). ИКВ включает в себя суммарную оценку содержания в воздухе двуокиси азота, озона и взвешенных веществ PM2.5 и PM10.

НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА СТАНЦИИ СЕТИ AERONET В П. ТОРЫ

Данные об оптических свойствах аэрозолей ученые, в основном, получают по спутниковым наблюдениям. Но наиболее точную информацию дают наземные системы. Так, аэрозольная роботизированная сеть AERONET, распространенная

по всему миру и оснащенная солнечными и небесными фотометрами, обеспечивает непрерывные точные измерения ряда аэрозольных параметров.

Одна из нескольких станций сети AERONET в России расположена в 150 км на юго-запад от Иркутска (рис. 1) вблизи п. Торы (Бурятия), станция под названием “Иркутск” (Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН).

Аэрозольная оптическая толщина атмосферы в районе п. Торы

Аэрозоли (от греч. – воздух; нем. – коллоидный раствор) – твердые или жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в газовой среде. Аэрозольная оптическая толщина (АОТ) вычисляется как логарифм пропускания столба атмосферы за вычетом рэлеевского рассеяния воздуха и вкладов от ослабления света парниковыми газами. Эта величина характеризует уменьшение прозрачности атмосферы за счет рассеяния и поглощения света на частицах аэрозоля. Чем выше концентрация частиц в воздухе, тем выше АОТ. АОТ на длине волны 500 нм позволяет оценить вклад аэрозольной составляющей в радиационный баланс атмосферы. К сожалению, использование солнечного фотометра не позволяет его применять ночью, а также в дождливую и пасмурную погоду.

Данные AERONET находятся в свободном доступе на сайте (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). В работе использовались данные АОТ AERONET уровня 1.5 версии 3.0 на длине волны 500 нм. На рис. 3 показан график вариаций АОТ (рис. 3, а), гистограмма единичных измерений N фотометра по месяцам за 2010–2021 гг. (рис. 3, б), график многолетних среднемесячных значений АОТ с отклонениями от средних значений (рис. 3, в) по наземным измерениям фотометра на станции сети AERONET “Иркутск” в п. Торы. Наибольшие вариации значений АОТ в пределах года отмечены для 2021, 2017, 2016, 2014 и 2012 гг. Для сезонных вариаций локальные максимумы принадлежат августу 2021 г. и июлю 2016 г. Многолетние сезонные вариации значений АОТ (рис. 3, в) характеризуются ростом значений в летние месяцы с максимумом в августе, уменьшением значений АОТ осенью и весной. Для весны есть локальный минимум в мае и локальный максимум в апреле.

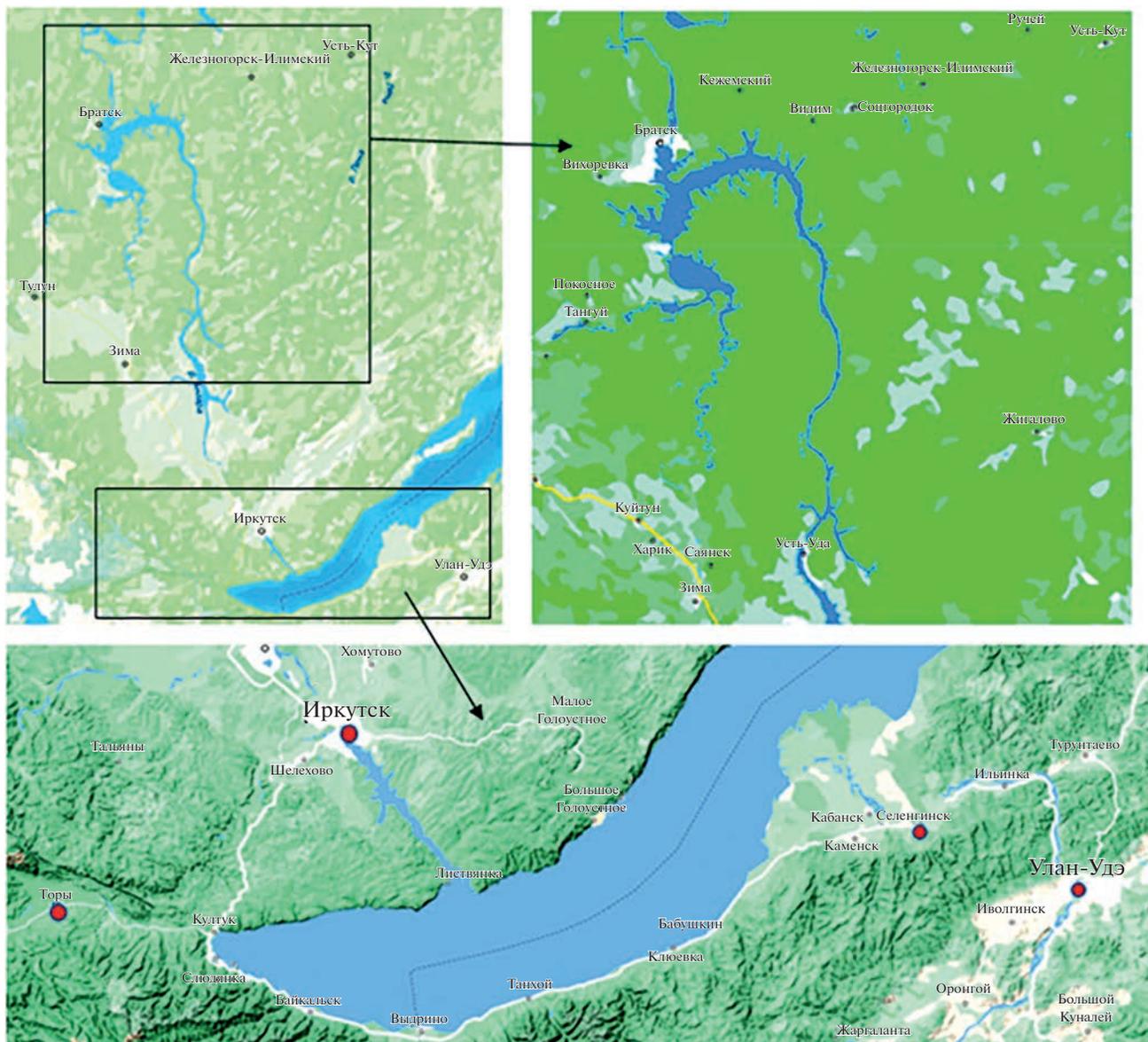


Рис. 1. Район исследования в Иркутской области и Бурятии.

Идентификация некоторых параметров аэрозоля по данным AERONET в районе п. Торы

Параметр Ангстрема. Определение типа аэрозоля в атмосфере важно для получения информации о качестве воздуха, источниках загрязнения. В стандартную интерпретацию данных AERONET, помимо AOT, входят следующие два параметра: спектральная зависимость AOT от длины волны $\alpha = -\lg(AOT_{\lambda}/AOT_{\lambda_0})/\lg(\lambda/\lambda_0)$ – параметр Ангстрема, и альbedo однократного рассеяния (AOP, SSA- single scattering albedo) (Eck et al., 1999). По наземным измерениям солнечными фотометрами сети станций AERONET можно выделить основные типы аэрозоля по спектральной

зависимости AOT от длины волны в интервале длин волн 440–870 нм (Giles et al., 2012).

Параметр Ангстрема α характеризует степень дисперсности частиц в атмосфере. Чем меньше параметр Ангстрема, тем больше размер частиц. Так, значения α меньше 1.0 указывает на преобладание крупных по размеру частиц с радиусом от 0.5 мкм. При значениях α выше 2.0 аэрозоль мелкодисперсный (Schuster et al., 2006).

По значениям AOP определяют поглощающие свойства аэрозоля. Чем ближе значение AOP к 1, тем преобладают рассеивающие частицы в аэрозолях. При значениях AOP вблизи 0 указывает на преобладание поглощающих частиц. Примером работы, где рассматривались аэрозольные опти-

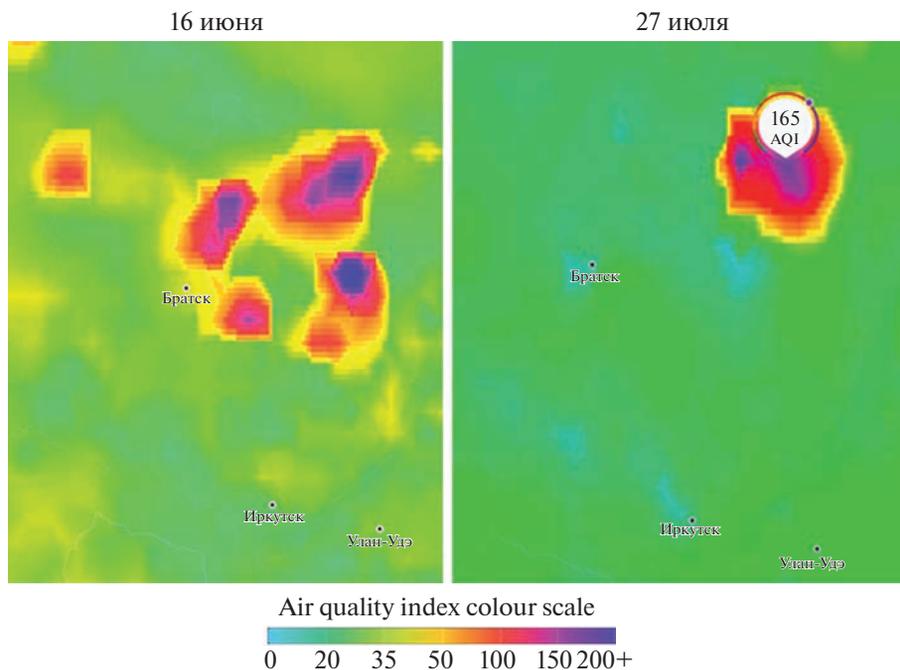


Рис. 2. Карты ИКВ для рассматриваемой территории для июня и июля 2022 г.

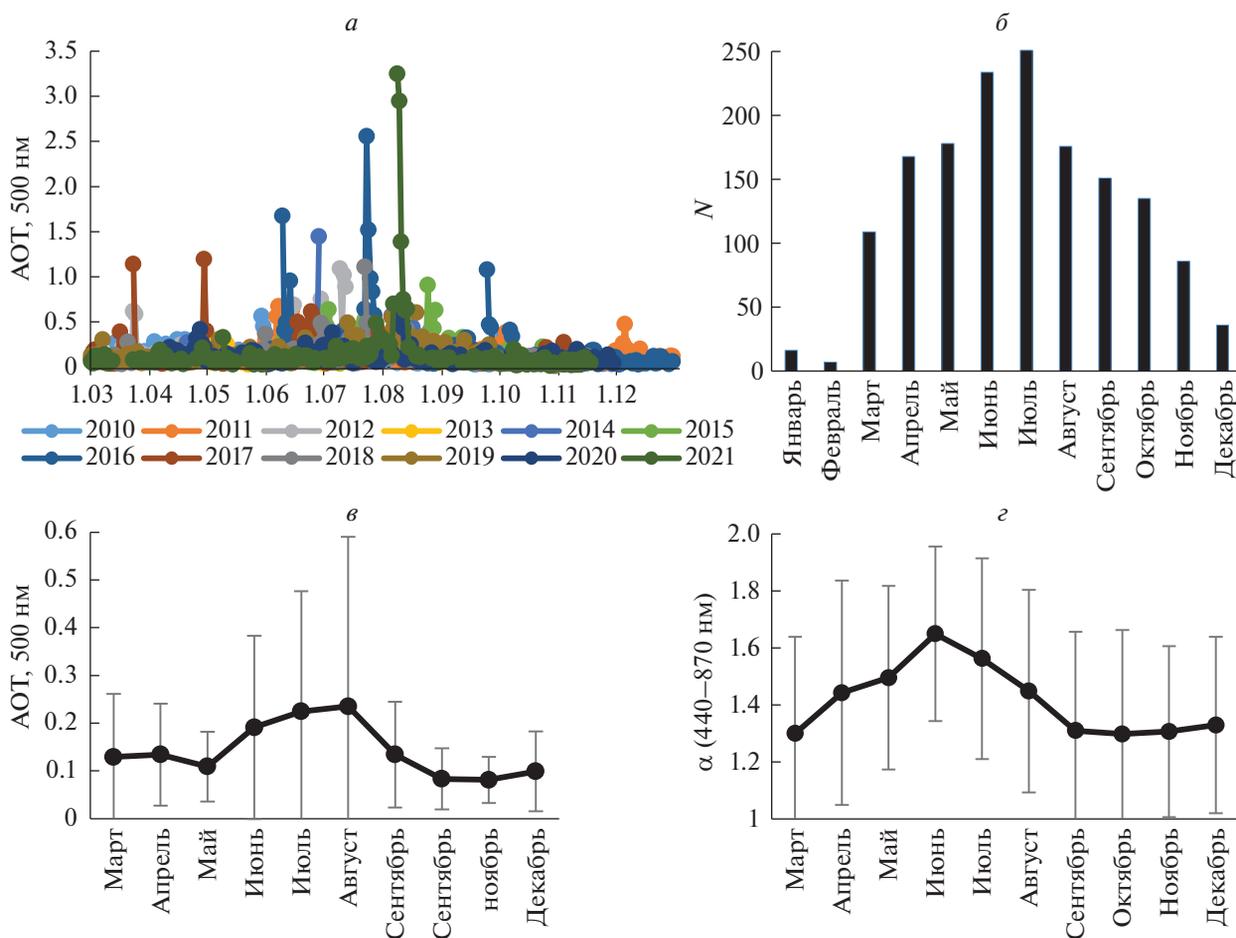


Рис. 3. *a* – Вариации значений АОТ (500 нм), *б* – количество многолетних измерений фотометра по месяцам, *в* – многолетние среднемесячные значения АОТ и многолетние среднемесячные значения α (*г*) по наземным измерениям в п. Торы в 2010–2021 гг.

Таблица 2. Аэрозольные оптические характеристики по наземным данным в п. Торы

Дата	AOT ₅₀₀	$\alpha_{440-870}$	AOP	n	k
09.06.2016	1.674	0.326	0.942–0.955	1.600	0.00230–0.00290
23.07.2016	2.558	1.350	0.960–0.950	1.513–1.512	0.00680–0.00730
08.08.2021	3.250	1.450	0.965–0.952	1.520–1.510	0.00616–0.00647

ческие характеристики по данным измерений солнечным фотометром CIMEL, является работа авторов (Волкова и др., 2018) для района вблизи Санкт-Петербурга.

На рис. 3, *з* приведен график многолетних среднемесячных значений параметра Ангстрема α по измерениям фотометра на станции сети AERONET “Иркутск” в п. Торы за 2010–2021 гг. Значения α больше 1, т.е. в атмосфере преобладают мелкодисперсные частицы. Максимальное многолетнее среднемесячное значение α отмечено в июне $\alpha = 1.65 \pm 0.3$ со снижением значений α весной и осенью.

Функция распределения частиц аэрозоля по размеру. Свойства аэрозоля восстанавливаются с помощью алгоритма инверсии, разработанного Dubovic and King (2000). Дальнейшие алгоритмы Dubovic et al. (2006) были разработаны для учета несферической формы аэрозольных частиц, таких как минеральная пыль.

Функция распределения частиц аэрозоля по размеру $dV(r)/d\ln(r)$ (мкм или мкм³/мкм²), восстановленная по инверсии из данных AERONET, имеет бимодальный характер с первым максимумом при значениях r от 0.05 до 0.5 мкм и вторым максимумом при значениях r от 0.5 до 10 мкм. Профили функции сильно различаются для ясных дней и дней с загрязненной атмосферой. Во втором случае растет AOT, уменьшается α , что свидетельствует о наличии крупнодисперсных частиц.

На рис. 4, *а*, *б*, *в* приведены графики объемного распределения частиц аэрозоля по размеру для трех дат, которые выбирались по максимальным значениям AOT для 2010–2021 гг. (см. рис. 3, *а*). Графики даны для 9 июня 2016 г. (рис. 4, *а*) со значением AOT = 1.674 и значением $\alpha = 0.326$, и для 23 июля 2016 г. (рис. 4, *б*) со значением AOT = 2.558 и $\alpha = 1.35$. Для 9 июня субмикронная фракция аэрозоля практически исчезла и доминирует крупнодисперсная фракция аэрозоля, что согласуется с малым значением показателя Ангстрема. На рис. 4, *в* приведен график функции распределения частиц аэрозоля по размеру для 8 августа 2021 г., для которого есть абсолютный максимум значений AOT = 3.25 за период 2010–2021 гг. (рис. 3, *а*). Здесь при очень сильном за-

грязнении атмосферы доминируют мелкодисперсные частицы, судя по значению параметра Ангстрема $\alpha = 1.45$. Для всех трех дат AOP близко к 1, т.е. преобладает рассеяние.

Однако, как отмечено в работе (Абдуллаев и др., https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/030/50030162.pdf), не следует строго связывать уровень запыленности с формой спектра размеров частиц, поскольку необходимо учитывать влияние влажности и других параметров.

Еще одним свойством аэрозоля, восстанавливаемым с помощью алгоритма инверсии, является комплексный показатель преломления частиц $m = n - ik$, который определяет соотношение между поглощаемой и рассеиваемой частицами радиацией, где n – показатель преломления и k – показатель поглощения. Оба параметра зависят от химического состава аэрозолей. На рис. 4, *з* показана зависимость данных параметров от длины волны (от 440 до 1020 нм) для трех дат 9 июня, 23 июля 2016 г. и 8 августа 2021 г. для времени суток 9:49:20, 9:42:18, 9:23:40, соответственно. Действительная часть представлена сплошными линиями, мнимая часть k – пунктирными. Для рассматриваемых дат n убывает с ростом λ , а k растет.

В табл. 2 приведены аэрозольные оптические характеристики атмосферы для трех дат по наземным измерениям на станции сети AERONET в п. Торы.

Для рассматриваемых дат параметры аэрозолей можно разделить на две группы: 1 группа – для 9.6.16 и 2 группа – для 23.7.16 и 8.8.21. Для 9 июня субмикронная фракция аэрозоля практически исчезла (рис. 4, *а*) и доминирует крупнодисперсная фракция аэрозоля, что согласуется с малым значением показателя Ангстрема α . Для второй группы характерно высокое значение параметра Ангстрема, т.е. преобладание мелкодисперсного аэрозоля рассеивающего типа.

СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ AOT В РАЙОНЕ П. ТОРЫ И СРАВНЕНИЕ С НАЗЕМНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Для сравнения спутниковых измерений с наземными данными сезонного хода значений AOT в районе п. Торы использовались измерения при-

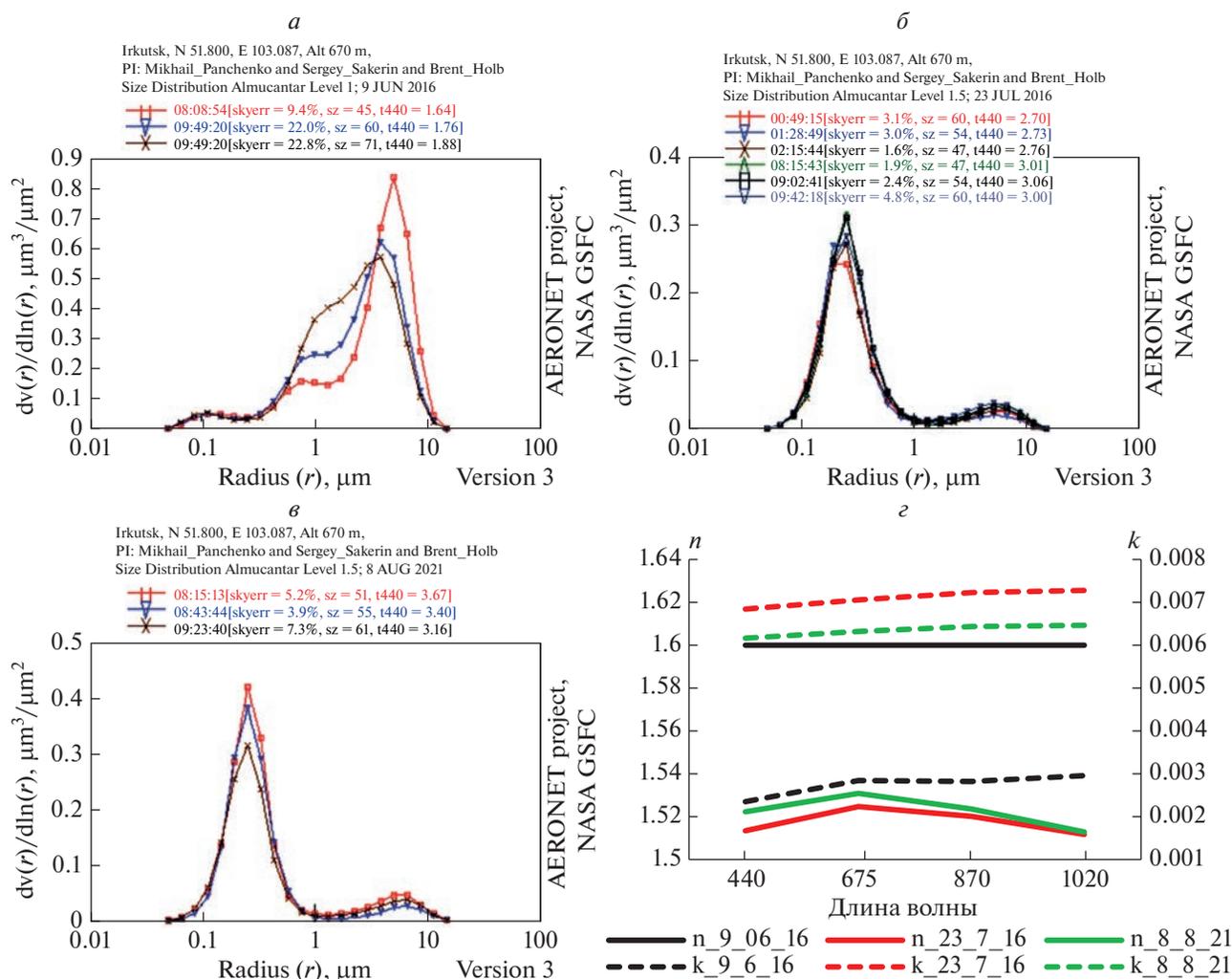


Рис. 4. Графики функции распределения частиц аэрозоля по размеру и значений n и k для 9/06/16, 23/07/16 и 08/08/21 по наземным измерениям в п. Торы.

бора ОМІ спутника Aura на основе системы анализа и визуализации данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). На рис. 5, а приведены графики значений АОТ продукта ОМІ ОМАERU-Vd, длина волны 500 нм, пространственное разрешение (ПР) $1^\circ \times 1^\circ$, усредненные по площадке с центром в п. Торы. Для сезонных вариаций АОТ, как и для наземных измерений, характерным является локальный максимум значений АОТ для августа 2021 г. При сравнении многолетних сезонных вариаций АОТ по наземным и спутниковым данным (рис. 5, б) отмечаем близость значений АОТ для летнего и осеннего сезонов и значительное превышение АОТ по спутниковым данным над наземными данными для весенних месяцев. Нанесенные на графики значения СКО АОТ свидетельствуют о наибольшей вариации значений в летние месяцы, особенно в августе. Количество спутниковых измерений АОТ по ме-

сяцам за 2010–2021 гг. приведено на гистограмме рис. 5, б. Сравнение ежедневных (совпадающие даты) значений АОТ по наземным (AERONET CIMEL-318) и спутниковым ОМІ /AURA измерениям в п. Торы за 2010–2021 гг. показано на рис. 5, в.

В табл. 3 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена ρ_s между наземными (AERONET) и спутниковыми (ОМІ/Aura) измерениями АОТ в районе п. Торы. Коэффициенты корреляции Спирмена определялись на основе программы Attestat, находящейся в свободном доступе. Наибольший коэффициент корреляции принадлежит 2021 году и равен $\rho_s = 0.64$. Для 2012 г. число измерений для совпадающих дат равно 5, что недостаточно для определения корреляции данных, вследствие чего данные для 2012 г. не вошли в табл. 3.

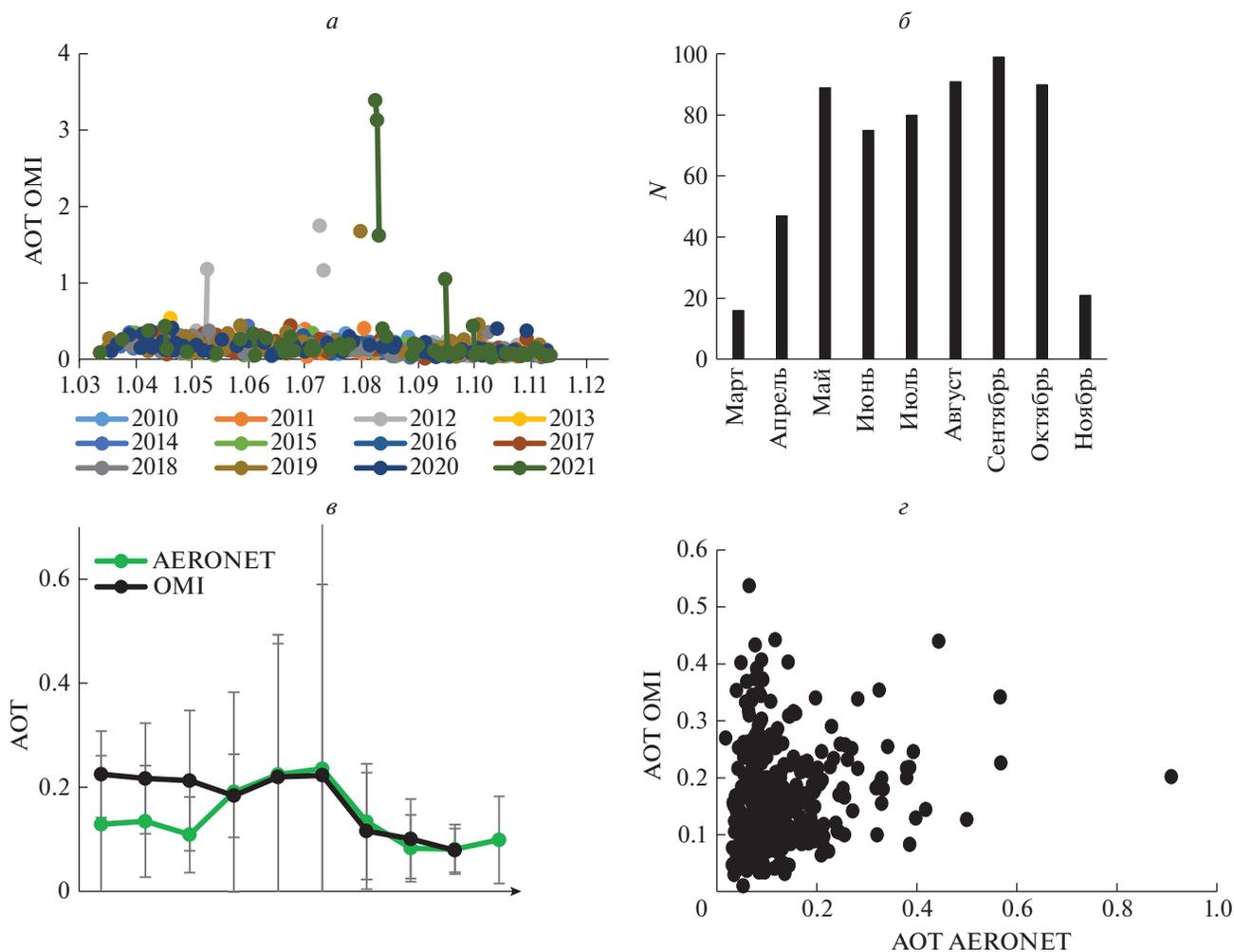


Рис. 5. Вариации АОТ по данным прибора OMI/Aura в 2010–2021 гг. (а), количество измерений *N* по месяцам (б), многолетние сезонные вариации АОТ с линиями СКО по наземным данным сети AERONET и спутниковым измерениям OMI в районе п. Торы (в), сравнение ежедневных (совпадающие даты) значений АОТ по наземным и спутниковым измерениям (г).

СПУТНИКОВАЯ ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ АОТ И СО В АТМОСФЕРЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ И БУРЯТИИ

Спутниковая оценка значений АОТ

Как отмечено во введении, Иркутская область и Бурятия принадлежат к территориям с высоким уровнем ЗА, и за последние годы по этому показателю находятся в России на 5 и 6 месте, соответ-

ственно. Рассмотрим изменение значений АОТ и СО за период 2010–2021 гг. для нескольких городов, входящих в список городов с высоким уровнем ЗА – это Иркутск, Зима, Вихоревка, Селенгинск, Улан-Удэ. Кроме этих городов, включим в исследование два города, находящихся в направлении на северо-восток от Братска, а именно, Железногорск-Илимский и Усть-Кут, отсутствующих в указанном списке. Вариации АОТ и СО

Таблица 3. Коэффициент корреляции Спирмена ρ_s между наземными и спутниковыми измерениями АОТ в районе п. Торы (Бурятия)

Год	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ρ_s	0.45	0.24	-0.05	0.36	0.35	0.43	0.25	0.19	-0.12	0.06	0.64
p-знач	0.01	0.11	0.42	0.08	0.01	0.02	0.03	0.08	0.25	0.35	0
N	29	28	19	16	44	25	60	55	36	46	53

Таблица 4. Сезонные максимумы значений АОТ

Город	Иркутск	Зима	Селенгинск	Улан-Удэ	Вихоревка	Железногорск-Илимский	Усть-Кут
АОТ	0.95	0.76	0.58	0.88	1.33	1.24	1.2
год/месяц	2012/7	2013/7	2016/7	2015/8	2016/7	2019/7	2019/7
АОТ	0.8	0.84	0.92	0.57	1.13	1.35	1.24
год/месяц	2021/8	2021/8	2021/8	2021/8	2021/8	2021/8	2021/8

для данных территорий определялись на основе системы анализа и визуализации данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). На рис. 6 показаны сезонные (рис. 6, а) и многолетние среднемесячные (рис. 6, б) значения АОТ за период 2010–2021 гг. для Иркутска, Селенгинска, Вихоревки и Железногорска-Илимского по данным прибора MODIS спутника Terra. Использовался продукт MOD08_M3 v6.1, ПР $1^\circ \times 1^\circ$, длина волны 550 нм. Для Зимы графики значений АОТ схожи с соответствующими графиками для Иркутска, графики АОТ для Улан-Удэ схожи с графиками для Селенгинска, графики для Усть-Куты схожи с графиками для Железногорска-Илимского.

Рассматриваемые территории по вариациям значений АОТ можно разделить на две группы: 1 – Иркутск, Зима, Селенгинск, Улан-Удэ, 2 – Вихоревка, Железногорск-Илимский, Усть-Кут. Общим для этих двух групп является типичное сезонное поведение АОТ, а именно, рост значений для летнего сезона и достижение максимальных значений АОТ в июле–августе (Тащилин и др., 2021). В табл. 4 приведены для каждого пункта два наибольших среднемесячных значения АОТ за период 2010–2021 гг. Отличие состоит в максимальных сезонных значениях АОТ, которые для первой группы не превышают 1, для второй группы больше 1. Отметим, что для Якутска в период лесных пожаров 2021 г., максимальное среднемесячное значение АОТ было порядка 1.2 в июле и порядка 1 в августе (Родионова, 2022).

Многолетние среднемесячные значения АОТ для этих групп также различаются (рис. 7, а), а именно, для первой группы (сплошные линии) максимальные значения не превышают 0.3, для второй группы (пунктирные линии) достигают 0.5.

Для межгодовых вариаций АОТ (среднее с мая по октябрь) (рис. 7, б) характерно зигзагообразное поведение с локальными максимумами АОТ для всех рассматриваемых пунктов в 2016, 2019 и 2021 гг. и локальными минимумами в 2010, 2017 и 2020 гг. Отметим уменьшение межгодового значения АОТ для Иркутска с 0.278 в 2012 г. до 0.14 в 2020 г. (почти в 2 раза), что среди прочего могло послужить основанием перевода Иркутска из категории городов с очень высоким уровнем ЗА в категорию городов с высоким уровнем загрязнения. Однако в 2021 г. межгодовое значение АОТ для Иркутска выросло и составляло 0.22.

Спутниковая оценка значений содержания в атмосфере угарного газа

В табл. 1 для городов с высоким уровнем ЗА (Иркутск, Зима, Вихоревка) среди веществ, определяющих это загрязнение, присутствует угарный газ, поступающий в атмосферу в результате процессов горения. В данной работе приведены вариации общего содержания СО в атмосфере за 2010–2020 гг. для этих пунктов и некоторых других, рассмотренных выше. Значения общего содержания СО в атмосфере получены по измерениям прибора МОРПТТ спутника Terra (NASA/LARC/SD/ASDC, 2000). Прибор МОРПТТ (Measurements of Pollution in the Troposphere) осуществляет надирные измерения в ИК диапазоне 4.7 и 2.2–2.4 мкм с ПР в горизонтальной плоскости 22 км. Измерения МОРПТТ представлены на сайте системы анализа и визуализации данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>), где эти данные приведены по март 2021 года. Использовался объединенный продукт МОРПТТ TIR+NIR (тепловой и ближний ИК) Multispectral CO Total Column МОР03JM v008 со среднемесячными данными, осредненными по площадке с исследуемым пунктом в центре. Выбор объединенного продукта связан с тем, что на основе результатов работы (Трифопова-Яковлева и др., 2021) мультиспектральный продукт дает лучшее согласие с наземными измерениями.

На рис. 8, а приведены графики сезонных вариаций общего содержания СО в столбе атмосферы (ОССОСА) для Иркутска, Вихоревки и Селенгинска за период 2010–2021 гг. и на рис. 8, б – графики многолетних среднемесячных значений с отклонением от среднего значения. Сезонный ход по многолетним среднемесячным значениям ОССОСА имеет максимум весной: в апреле для Иркутска и Вихоревки и в мае для Селенгинска. Далее происходит уменьшение значений с локальным минимумом в июне, июле и локальным максимумом в августе для городов вблизи Байкала. Осенью происходит уменьшение значений с минимумом в октябре и последующим ростом значений для зимы. Данный сезонный ход имеет отдельные сходства с приведенным графиком (для месяцев с марта по сентябрь) в работе (Трифопова-Яковлева и др., 2021) для района Екатеринбург с максимумом весной (апрель) и минимумом в июне. Отличием является рост значений

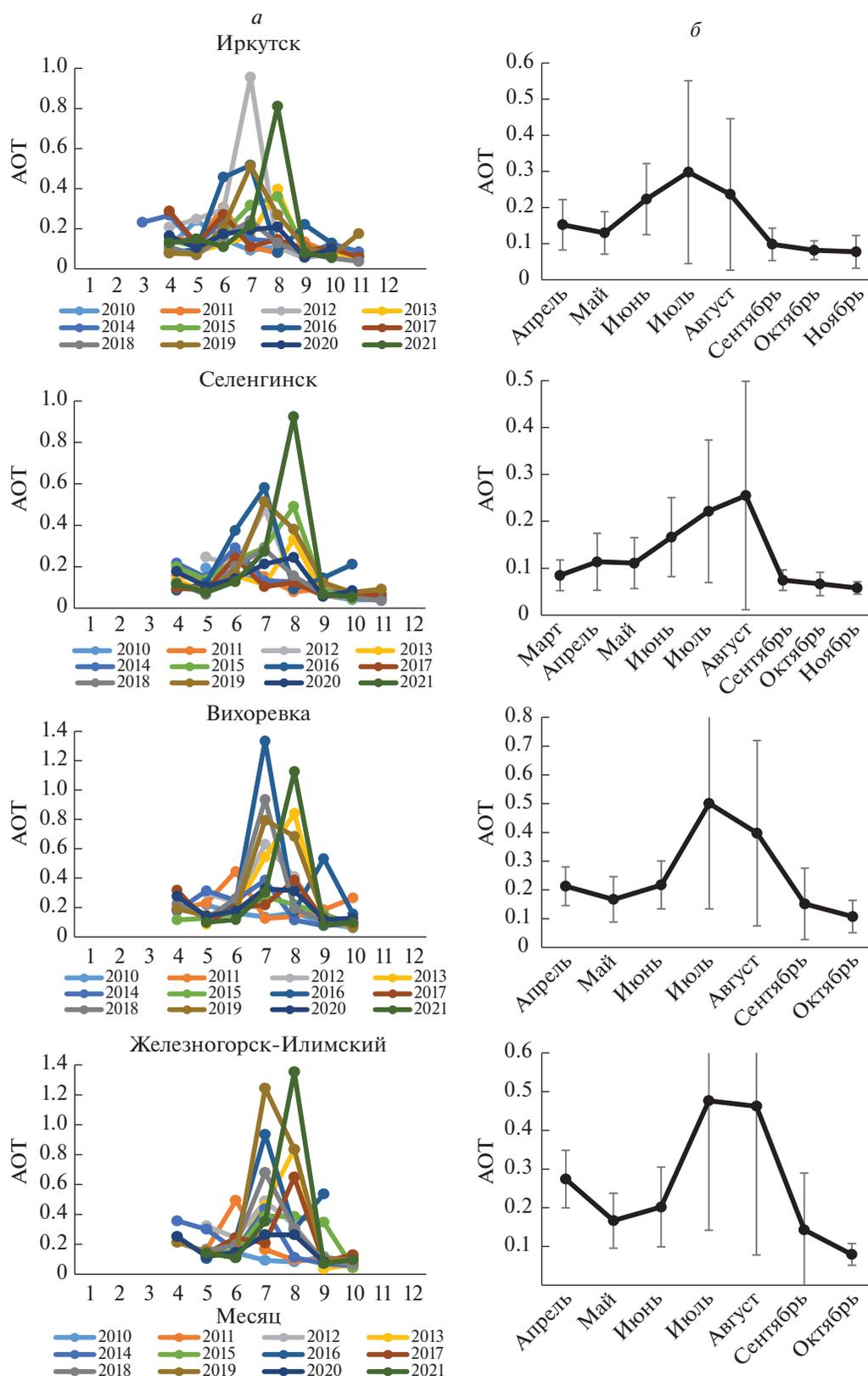


Рис. 6. Сезонные и многолетние среднемесячные значения АОТ.

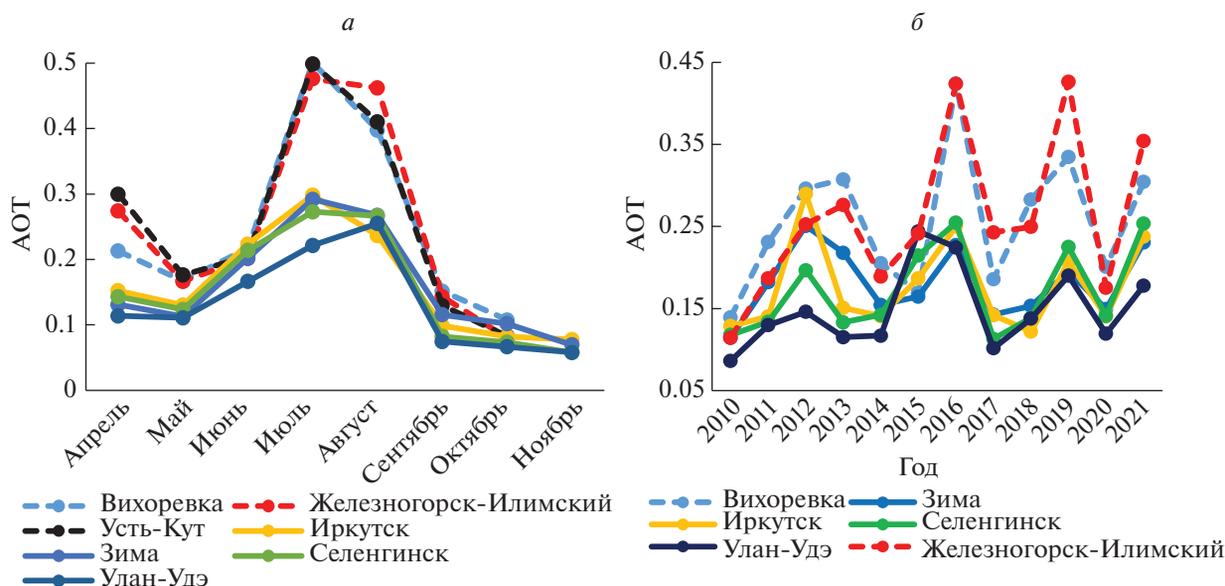


Рис. 7. Многолетние среднемесячные значения и межгодовые вариации АОТ для нескольких городов Иркутской области и Бурятии.

общего содержания СО в столбе атмосферы в сентябре (Екатеринбург), тогда как для Иркутской области происходит уменьшение значений. Следует отметить абсолютный максимум сезонных значений ОССОСА для Селенгинска, равный 3.75×10^{18} мол/см² для августа 2015 г. и многолетний сезонный максимум ОССОСА для мая $(2.57 \pm 0.37) \times 10^{18}$ мол/см². В первом случае максимум связан с аномальными лесными пожарами весной–летом 2015 г. в Байкальском регионе (Родионова, 2016). По многолетним сезонным значениям ОССОСА вторым по максимуму является Иркутск со значением в апреле $(2.36 \pm 0.24) \times 10^{18}$ мол/см². Для Вихоревки соответствующее значение ОССОСА составляет $(2.27 \pm 0.07) \times 10^{18}$ мол/см² для апреля.

Межгодовые вариации ОССОСА для рассмотренных территорий показаны на рис. 9. Для Иркутска есть заметный отрицательный тренд в 0.2×10^{18} мол/см² с 2010 по 2020 г. с малыми вариациями межгодовых значений за последние три года. Это один из показателей, позволивший вывести Иркутск из категории городов с очень высоким уровнем ЗА. Для Вихоревки есть слабый отрицательный тренд для межгодовых вариаций ОССОСА, однако отмечен заметный рост на 0.1×10^{18} мол/см² с 2019 по 2020 г. Для Селенгинска межгодовые тренды не отмечены при наличии абсолютного максимума значений ОССОСА в 2015 г. Для Железногорска-Илимского также не отмечены межгодовые тренды значений ОССОСА, но, как и для Вихоревки, есть заметный рост с 2019 по 2020 г. ОССОСА на 0.14×10^{18} мол/см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определены сезонные и межгодовые вариации аэрозольной оптической толщи и общего содержания угарного газа в столбе атмосферы за период 2010–2021 гг. по данным приборов MODIS и MOPITT спутника Terra для нескольких городов Иркутской области и Бурятии, входящих в список городов с высоким уровнем загрязнения атмосферы. Для Иркутска показано уменьшение межгодового значения АОТ с 0.278 в 2012 г. до 0.14 в 2020 г. с общим отрицательным трендом. Однако в 2021 г. межгодовое значение АОТ для Иркутска выросло и составляло 0.22. Для Иркутска показан отрицательный тренд для межгодовых вариаций общего содержания СО в столбе атмосферы. Рассматриваемые территории по вариациям АОТ можно разделить на две группы: 1 – города Иркутск, Зима, Селенгинск, Улан-Удэ, 2 – Вихоревка, Железногорск-Илимский, Усть-Кут. Общим для этих двух групп является типичное сезонное поведение АОТ, а именно, рост значений для летнего сезона и достижение максимальных значений АОТ в июле-августе. Отличие состоит в сезонных максимумах значений АОТ, которые для первой группы не превышают 1, для второй группы больше 1. Многолетние среднемесячные значения АОТ для этих групп также различаются, а именно, для первой группы максимальные значения АОТ не превышают 0.3, для второй группы достигают 0.5.

В работе определены аэрозольные оптические характеристики атмосферы (АОТ, параметр Ангстрема, функция распределения частиц аэрозоля по размеру, комплексный параметр преломления частиц) по наземным измерениям фотометром

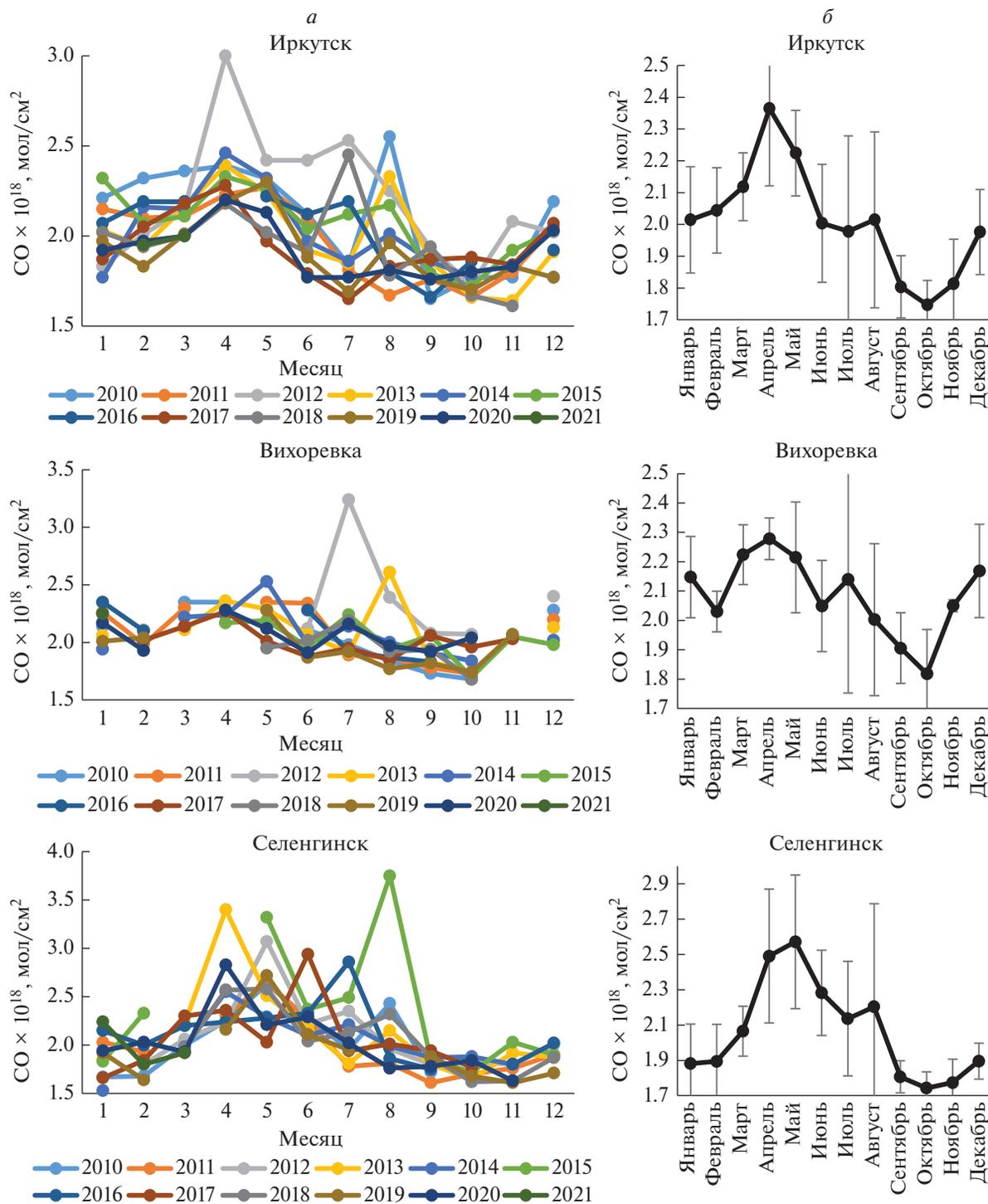


Рис. 8. Сезонные и многолетние сезонные вариации ОССОСА за 2010–2020 гг.

SIMEL в п. Торы (Бурятия), входящем с систему сети AERONET. Многолетние за период 2010–2021 гг. сезонные вариации АОТ по наземным измерениям показали максимум в августе. При сравнении многолетних сезонных вариаций АОТ по наземным (AERONET) и спутниковым OMI/Aura данным отмечена близость значений

АОТ для летнего и осеннего сезонов и значительное превышение АОТ по спутниковым данным над наземными измерениями для весенних месяцев. Наибольший коэффициент корреляции Спирмена между наземными и спутниковыми измерениями АОТ принадлежит 2021 г. и равен $\rho_s = 0.64$.

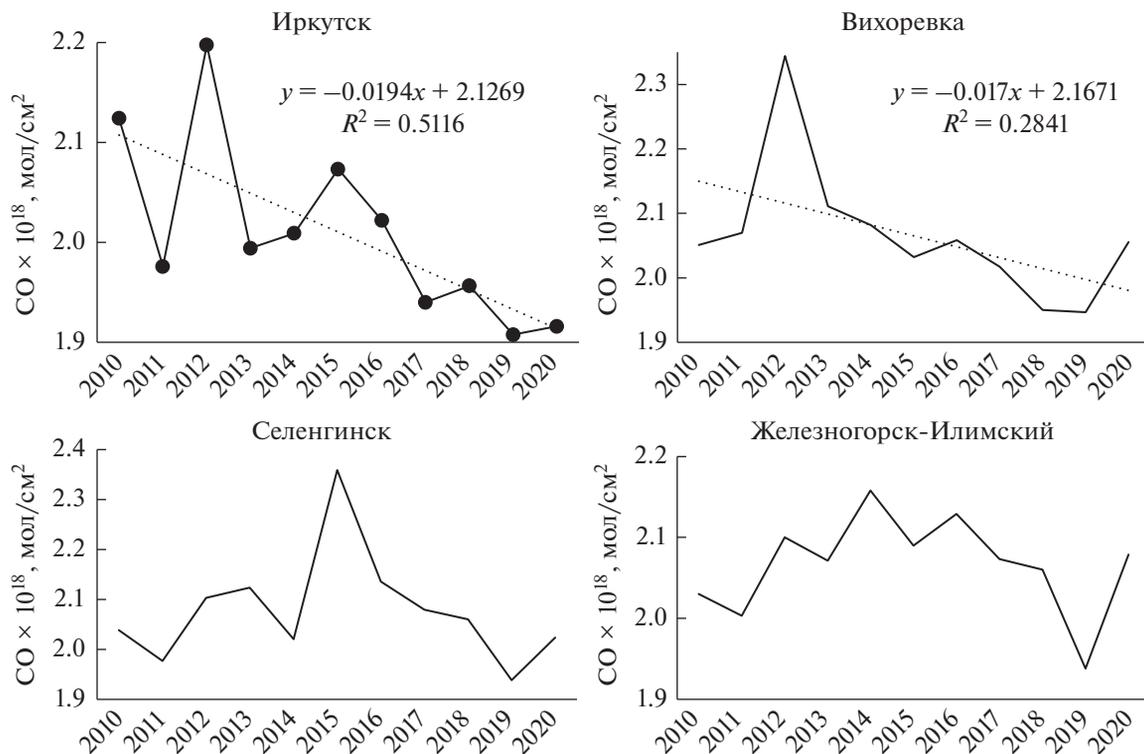


Рис. 9. Межгодовые вариации ОССОСА для периода 2010–2020 гг.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по теме “Космос”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. Вариации параметров пылевого аэрозоля в Душанбе по данным AERONET // https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/030/50030162.pdf.

Волкова К.А., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I. Аэрозольные оптические характеристики по данным измерений солнечного фотометра CIMEL (AERONET) вблизи Санкт-Петербурга // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. 31. № 6. С. 425–431.

<https://doi.org/10.15372/AOO20180601>

Родионова Н.В. Возможность обнаружения гарей по разновременным радарным изображениям SENTINEL 1 для районов юга Сибири в сезон весна–лето 2015 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 2. С. 164–175.

Родионова Н.В. Вариации аэрозольной оптической толщи, черного углерода, угарного газа и метана по спутниковым наблюдениям атмосферы в сезон лесных пожаров в районе Якутска в 2013–2021 гг. // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 2. С. 232–242.

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-232-242>

Тащилин М.А., Яковлева И.П., Сакерин С.М. Пространственно-временные вариации аэрозольной оптической толщи в Байкальском регионе // *Соврем. пробл.*

ДДЗ из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 219–226.

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-219-226>

Трифоновна-Яковлева А. М., Чеснокова Т.Ю., Ченцов А.В., Захаров В.И., Рокотян Н.В. Сравнение содержания монооксида углерода в атмосфере по наземным и спутниковым измерениям // http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/19/8814_ИКИ2021.pdf.

Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 20673–20696.

Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B.N., Mishchenko M., Yang P., Eck T.F., Volten H., Muñoz O., Veihelmann B., Wim J. van der Zande, Jean-Francois Leon, Sorokin M., Slutsker I. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D11208.

<https://doi.org/10.1029/2005JD006619>

Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D24. P. 31333–31350.

Giles D.M., Holben B.N., Eck T.F., Sinyuk A., Smirnov A., Slutsker I., Dickerson R.R., Thompson A.M., Schafer J.S. An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D17203.

<https://doi.org/10.1029/2012JD018127>, 2012. 1–18.

NASA/LARC/SD/ASDC. 2000. MOPITT Derived CO (Thermal Infrared Radiances) V008 [Data set]. NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC. Retrieved from https://doi.org/10.5067/TERRA/MOPITT/MOP02T_L2.008

Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. 1–14. D07207. <https://doi.org/10.1029/2005JD006328>.

Optical Characteristics of Aerosol and Carbon Monoxide Content in the Atmosphere over the Irkutsk Region and Buryatia in 2010–2021

N. V. Rodionova

Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Moscow Region, Fryazino, Russia

Seasonal and interannual variations of the aerosol optical depth (AOD) and the total carbon monoxide content in the atmospheric column have been determined by measurements of the MODIS and MOPITT instruments of the Terra satellite for several cities of the Irkutsk region and Buryatia with high level of atmospheric pollution for the period 2010–2021. For Irkutsk, a decrease of AOD interannual value from 0.278 in 2012 to 0.14 in 2020 with a general negative trend is shown. However, in 2021, the interannual AOD value for Irkutsk increased to 0.22. For Irkutsk, a negative trend of interannual variations in the total CO content in the atmospheric column is shown. When comparing the long-term seasonal variations of AOD according to ground measurements by CIMEL photometer in Tory (Buryatia), and the OMI/Aura satellite data, it was shown the proximity of AOD values for the summer and autumn seasons and a significant excess of AOT according to satellite data over ground measurements for the spring months. The largest Spearman correlation coefficient between ground and satellite measurements of AOD belongs to 2021 and is equal to $\rho_s = 0.64$.

Keywords: ground and satellite measurements, aerosol optical depth, carbon monoxide total column, atmospheric pollution, spearman correlation coefficient

REFERENCES

- Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I.* Variacii parametrov pylevogo aerolya v Dushanbe po dannym AERONET [Variations of dust aerosol parameters in Dushanbe according to AERONET data] // https://inis.iaea.org/Collection/NCLCollectionStore/_Public/50/030/50030162.pdf. (In Russian).
- Dubovik O., King M.D.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* 2000. 105, 20673–20696.
- Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B.N., Mishchenko M., Yang P., Eck T.F., Volten H., Munoz O., Veihelmann B., Wim J. van der Zande, Jean-Francois Leon, Sorokin M., Slutsker I.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D11208. <https://doi.org/10.1029/2005JD006619>
- Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S.* Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D24. P. 31333–31350.
- Giles D.M., Holben B.N., Eck T.F., Sinyuk A., Smirnov A., Slutsker I., Dickerson R.R., Thompson A.M., Schafer J.S.* An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. 1–18. D17203. <https://doi.org/10.1029/2012JD018127>.
- NASA/LARC/SD/ASDC. 2000. MOPITT Derived CO (Thermal Infrared Radiances) V008 [Data set]. NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC. Retrieved from https://doi.org/10.5067/TERRA/MOPITT/MOP02T_L2.008
- Rodionova N.V.* Vozmozhnost' obnaruzheniya garej po raznovremennym radarnym izobrazheniyam SENTINEL 1 dlya rajonov yuga Sibiri v sezon vesna-letno 2015 [Evaluation of Sentinel 1 imagery for burned area detection in southern Siberia in spring and summer 2015] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. V. 13. № 2. P. 164–175. (In Russian).
- Rodionova N.V.* Variacii aerolya opticheskoy tolshchi, chernogo ugleroda, ugarnogo gaza i metana po sputnikovym nablyudeniyam atmosfery v sezon lesnykh pozharov v rajone YAKUTSKA v 2013–2021 gg. [Variations of aerosol optical depth, black carbon, carbon monoxide and methane from satellite observations of the atmosphere during the forest fire season in the Yakutsk region in 2013–2021] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. V. 19. № 2. P. 232–242. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-232-242>
- Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N.* Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. 1–14. D07207. <https://doi.org/10.1029/2005JD006328>
- Tashchilin M.A., Yakovleva I.P., Sakerin S.M.* Prostranstvenno-vremennye variacii aerolya opticheskoy tolshchi v Bajkal'skom regione [Spatio-temporal variations of the aerosol optical depth in the Baikal region] // *Sovrem. probl. DDZ iz kosmosa*. 2021. V. 18. № 1. P. 219–226. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-219-226>
- Trifonova-Yakovleva A.M., Chesnokova T.YU., Chencov A.V., Zaharov V.I., Rokotyan N.V.* Sravnenie sodержaniya monooksida ugleroda v atmosfere po nazemnym i sputnikovym izmereniyam [Comparison of carbon monoxide content in the atmosphere by ground and satellite measurements] // http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/19/8814_I-KI2021.pdf. (In Russian).
- Volkova K.A., Poberovskij A.V., Timofeev YU.M., Ionov D.V., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I.* Aerolya opticheskie karakteristiki po dannym izmerenij solnechnogo fotometra CIMEL (AERONET) vblizi Sankt-Peterburga [Aerosol optical characteristics according to measurements of the CIMEL solar photometer (AERONET) near St. Petersburg] // *Optika atmosfery i okeana*. 2018. V. 31. № 6. P. 425–431. (In Russian). <https://doi.org/10.15372/AOO20180601>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЛИСТОВЫМ ИНДЕКСОМ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

© 2023 г. С. А. Лысенко*

Государственное научное учреждение “Институт природопользования НАН Беларуси”, Минск, Беларусь

*E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Поступила в редакцию 01.09.2022 г.

С использованием данных дистанционного зондирования Земли за 2000–2020 гг. получены количественные оценки влияния процессов деградации растительного покрова на скорость летнего потепления в Беларуси. Средний листовой индекс Беларуси за рассматриваемый период увеличился на 3.3%, главным образом за счет лесных массивов, для которых его увеличение составило около 8%. Рост листового индекса примерно вдвое замедлил летнее потепление лесных земель на севере (выше 54° с.ш.) и более чем на четверть – на юге Беларуси. Одновременно с этим листовым индексом пахотных земель снизился примерно на 5%, что вызвало их дополнительное потепление и усилило внутрисуточные колебания температуры подстилающей поверхности в летний период. Показано, что ряд территорий Беларуси общей площадью около 400 тыс. га имеют статистически достоверные признаки биоклиматической деградации, которые усиливаются высокими значениями положительной обратной связи между температурой, растительным покровом и почвенной влагой. Среди земель с признаками биоклиматической деградации 58% – это земли сельскохозяйственного назначения, расположенные преимущественно в южной части страны. На этих землях летнее потепление происходит в 2 раза быстрее чем в среднем по стране, а их листовой индекс понижается со скоростью около 2% за год, что указывает на недостаточность мер по адаптации сельского хозяйства к изменению климата, предпринимаемых в отдельных районах Беларуси.

Ключевые слова: изменение климата, деградация земель, листовой индекс, температура подстилающей поверхности, обратные связи

DOI: 10.31857/S0205961423010074, **EDN:** MMXAKY

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы изменения биологической продуктивности наземных экосистем и деградации земель в результате глобального потепления в последние годы активно обсуждаются в научной литературе и ежегодно отражаются в международных и национальных докладах по климатической повестке (Shukla et al. 2019; Национальный доклад, 2019; Burrell et al., 2020). Если в целом для планеты отчетливо отмечается тенденция “глобального озеленения”, связанная главным образом с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере (CO₂ как удобрение) и естественным зарастанием многих заброшенных земель (Liu et al., 2015; Zhu et al., 2016; Chen et al., 2019; Rasul et al., 2020), то на региональном уровне негативные последствия изменения климата (увеличение частоты экстремальных погодных явлений, возрастание риска возникновения лесных пожаров, ухудшение гидрологического режима почв и др.) могут нивелировать в целом положительный биосферный эффект CO₂ (Shukla et al. 2019; Burrell et al., 2020; Jiao

et al. 2021; Liu et al., 2021; Duffy et al., 2021; Lesk et al., 2021). В свою очередь потеря или сокращение растительного покрова приводят к существенным изменениям радиационного и турбулентного теплообмена между атмосферой и подстилающей поверхностью, что сопровождается изменениями температуры воздуха, скорости ветра, облачности и осадков (Золотокрылин, 2003; Heilmann, Reichstein, 2008; Xu et al., 2013; Green et al., 2017; Babst et al., 2019; Zhang et al., 2022). Помимо этого, при своде растительности (например, в результате урбанизации и развития сельского хозяйства) существенным образом изменяется соотношение между атмосферным, поверхностным и внутрипочвенным стоками дождевых и талых вод, что часто проявляется на региональном уровне в уменьшении увлажненности почвы и понижении уровня грунтовых вод (Рахманов, 1984; Воронков, 1988).

Известно, что с ростом температуры увеличивается дефицит влажности воздуха и потенциальное испарение (испаряемость), в результате чего в

регионах, где потепление сопровождается незначительным изменением атмосферных осадков или даже их уменьшением, происходит систематическое иссушение почвы и повышается риск возникновения засух. К таким регионам в настоящее время можно отнести юго-восточную часть Беларуси, где преобладают легкие песчаные и супесчаные почвы, не способные эффективно удерживать влагу. Среднее для Беларуси значение индекса аридности, определяемого как отношение годовой суммы осадков к потенциальному испарению, с 1979 по 2020 г. уменьшилось на 30% и в современный период составляет примерно 0,8, что соответствует превышению потенциального испарения над осадками на 20%. В современный период годовая испаряемость превалирует над осадками практически на всей территории Брестской и Гомельской областей Беларуси (Логинов и др., 2020).

Особенно уязвимым перед изменениями климата оказалось Белорусское Полесье, которое в 1960–1970-е гг. подверглось ширококомасштабной осушительной мелиорации с целью вовлечения заболоченных земель в сельскохозяйственный оборот. Последующее интенсивное использование осушенных торфяно-болотных почв под пашню привело к быстрой потере ими торфяного горизонта и выходу на поверхность подстилающих песков. Помимо этого, в результате мелиорации произошло существенное понижение уровня грунтовых вод и обмеление малых рек на прилегающих к болотам землях. Климат мелиорированных территорий в целом стал более экстремальным: увеличилась продолжительность и интенсивность засух и заморозков, повторяемость зим с низкими температурами и малой высотой снежного покрова, повысилась продолжительность периодов с высокой температурой воздуха и т.д. (Логинов, 2008).

Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем Беларуси подробно исследовано в работах (Лысенко, 2019; Логинов и др., 2021; Лысенко и др., 2022). Показано, что в современный период главным фактором, ограничивающим рост биопродуктивности наземных экосистем Беларуси, является количество атмосферных осадков. Территория Полесья по своим биоклиматическим характеристикам в настоящее время относится к зоне с избыточными для местных биогеоценозов ресурсами тепла и солнечной радиации, но недостаточными ресурсами влаги. Рост температуры и усиление засушливости климата в этом регионе оказывают крайне негативное влияние на биопродуктивность местных экосистем, приводя к потерям запасов в них углерода со скоростью около 750000 т/год (Лысенко и др., 2022). Особенно остро это проявляется в отношении биологической продуктивности пахотных земель, листовой индекс которых

согласно данным дистанционного зондирования Земли понижается со скоростью до 2% в год (Логинов и др., 2021).

Обратные связи структуры землепользования и температуры воздуха изучались в работах (Горный и др., 2022; Шинкаренко и др., 2020, Шинкаренко и др., 2021) на примерах различных муниципальных образований Северной Евразии. В отмеченных работах было подробно исследовано влияние площади различных типов подстилающей поверхности и их вегетационных индексов на температуру воздуха, рассчитаны соответствующие коэффициенты корреляции и их сезонный ход, что в целом дает понимание важной роли растительного покрова подстилающей поверхности в наблюдаемых изменениях климата на региональном уровне.

В настоящей статье представлены результаты исследований обратных связей долгопериодных изменений температуры подстилающей поверхности (LST, Land Surface Temperature) и листового индекса (LAI, Leaf Area Index) на территории Беларуси. На основе данных дистанционного зондирования Земли проанализированы тренды LST и LAI для различных типов подстилающей поверхности и получены оценки регионального потепления, связанного с деградацией почвенно-растительного покрова. Выявлены закономерности долгопериодных изменений дневной и ночной температур, а также амплитуды суточного хода LST для лесных массивов и земель сельскохозяйственного назначения. Выделены регионы с высоким уровнем значимости трендов LST и LAI и наиболее сильным проявлением положительных обратных связей между ними.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы для проведения исследования использовались информационные продукты LST (MOD11A2) и LAI (MCD15A2H) спутникового спектрометра MODIS, имеющего достаточно длинный ряд наблюдений (с 2000 г.) и сравнительно высокое качество данных (Duan et al., 2019; Fang et al., 2021). Исходные данные MODIS представлены в виде 8-дневных композитных карт с пространственным разрешением 1 км для LST и 0,5 км для LAI. Оба информационных продукта MODIS для удобства их сопоставления приведены к единому пространственному разрешению 1 км и осреднены за летние месяцы каждого года.

На основе агрегированных для летнего периода карт MODIS рассчитаны пространственные распределения коэффициентов линейных трендов LST и LAI, характеризующих период с 2000 по 2020 гг. Статистическая достоверность трендов

оценивалась по стандартному двустороннему тесту Стьюдента при выбранном уровне значимости p .

Для классификации подстилающей поверхности использовалась глобальная схема классификации растительности IGBP, также основанная на данных прибора MODIS – база данных MODIS Land Cover Type (Friedl et al., 2010). Она включает 17 классов подстилающей поверхности, из которых 11 классов естественной растительности, 3 антропогенных и мозаичных земельных класса и 3 класса не относящихся к растительности. Современная пространственная структура ландшафтов Беларуси согласно данным MODIS Land Cover Type представлена семью типами подстилающей поверхности: ENF – вечнозеленые хвойные леса, DBF – листопадные широколиственные леса, MF – смешенные леса, GRA – луга, CRO – пашни, WSA – лесостепи, SAV – степи. В категорию “лесостепи” попадают низинные болота с преимущественно древесно-кустарниковой растительностью и многие заброшенные территории, которые в настоящее время подвергаются облесению (например, выработанные торфяники и зоны вырубki леса). К категории “степи” относятся пойменные луга, а также заброшенные сельскохозяйственные земли, на которых облесение пока что не началось.

Статистический анализ прямых и обратных связей между LST и LAI для каждого типа подстилающей поверхности проводился с учетом административно-территориального деления Беларуси, включающего 118 административных единиц базового уровня (районов). Для каждого типа подстилающей поверхности, встречающегося в пределах каждого района, строились регрессионные зависимости между LST и LAI, на основе которых оценивалась чувствительность LST к LAI. С использованием установленных зависимостей рассчитывалось изменение температуры подстилающей поверхности, вызванное изменением листового индекса за период с 2000 по 2020 гг., и, таким образом, количественно оценивалась роль деградации растительного покрова в летнем потеплении на территории Беларуси.

ИЗМЕНЕНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗА ПЕРИОД С 2000 ПО 2020 ГОДЫ

Карты изменений листового индекса, а также температуры подстилающей поверхности (дневной, ночной и амплитуды ее суточного хода), построенные для территории Беларуси на основе коэффициентов линейных трендов LST и LAI за 2000–2020 гг., приведены на рис. 1.

Анализ пространственного распределения тренда LAI показывает, что листовый индекс для территории Беларуси за 2000–2020 гг. в среднем увеличился на 3.3%, главным образом за счет лесных массивов, для которых среднее увеличение LAI составило около 8%. Стоит отметить, что рост LAI в последние десятилетия отмечается не только в Беларуси, но и в глобальных масштабах, что во многом связано с ростом концентрации CO₂ в атмосфере (Liu et al., 2015; Zhu et al., 2016; Chen et al., 2019; Rasul et al., 2020). В тоже время для земель Беларуси, относящихся к категории пахотных, листовый индекс за отмеченные годы снизился примерно на 5%, что также имеет объяснение с учетом наблюдаемого усиления засушливости климата Беларуси и недостаточно быстрого реагирования на него сельскохозяйственных технологий.

В целом рост LAI отмечается на 64% общей площади Беларуси. На 17.5% площади Беларуси рост LAI является статистически достоверным при уровне значимости $p = 0.05$. Доля земель со статистически значимым понижением LAI составляет лишь 5%.

Для лесных массивов рост LAI наблюдается примерно на 84.5% их общей площади, причем на 25% их площади рост LAI можно считать статистически значимым ($p = 0.05$). Статистически достоверное снижение LAI отмечается всего лишь для 0.7% общей площади лесных массивов.

Для пахотных земель ситуация с изменением LAI обратная: отрицательным трендом LAI охвачено примерно 63% их общей площади, а статистически значимым отрицательным трендом – 11.5%. Доля пахотных земель со статистически значимым ростом LAI составляет менее 4%.

Стоит отметить, что в современный период территорию Беларуси по своим биоклиматическим характеристикам можно условно разделить на две принципиально различающиеся зоны: северную (выше 54° с.ш.) и южную (ниже 54° с.ш.) (Лысенко и др., 2022). В северной зоне рост продуктивности наземных экосистем пока еще сдерживается недостатком среднегодового количества тепла, а южная зона, напротив, характеризуется избытком тепла, но недостатком влаги для местных биогеоценозов. Негативное влияние изменений климата на агроценозы наиболее сильно проявляется в южной биоклиматической зоне Беларуси: листовый индекс пахотных земель за 2000–2020 гг. здесь уменьшился в среднем на 6.6%, тогда как в северной зоне он практически не изменился (+0.02%). Изменения листового индекса лесных земель в отмеченных биоклиматических зонах Беларуси не демонстрируют столь существенных различий: +9.3% в северной зоне и +7.0% южной, что свидетельствует о гораздо

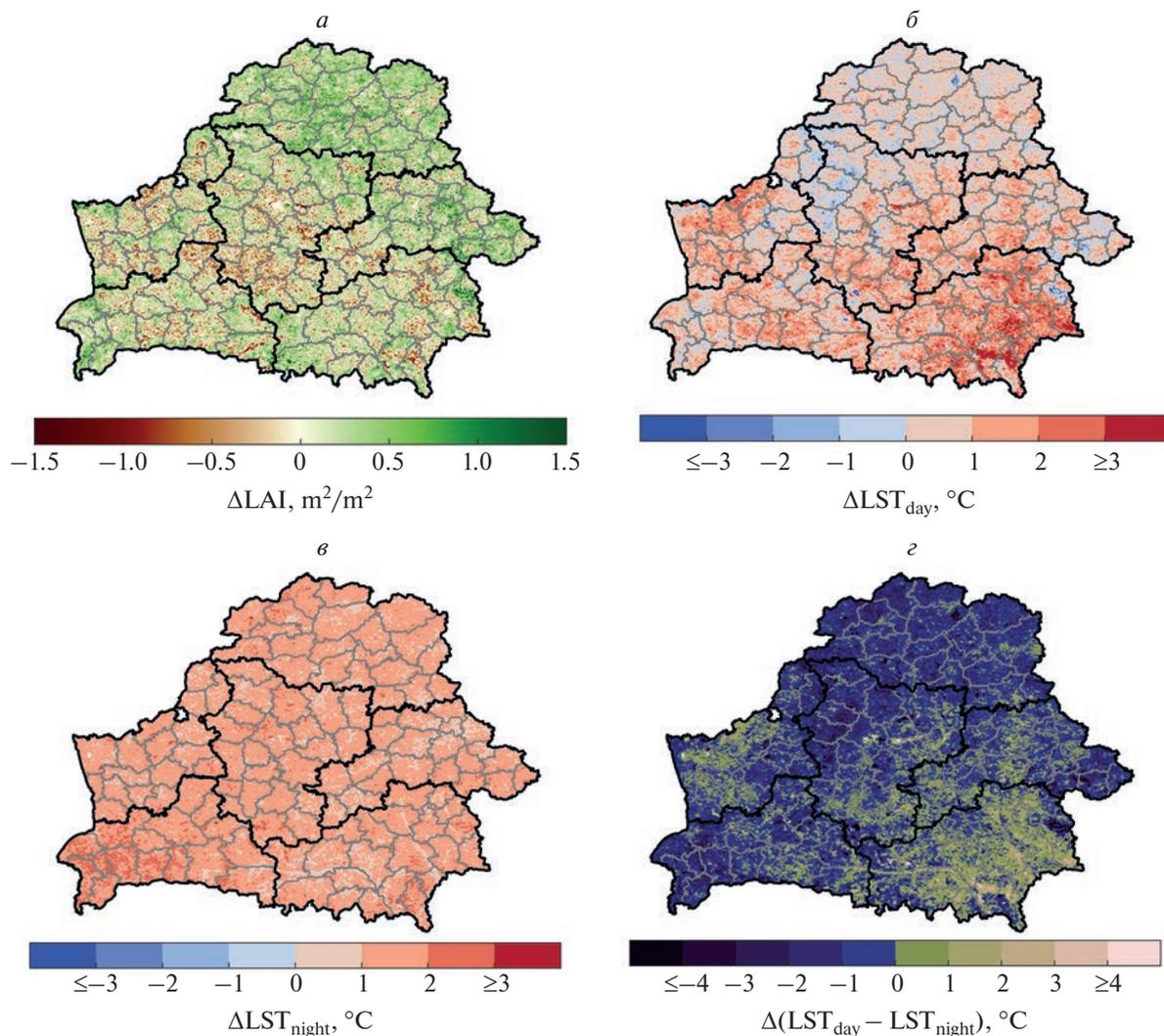


Рис. 1. Карты изменений листового индекса (а), дневной LST (б), ночной LST (в) и амплитуды суточного хода LST (г) на территории Беларуси за 2000–2020 гг.

большей устойчивости лесных экосистем к изменению климата по сравнению с агроценозами.

Средняя для летнего сезона ночная температура подстилающей поверхности растет практически равномерно на всей территории Беларуси со средней скоростью $0.066^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (б), что на 65% опережает скорость потепления в дневное время суток ($0.04^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Скорость ночного потепления в северной и южной биоклиматических зонах Беларуси различается всего на 7.5%, а ее среднее различие для лесов и сельхозугодий составляет лишь 3.6%. Для сравнения, средняя скорость дневного потепления для отмеченных биоклиматических зон отличается в 1.8 раз, а для различных типов подстилающей поверхности — более чем в 3 раза.

Отмеченное различие темпов ночного и дневного потепления характерно для всего северного

полушария и, предположительно, связано с суточным ходом толщины пограничного слоя атмосферы (Davy et al., 2017). В ночное время суток, когда в результате радиационного выхолаживания подстилающей поверхности повышается устойчивость атмосферы и ослабляется турбулентный обмен, пограничный слой имеет минимальную толщину и поэтому гораздо легче прогревается за счет парникового эффекта, чем в дневные часы. В связи с этим парниковое потепление в ночные часы характеризуется гораздо большей интенсивностью и пространственной однородностью чем в дневное время суток.

Пространственное распределение тренда дневной LST определяется влиянием на нее не только парниковых газов, но и ряда других факторов, в первую очередь, альбедо и эвапотранспирации, регулирующих радиационный и тепловой баланс

подстилающей поверхности. Сравнивая пространственные распределения трендов дневной LST и LAI, можно заметить, что наибольший рост LST происходит в регионах с интенсивным понижением LAI, вызванным как хозяйственной деятельностью (вырубки леса), так и воздействием экстремальных погодных явлений (шквалистый ветер, засухи и др.).

За последние 20 лет наибольшее летнее потепление отмечалось на юго-востоке Беларуси (Гомельская область), что можно отчетливо видеть на карте коэффициента линейного тренда дневной LST (рис. 1, б). В почвенном покрове этого региона преобладают легкие песчаные почвы с невысокой влагоудерживающей способностью и низкой теплоемкостью. Дневная LST в Гомельской области за период с 2000 по 2020 годы в среднем увеличилась на 1.56°C , тогда как в остальной части Беларуси рост дневной LST в среднем составил 0.68°C . Для пахотных земель Гомельской области рост дневной LST еще более существен: $+2.24^{\circ}\text{C}$ с начала текущего столетия. Амплитуда суточного хода LST в этом регионе за рассматриваемый период увеличилась в среднем на 0.23°C , а для пахотных земель — на 0.85°C , тогда как в остальной части Беларуси амплитуда суточного хода LST в среднем уменьшилась на 0.71°C . Главной причиной аномального изменения амплитуды суточного хода LST на юго-востоке Беларуси, по-видимому, является усиление засушливости климата этого региона. Местные песчаные почвы легко прогреваются солнечной радиацией днем и быстро выхолаживаются ночью, причем с уменьшением увлажненности почвы эти процессы усиливаются. В результате рост дневных температур на юго-востоке Беларуси опережает рост ночных, что в некоторой степени противоречит общим особенностям парникового потепления (Davy et al., 2017).

На рис. 2 представлены временные ряды средней для Гомельской области Беларуси амплитуды суточного хода температуры различных типов подстилающей поверхности (летний период). Во все засушливые годы, и в особенности в 2002 и 2015 гг., когда в Беларуси отмечались наиболее сильные летние засухи, амплитуда суточного хода LST была значительно выше ее среднего значения: на 16–24% в 2002 г. и на 21–33% в 2015 г. В засушливые годы увеличение средней амплитуды суточного хода LST для Гомельской области доходило до 2.5°C . Так, в 2015 году средняя дневная LST в Гомельской области была на 2.0°C выше нормы, а ночная LST — на 0.5°C ниже нормы. При этом сильные засухи 2015 года, когда на многих гидрологических постах были зафиксированы исторические минимумы уровней поверхностных и грунтовых вод (Лысенко и др., 2020), очевидно, привели к структурному сдвигу во временном ряду температуры всех типов подстилающей

поверхности (рис. 2), что говорит о длительном периоде восстановления водных ресурсов и естественного состояния экосистем региона.

Вторым важным фактором, определяющим величину суточного хода LST, является растительный покров подстилающей поверхности. Его наличие обеспечивает охлаждение подстилающей поверхности в дневное время суток (за счет эвапотранспирации) и препятствует ее радиационному выхолаживанию в ночные часы (за счет обратного рассеяния уходящего теплового излучения). По этой причине амплитуда суточного хода LST для лугов и пахотных земель оказывается значительно выше, чем для лесных массивов. Это можно видеть на примере земель Гомельской области Беларуси, для которых отчетливо прослеживается тенденция уменьшения амплитуды суточного хода LST с увеличением густоты растительного покрова (рис. 2).

Для понимания того, насколько наблюдаемые изменения летней LST на территории Беларуси обусловлены глобальным потеплением, а насколько — влиянием землепользования, процессами деградации земель и другими факторами, рассмотрим связь LST с температурой воздуха на высоте 2 м ($T_{2\text{m}}$). Температура $T_{2\text{m}}$ входит в число стандартных параметров, регулярно измеряемых на сети метеорологических станций. Нами использовались суточные значения $T_{2\text{m}}$ на 50 метеорологических станциях Республики Беларусь (официальные данные национальной гидрометеорологической службы) и 20 ближайших станциях соседних государств (данные с сайта rogo-daiklimat.ru). Суточные значения $T_{2\text{m}}$ на метеорологических станциях усреднялись за летний период каждого года доступного ряда наблюдений — с 1955 по 2021 г. Далее проводилась интерполяция станционных значений $T_{2\text{m}}$ на сетку географических координат, соответствующую спутниковым данным LST, методом простого кригинга (Goovaerts, 1997) и вычисление трендов $T_{2\text{m}}$ в каждом узле сетки методом сингулярного спектрального анализа при длине скользящего окна 20 лет (Golyandina et al., 2015). Для нахождения тренда $T_{2\text{m}}$ использовался весь доступный ряд наблюдений, а изменение $T_{2\text{m}}$ за период, охватываемый данными спутниковыми прибора MODIS (с 2000 года), рассчитывалось по значениям тренда в крайних точках данного периода.

Карта изменения приземной температуры воздуха на территории Беларуси за период с 2000 по 2021 гг. приведена на рис. 3, а. Среднее изменение $T_{2\text{m}}$ за указанный период составило 1.02°C , что примерно на 19% превышает изменение средне-суточной температуры подстилающей поверхности — 0.86°C (рис. 3, б). Это обстоятельство, вероятно, связано с увеличением лесистости рассматриваемой территории. Одновременно с этим во

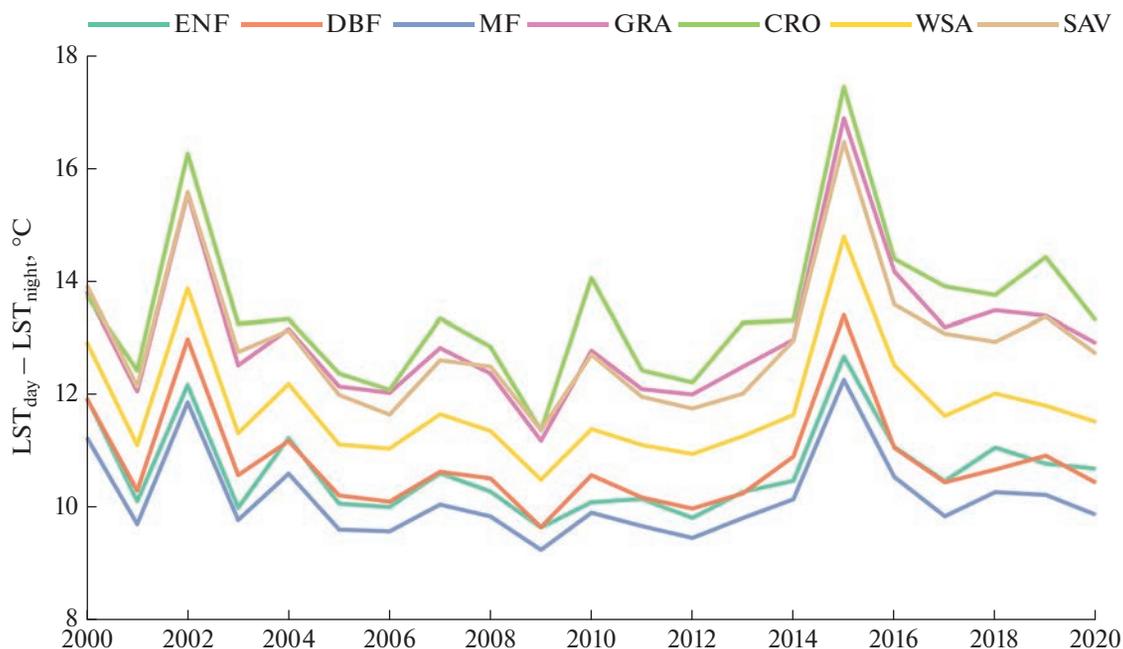


Рис. 2. Временные ряды средней амплитуды суточного хода летней LST для различных типов подстилающей поверхности в пределах Гомельской области Беларуси (классификация MODIS Land Cover Type): ENF – вечнозеленые хвойные леса, DBF – листопадные широколиственные леса, MF – смешенные леса, GRA – луга, CRO – пашни, WSA – лесостепи, SAV – степи.

многих регионах Беларуси, в которых отмечается снижение листового индекса, рост температуры подстилающей поверхности значительно опережает рост температуры воздуха. В этой связи представляет интерес отдельно выделить вклад глобального потепления (увеличения T_{2m}) в изменение LST.

Отмеченная задача решалась в три этапа. На первом этапе строились линейные регрессии между LST и T_{2m} , имеющие стандартный вид:

$$LST(x, y) = a(x, y)T_{2m}(x, y) + b(x, y),$$

где a и b – коэффициенты регрессии, x и y – координаты точки на земной поверхности, соответствующие узлам сетки LST. На втором этапе методом сингулярного спектрального анализа вычислялось изменение приземной температуры воздуха (ΔT_{2m}) в каждом узле расчетной сетки за период с 2000 по 2021 гг. И на заключительном этапе вычислялось искомое изменение LST, обусловленное ее зависимостью от T_{2m} : $\Delta LST_{\text{clim}}(x, y) = a(x, y)\Delta T_{2m}(x, y)$.

Коэффициент детерминации, показывающий долю общей дисперсии LST, объясняемую приземной температурой воздуха, приведен для территории Беларуси на рис. 3, в. Представленное на рисунке пространственное распределение коэффициента детерминации достаточно хорошо согласуется с распределением тренда листового индекса (рис. 1, а). Помимо этого, пространствен-

ное распределение коэффициента детерминации имеет четкую широтную зональность – возрастает от 0.2–0.6 на юге до 0.5–0.85 на севере Беларуси. В южных областях Беларуси (Брестская и Гомельская) рассматриваемый коэффициент детерминации достигает минимальных значений. Это связано с тем, что в этих достаточно засушливых в современный период областях Беларуси важным фактором регулирования температуры подстилающей поверхности является эвапотранспирация, которая зависит не только от температуры воздуха, но и от запасов почвенной влаги и общего состояния почвенно-растительного покрова.

Рассчитанное отношение фактического и климатически обусловленного изменения летней LST представлено для рассматриваемого региона на рис. 3, г. Примерно на 40% площади региона это отношение меньше единицы, т.е. рост LST под влиянием глобального потепления замедляется действием других факторов, не связанных напрямую с температурой воздуха. В тоже время примерно на 8% рассматриваемой территории фактическое изменение LST в 2–4 раза превышает ее климатическую составляющую. В первую очередь это касается территории Гомельской области Беларуси, отличающейся наибольшим усилением засушливости климата и наиболее явной деградацией почвенно-растительного покрова.

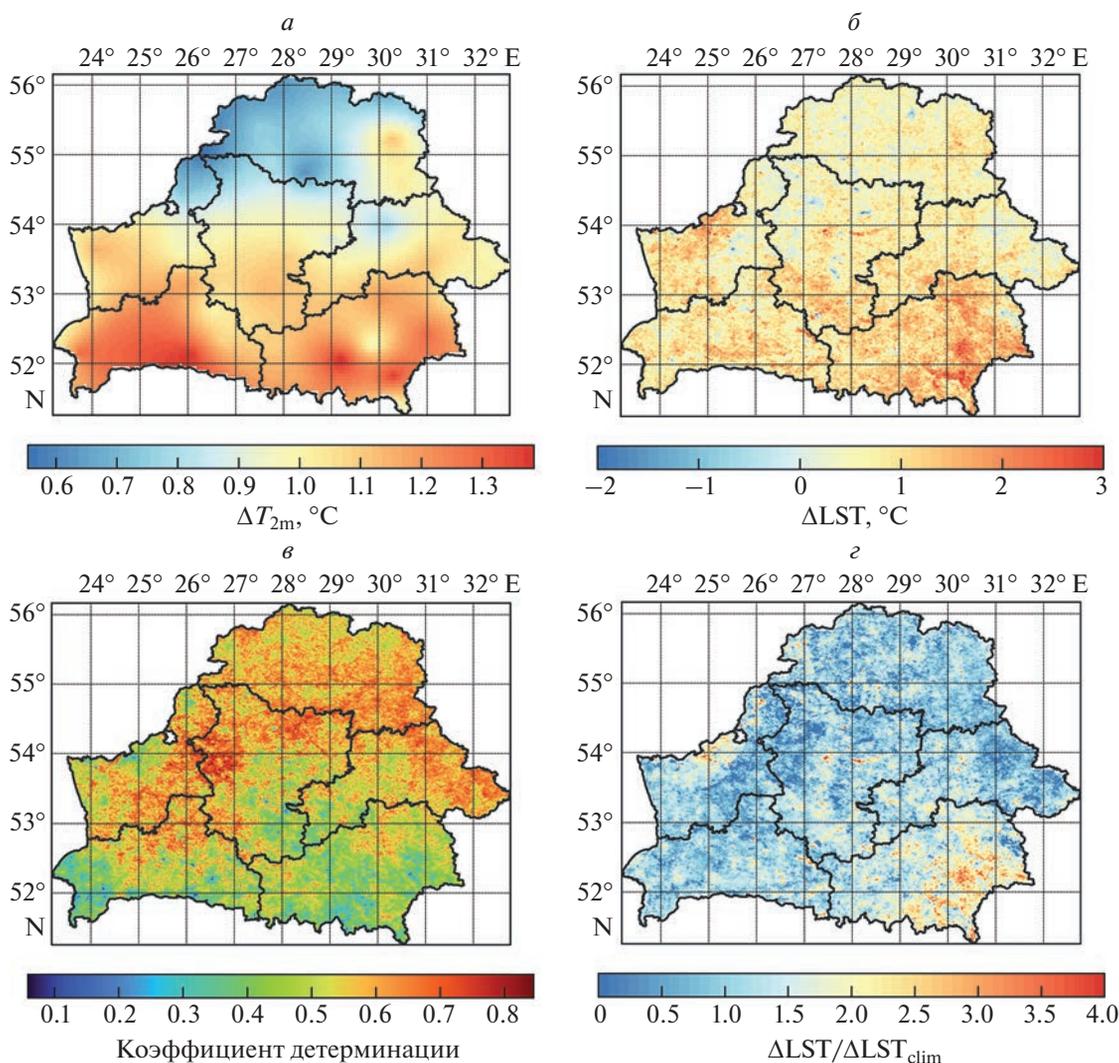


Рис. 3. Взаимосвязи между межгодовой изменчивостью и трендами температуры воздуха на высоте 2 м (T_{2m}) и температуры подстилающей поверхности (LST): *a* – изменение тренда T_{2m} за период с 2000 по 2021 годы, *б* – аналогичное изменение тренда LST, *в* – коэффициент детерминации для регрессионной зависимости LST от T_{2m} , *г* – отношение фактического изменения LST и ее изменения, обусловленного потеплением приземного воздуха.

ОЦЕНКИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ LST И LAI

Для количественной оценки влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности проводилось пространственное агрегирование величин LST и LAI на уровне административных районов Беларуси. Средние для летнего периода значения LST и LAI сопоставлялись для каждого административного района с разделением по типу подстилающей поверхности. В качестве примера на рис. 4 сопоставлены значения дневной LST и LAI для различных земель Мозырского района Беларуси. Видно, что несмотря на существенное различие типов подстилающей поверхности, связь между дневной LST и LAI для данного района в среднем близка к линейной с коэффи-

циентом $\partial LST / \partial LAI \approx -1.13$ К. Столь высокая чувствительность LST к LAI обуславливает значительный разброс LST даже в пределах одного сравнительно небольшого района ($\sim 10^\circ\text{C}$).

Коэффициенты чувствительности дневной LST к LAI, рассчитанные для всех районов Беларуси, приведены в картографическом виде на рис. 5. Широтная зависимость этих коэффициентов обусловлена влиянием солнечной радиации на дневную температуру подстилающей поверхности, а также существенным различием увлажненности почв на севере и юге Беларуси. Видно, что эти коэффициенты изменяются в достаточно широком диапазоне: от -1.47 до -0.21°C с максимальными значениями на юге и минимальными на севере Беларуси. Таким образом, температур-

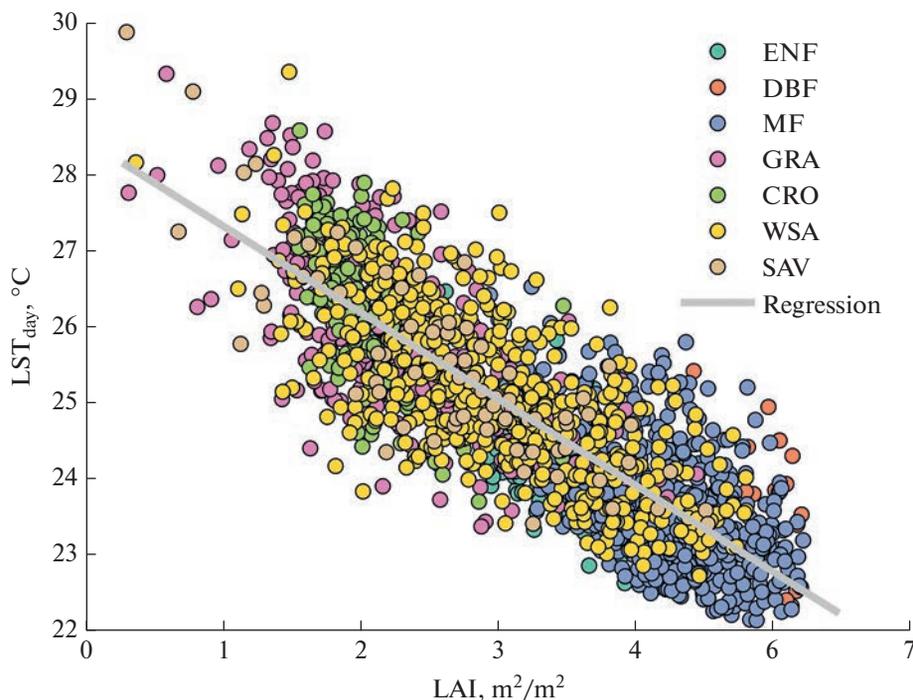


Рис. 4. Сопоставление значений дневной температуры подстилающей поверхности (LST_{day}) и листового индекса (LAI) для земель Мозырского района Беларуси (52.05° с.ш., 29.23° в.д.). Разными цветами обозначены различные типы подстилающей поверхности в классификации MODIS Land Cover Type.

ные аномалии, обусловленные одним и тем же изменением LAI, на севере и юге Беларуси различаются в несколько раз. Именно поэтому сокращение растительного покрова на юге Беларуси сопровождается столь интенсивным ростом температуры подстилающей поверхности (см. рис. 1, а и 1, б).

Эмпирические зависимости LST от LAI, установленные для административных районов Беларуси, позволяют ответить на вопрос, как изменение LAI потенциально может сказаться на средней температуре в этих районах. Фактические изменения LAI для территории Беларуси приведены на рис. 1, а. Соответствующие им изменения среднесуточной LST и амплитуды ее суточного хода, рассчитанные на основе установленных коэффициентов $\partial LST/\partial LAI$, представлены на рис. 6. Рассчитанные пространственные распределения ΔLST характеризуют температурный форсинг, связанный с изменением листового индекса подстилающей поверхности. Положительный знак этого форсинга означает усиление, а отрицательный — замедление потепления на локальном уровне за счет альбедных, эвапотранспирационных и других связанных с подстилающей поверхностью факторов.

Увеличение листового покрытия Беларуси в последние два десятилетия в целом оказывало слабый охлаждающий эффект на подстилающую

поверхность (отрицательный знак температурного форсинга LAI фиксируется на 64% общей площади Беларуси). За счет увеличения LAI средняя летняя температура подстилающей поверхности в Беларуси уменьшилась на 0.052°C , что примерно на 4.5% замедлило летнее потепление (фактическое увеличение летней LST за 2000–2020 гг. составило 1.11°C). В северной части Беларуси (выше 54° с.ш.) охлаждающий эффект LAI оказался более выраженным: -0.09°C при фактическом увеличении летней LST на 0.83°C . Отрицательный температурный форсинг LAI проявляется главным образом за счет дневных температур. Так, в северной части страны рост дневной температуры в последние два десятилетия замедлялся эффектом увеличения растительного покрова более чем на 30% (связанный с LAI температурный форсинг составил -0.17°C при фактическом изменении дневной LST $+0.35^\circ\text{C}$). Влияние LAI на ночные температуры на порядок меньше: средний для Беларуси температурный форсинг LAI в ночное время суток можно оценить величиной $+0.02^\circ\text{C}$ при фактическом изменении ночной LST $+1.39^\circ\text{C}$. Положительный знак температурного форсинга LAI в ночное время суток указывает на тепляющий эффект, оказываемый увеличением LAI, что, вероятно, связано с замедлением радиационного выхолаживания почвы в результате увеличения ее листового покрытия.

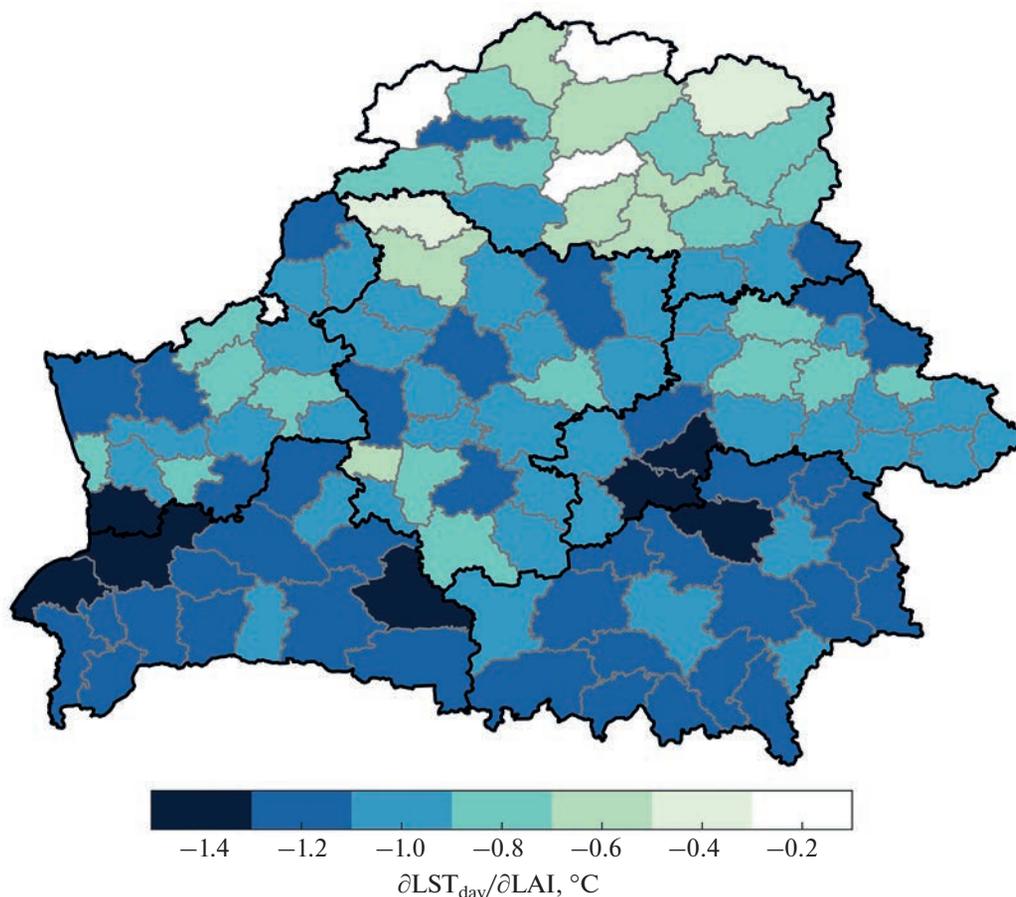


Рис. 5. Средние коэффициенты чувствительности дневной температуры подстилающей поверхности к изменению листового индекса (летний период) для административных районов Беларуси.

Анализ температурного форсинга LAI с разделением по типу подстилающей поверхности показывает, что отрицательный знак этого форсинга (охлаждающий эффект) приходится преимущественно на лесные земли. Для них температурный форсинг LAI в среднем составил -0.14°C для среднесуточной и -0.27°C для дневной температуры при их фактическом увеличении на 1.01 и 0.63°C соответственно. Температурный форсинг LAI примерно вдвое замедлил рост дневной температуры лесных земель на севере (выше 54°с.ш.) и более чем на четверть на юге.

Для сельскохозяйственных земель картина совсем иная. Для них изменение LAI (преимущественно отрицательного знака) усиливают летнее потепление. Положительный знак температурного форсинга LAI отмечается на 63% общей площади пахотных земель, тогда как для лесных земель — лишь на 6.9%. За счет уменьшения LAI среднесуточная температура пахотных земель увеличилась в среднем на 0.083°C . В северных регионах Беларуси (выше 54°с.ш.) изменение LAI практически не сказалось на средней летней температуре па-

хотных земель, однако в южных регионах оно обусловило дополнительное потепление на 0.11°C , что ускорило рост летней LST пахотных земель на 7.9% с примерно одинаковым вкладом в дневные и ночные температуры. Примерно на 15% пахотных земель Беларуси уменьшение LAI усиливало летнее потепление более чем на четверть. Примерно на 18% их площади в результате изменений растительного покрова произошло увеличение амплитуды суточного хода температуры, причем на 8.2% их площади — более чем на 1°C . Рост колебаний LST на протяжении суток означает, что уменьшение растительного покрова усиливает прогревание почвы в дневные часы и ее радиационное выхолаживание ночью.

С учетом наметившихся негативных тенденций в изменении биоклиматических показателей многих земель Беларуси представляет интерес выделить территории, наиболее подверженные процессам изменения климата и деградации почвенно-растительного покрова. К таким территориям будем относить территории, которые характеризуются статистически достоверными при за-

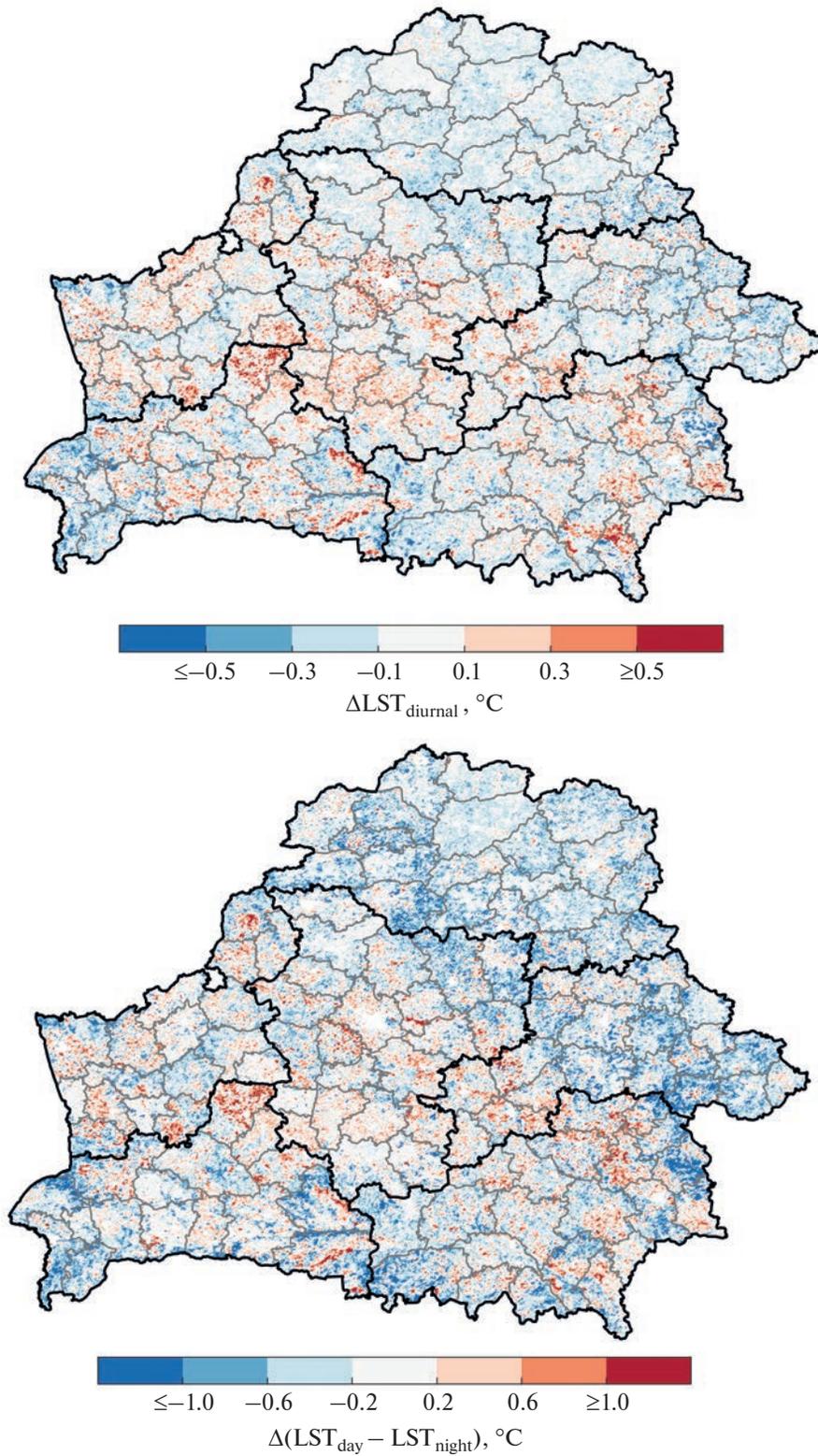


Рис. 6. Карты изменений среднесуточной температуры и амплитуды суточного хода температуры подстилающей поверхности в результате изменений листового индекса за период с 2000 по 2020 годы.

данном уровне значимости p трендами LAI и LST, удовлетворяющими следующим условиям:

$$\partial \text{LAI} / \partial t < 0, \quad (1)$$

$$\partial \text{LST}_{\text{day}} / \partial t + \partial \text{LST}_{\text{night}} / \partial t > 0, \quad (2)$$

$$\partial \text{LST}_{\text{day}} / \partial t - \partial \text{LST}_{\text{night}} / \partial t > 0, \quad (3)$$

$$(\partial \text{LST}_{\text{day}} / \partial \text{LAI} + \partial \text{LST}_{\text{night}} / \partial \text{LAI}) \partial \text{LAI} / \partial t > 0, \quad (4)$$

$$(\partial \text{LST}_{\text{day}} / \partial \text{LAI} - \partial \text{LST}_{\text{night}} / \partial \text{LAI}) \partial \text{LAI} / \partial t > 0, \quad (5)$$

где в качестве производных по времени $\partial/\partial t$ используются коэффициенты линейных трендов LST и LAI за период 2000–2020 гг., а производная $\partial \text{LST} / \partial \text{LAI}$ вычисляется для каждого административного района Беларуси как средний для этого района коэффициент регрессии между LST и LAI.

Условие (1) при заданном уровне статистической значимости означает деградацию растительного покрова, (2) – аномальный рост температуры подстилающей поверхности, (3) – усиление колебаний температур на протяжении суток, т.е. экстремальности климата. Условия (4) и (5) означают, что процессы потепления и увеличения амплитуды суточного хода температуры усиливаются связанными с LAI факторами (альбедными, эвапотранспирационными и др.).

Карта земель Беларуси, для которых изменения LST и LAI удовлетворяют условиям (1)–(5) при уровне статистической значимости $p = 0.05$, представлена на рис. 7. Интенсивность цвета на данной карте соответствует температурному форсингу LAI (правая часть условия (4)). Наиболее яркие районы на карте соответствуют максимальной величине этого форсинга. Средняя скорость летнего потепления в выделенных на карте районах в 2.3 раза выше, чем на остальной территории страны. Листовой индекс в этих районах за 2000–2020 гг. понизился почти на 40% ($-1.01 \text{ м}^2/\text{м}^2$ при среднем значении $2.51 \text{ м}^2/\text{м}^2$), что свидетельствует об интенсивной деградации земель. Средняя величина температурного форсинга LAI для выделенных районов составляет $+0.48^\circ\text{C}$, что находится на верхней границе его диапазона для территории Беларуси (рис. 6, а).

Стоит отметить, что все территории Беларуси, имеющие вышеотмеченные признаки биоклиматической деградации, относятся к зоне с понижающимся гидротермическим коэффициентом (Логинов и др., 2020), что означает усиление засушливости климата. Систематическое понижение запасов почвенной влаги, а в добавок к этому еще и сокращение растительного покрова, затрудняют охлаждение поверхности за счет испарения и усиливают ее прогревание в дневное время суток. Вероятно, именно поэтому выделен-

ные территории характеризуются столь быстрыми темпами летнего потепления.

В свою очередь рост температуры подстилающей поверхности усиливает потери почвенной влаги на испарение, что в засушливых условиях приводит к угнетению растительности и еще большим потерям растительного покрова. Таким образом на землях Беларуси с вышеотмеченными признаками биоклиматической деградации, вероятно, работают положительные обратные связи между температурой, почвенной влагой и наземной растительностью, которые в условиях изменения климата приводят к ускоренному иссушению почвы и деградации растительного покрова. Учитывая крайне неравномерное распределение земель с вышеописанными признаками деградации, можно предположить существование пороговых для данных почвенно-климатических условий величин листового индекса, начиная с которых положительные обратные связи между температурой, почвенной влагой и наземной растительностью обеспечивают самоподдерживающуюся деградацию земель. Триггером такой формы деградации земель может быть либо частичный свод растительности в результате различных хозяйственных мероприятий, либо недостаточные меры адаптации сельского и лесного хозяйства к изменению климата.

В настоящее время в Беларуси примерно 1.8% земель общей площадью 373 тыс. га характеризуются вышеописанными тенденциями биоклиматической деградации. Из них 58% земель площадью 215 тыс. га – это пахотные земли, что составляет примерно 2.1% их общего фонда. Это говорит о том, что меры по адаптации сельского хозяйства к изменению климата, предпринимаемые в отдельных районах Беларуси, недостаточны и нуждаются в пересмотре и корректировке. В первую очередь это касается районов Гомельской и Брестской областей Беларуси. Однако вышеотмеченным критериям биоклиматической деградации удовлетворяют пахотные земли и некоторых районов Минской и Гродненской областей. В связи с этим выделенные районы требуют повышенного внимания и первоочередного внедрения современных технологий адаптации к изменению климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скорость летнего потепления в значительной степени зависит от радиационных и эвапотранспирационных факторов регулирования температуры подстилающей поверхности. В этой связи изучение обратных связей между температурой поверхности и ее растительным покровом имеет важное значение для понимания и предупреждения негативных процессов климатической деградации земель.

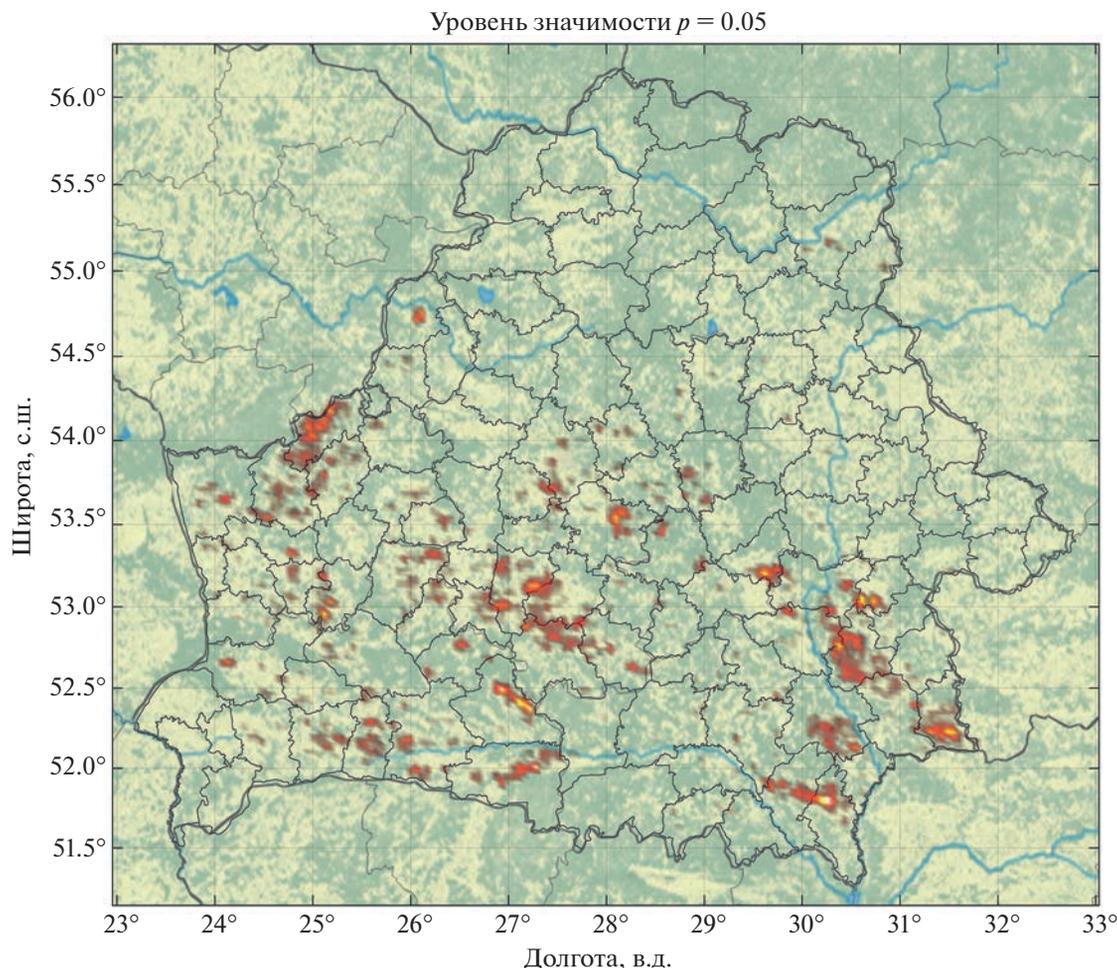


Рис. 7. Очаги биоклиматической деградации земель Беларуси, выделенные на основании критериев (1)–(5) при уровне статистической значимости $p = 0.05$.

Результаты, полученные в настоящей работе, показывают, что несмотря на медленный рост среднего листового индекса Беларуси, происходящий главным образом за счет лесов, во многих районах отмечаются признаки деградации растительного покрова, которая сопровождается аномальным ростом температуры и усилением ее внутрисуточных колебаний.

В современный период примерно 373 тыс. га белорусских земель имеют признаки биоклиматической деградации. Их листовый индекс с 2000 по 2020 гг. понизился почти на 40% ($-1.01 \text{ м}^2/\text{м}^2$ при среднем значении $2.51 \text{ м}^2/\text{м}^2$), а средняя скорость летнего потепления на этих землях в 2.3 раза выше, чем в остальной части страны. Свыше половины деградирующих земель (58%) в настоящее время отведено под пашни и находится в южной части страны, где быстрое летнее потепление сопровождается усилением засушливости климата.

Установлено, что в летний период чувствительность дневной температуры подстилающей поверхности к изменению листового индекса на юге Беларуси в несколько раз выше, чем на севе-

ре. По этой причине процессы деградации растительного покрова в южных регионах Беларуси способны существенно ускорять рост летних температур. На землях сельскохозяйственного назначения снижение растительного покрова может обуславливать свыше четверти наблюдаемого там роста средней летней температуры подстилающей поверхности. В свою очередь рост температуры усиливает потери почвенной влаги на испарение, что в засушливых условиях приводит к угнетению растительности и еще большему сокращению растительного покрова. В этой связи районы Беларуси, в которых процессы биоклиматической деградации земель поддерживаются положительными обратными связями между температурой, почвенной влагой и растительным покровом, требуют особого внимания и первоочередного внедрения современных технологий адаптации к изменению климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воронков Н.А. Роль лесов в охране вод. Л.: Гидрометеопиздат, 1988. 286 с.

- Горный В.И., Крицук С.Г., Латышов И.Ш., Манвелова А.Б., Тронин А.А.* Спутниковое картирование риска перегрева городского воздуха (на примере г. Хельсинки, Финляндия) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 23–34.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34>
- Золотокрылин А.Н.* Климатическое опустынивание / отв. ред. А.Н. Кренке. М.: Наука, 2003. 246 с.
- Логинов В.Ф.* Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. Минск: ТетраСистемс, 2008. 496 с.
- Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И.* Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования, 2-е изд. Минск: УП “Энциклопедикс”, 2020. 264 с.
- Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Хомич В.С., Семенченко В.П., Кулак А.В., Степанович И.М.* Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 4. С. 515–527.
<https://doi.org/10.31857/S2587556621040063>
- Лысенко С.А.* Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 77–88.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019677-88>
- Лысенко С.А., Логинов В.Ф., Буяков И.В.* Влияние крупномасштабных мод общей изменчивости атмосферы и океана в Атлантико-Европейском регионе на климат Беларуси // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2020. Т. 64. № 5. С. 609–616.
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-609-616>
- Лысенко С.А., Логинов В.Ф., Зайко П.О.* Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье // Метеорология и гидрология. 2022. Т. 47. № 1. С. 59–71.
<https://doi.org/10.3103/S1068373922010058>
- Молчанов А.А.* Гидрологическая роль леса. М.: АН СССР, 1960. 487 с.
- Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” Том 2. / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. 476 с.
- Рахманов В.В.* Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесная промышленность, 1984. 240 с.
- Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С.* Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 125–141.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-125-141>
- Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С.* Связь сезонной динамики температуры поверхности и NDVI урбанизированных территорий засушливой зоны (на примере волгоградской агломерации) // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 4. С. 72–83.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421040084>
- Babst F., Bouriaud O., Poulter B., Trouet V., Girardin M.P., Frank D.C.* Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth // Sci. Adv. 2019. V. 5. № 1: eaat4313.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Burrell A.L., Evans J.P., De Kauwe M.G.* Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification // Nat. Commun. 2020. V. 11. № 3853.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17710-7>
- Chen C., Park T., Wang X., Piao Sh., Xu B., Chaturvedi R.K., Fuchs R., Brovkin V., Ciais Ph., Fensholt R., Tommervik H., Bala G., Zhu Z., Nemani R.R., Myneni R.B.* China and India lead in greening of the world through land-use management // Nat. Sustain. 2019. V. 2. № 2. P. 122–129.
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>
- Davy R., Esau I., Chernokulsky A., Outten S., Zilitinkevich S.* Diurnal asymmetry to the observed global warming // Int. J. Climatol. 2017. V. 37. № 1. P. 79–93.
<https://doi.org/10.1002/joc.4688>
- Duan S.-B., Li Z.-L., Li H., Göttsche Fr.-M., Wu H., Leng P., Coll C.* Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements // Remote Sens. Environ. 2019. V. 225. P. 16–29.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>
- Duffy K.A., Schwalm C.R., Arcus V.L., Koch G.W., Liang L.L., Schipper L.A.* How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere? // Sci. Adv. 2021. V. 7. № 3: eaay1052.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1052>
- Fang H., Wang Y., Zhang Y., Li S.* Long-Term Variation of Global GEOV2 and MODIS Leaf Area Index (LAI) and Their Uncertainties: An Insight into the Product Stabilities // J. Remote Sens. 2021. V. 2021. № 9842830.
<https://doi.org/10.34133/2021/9842830>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sens. Environ. 2010. V. 114. № 1. P. 168–182.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K.* Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package // J. Stat. Softw. 2015. V. 67. № 2. P. 1–78.
<https://doi.org/10.18637/jss.v067.i02>
- Goovaerts P.* Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.
- Green J.K., Konings A.G., Alemohammad S.H., Berry J., Entekhabi D., Kolassa J., Lee J.-E., Gentine P.* Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere // Nat. Geosci. 2017. V. 10. № 6. P. 410–414.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2957>
- Heimann M., Reichstein M.* Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // Nature. 2008. V. 451. № 7176. P. 289–292.
<https://doi.org/10.1038/nature06591>
- Jiao W., Wang L., Smith W.K., Chang Q., Wang H., D’Odorico P.* Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades // Nat. Commun. 2021. V. 12. № 3777.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24016-9>
- Lesk C., Coffel E., Winter J., Ray D., Zscheischler J., Senviratne S.I., Horton R.* Stronger temperature–moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields // Nature Food. 2021. V. 2. № 9. P. 683–691.
<https://doi.org/10.1038/s43016-021-00341-6>
- Liu Y.Y., van Dijk A.I.J.M., de Jeu R.A.M., Canadell J.G., McCabe M.F., Evans J.P., Wang G.* Recent reversal in loss of global terrestrial biomass // Nat. Clim. Change. 2015. V. 5. № 5. P. 470–474.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2581>

- Liu Y., Zhou R., Wen Z., Khalifa M., Zheng C., Ren H., Zhang Z., Wang Z. Assessing the impacts of drought on net primary productivity of global land biomes in different climate zones // *Ecological indicators*. 2021. V. 130. № 108146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108146>
- Rasul A., Ibrahim S., Onojeghuo A.R., Balzter H. A Trend Analysis of Leaf Area Index and Land Surface Temperature and Their Relationship from Global to Local Scale // *Land*. 2020. V.9. № 10. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/land9100388>
- Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D. C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Summary for Policymakers // *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, 2019.
- Xu L., Myneni R.B., Chapin III F.S., Callaghan T.V., Pinzon J.E., Tucker C.J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tømmervik H., Euskirchen E.S., Forbes B.C., Piao S.L., Anderson B.T., Ganguly S., Nemani R.R., Goetz S.J., Beck P.S.A., Bunn A.G., Cao C., Stroeve J.C. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nat. Clim. Change*. 2013. V. 3. № 6. P. 581–586. <https://doi.org/10.1038/nclimate1836>
- Zhang W., Wei F., Horion S., Fensholt R., Forkel M., Brandt M. Global quantification of the bidirectional dependency between soil moisture and vegetation productivity // *Agric. For. Meteorol.* 2022. V. 313. № 4: 108735. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108735>
- Zhu Z., Piao S., Myneni R.B., Huang M., Zeng Z., Canadell J.G., Ciais P., Sich S., Friedlingstein P., Arneeth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian Xu, Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T.A.M., Stocker B.D., Viovy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Zaehle S., Zeng N. Greening of the Earth and its drivers // *Nat. Clim. Change*. 2016. V. 6. № 6. P. 791–795. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>

Land Surface Temperature and Leaf Area Index Forward and Backward Linkages for Summer Time Period in Republic of Belarus

S. A. Lysenko

Institute of Nature Management of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

On the basis of Earth remote sensing data for 2000–2020 quantitative estimates of the influence of vegetation cover degradation on the summer warming in Belarus were obtained. The average leaf area index of Belarus for this period increased by 3.3%, mainly due to forest areas the leaf index of which increased by about 8%. The growth of the leaf area index slowed down the summer warming of forest lands in the north (above 54° N) by about half and by more than a quarter in the south of Belarus. At the same time, the leaf area index of croplands decreased by about 5%, which caused their additional warming and amplified their land surface temperature daily cycle for summer time period. Statistically significant signs of bioclimatic land degradation have been found on the territory of Belarus with a total area of about 400 thousand hectares, which are enhanced by high values of positive feedback between temperature, vegetation cover and soil moisture. About of 58% of the degrading lands are agricultural lands located mainly in the southern part of the country. On these lands, summer temperature grows 2 times faster than the average for Belarus, and their leaf index decreases at a rate of about 2% per year, which indicates the insufficiency of agriculture climate mitigation in certain regions of Belarus.

Keywords: climate change, land degradation, leaf area index, land surface temperature, feedbacks

REFERENCES

- Babst F., Bouriaud O., Poulter B., Trouet V., Girardin M.P., Frank D.C. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth // *Sci. Adv.* 2019. V. 5. № 1: eaat4313. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Burrell A.L., Evans J.P., De Kauwe M.G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. № 3853. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17710-7>
- Chen C., Park T., Wang X., Piao Sh., Xu B., Chaturvedi R.K., Fuchs R., Brovkin V., Ciais Ph., Fensholt R., Tømmervik H., Bala G., Zhu Z., Nemani R.R., Myneni R.B. China and India lead in greening of the world through land-use management // *Nat. Sustain.* 2019. V. 2. № 2. P. 122–129. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>
- Davy R., Esau I., Chernokulsky A., Outten S., Zilitinkevich S. Diurnal asymmetry to the observed global warming // *Int. J. Climatol.* 2017. V. 37. № 1. P. 79–93. <https://doi.org/10.1002/joc.4688>
- Duan S.-B., Li Z.-L., Li H., Göttsche Fr.-M., Wu H., Leng P., Coll C. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements // *Remote Sens. Environ.* 2019. V. 225. P. 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>
- Duffy K.A., Schwalm C.R., Arcus V.L., Koch G.W., Liang L.L., Schipper L.A. How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere? // *Sci. Adv.* 2021. V. 7. № 3: eaay1052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1052>
- Fang H., Wang Y., Zhang Y., Li S. Long-Term Variation of Global GEOV2 and MODIS Leaf Area Index (LAI) and Their Uncertainties: An Insight into the Product Stabilities // *J. Remote Sens.* 2021. V. 2021. № 9842830. <https://doi.org/10.34133/2021/9842830>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. № 1. P. 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>

- Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K.* Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package // *J. Stat. Softw.* 2015. V. 67. № 2. P. 1–78.
<https://doi.org/10.18637/jss.v067.i02>
- Goovaerts P.* Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.
- Gorny V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Manvelova A.B., Tronin A.A.* Satellite mapping of the risk of urban air overheating (on the example of Helsinki, Finland) // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2022. V. 19. № 3. S. 23–34. (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34>
- Green J.K., Konings A.G., Alemohammad S.H., Berry J., Entekhabi D., Kolassa J., Lee J.-E., Gentine P.* Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere // *Nat. Geosci.* 2017. V. 10. № 6. P. 410–414.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2957>
- Heimann M., Reichstein M.* Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // *Nature.* 2008. V. 451. № 7176. P. 289–292.
<https://doi.org/10.1038/nature06591>
- Jiao W., Wang L., Smith W.K., Chang Q., Wang H., D'Odorico P.* Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. № 3777.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24016-9>
- Lesk C., Coffel E., Winter J., Ray D., Zscheischler J., Seneviratne S.I., Horton R.* Stronger temperature–moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields // *Nature Food.* 2021. V. 2. № 9. P. 683–691.
<https://doi.org/10.1038/s43016-021-00341-6>
- Liu Y.Y., van Dijk A.I.J.M., de Jeu R.A.M., Canadell J.G., McCabe M.F., Evans J.P., Wang G.* Recent reversal in loss of global terrestrial biomass // *Nat. Clim. Change.* 2015. V. 5. № 5. P. 470–474.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2581>
- Liu Y., Zhou R., Wen Z., Khalifa M., Zheng C., Ren H., Zhang Z., Wang Z.* Assessing the impacts of drought on net primary productivity of global land biomes in different climate zones // *Ecological indicators.* 2021. V. 130. № 108146.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108146>
- Loginov V.F.* Global and regional climate change: causes and consequences. Minsk: TetraSystems, 2008. 496 p. (In Russian).
- Loginov V.F., Lysenko S.A., Melnik V.I.* Climate Change in Belarus: Causes, Consequences, Regulatory Opportunities, 2nd ed. Minsk: UE “Encyclopedics”, 2020. 264 p. (In Russian).
- Loginov V.F., Lysenko S.A., Khomich V.S., Semenchenko V.P., Kulak A.V., Stepanovich I.M.* Climate Aridization Signs and Their Ecosystem Displays on the Territory of Belarus // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya.* 2021. V. 85. № 4. P. 515–527. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S2587556621040063>
- Lysenko S.A.* Climate-Forced Changes of Bioproductivity of Terrestrial Ecosystems in Belarus // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2020. V. 56. № 9. P. 1080–1089.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019677-88>
- Lysenko S.A., Loginov V.F., Buyakov I.V.* Effect of large-scale modes of total variability of the atmosphere and ocean in the Atlantic-European region on the climate of Belarus // *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus.* 2020. V. 64. № 5. P. 609–616. (In Russian).
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-609-616>
- Lysenko S.A., Loginov V.F., Zaiko P.O.* Climate Change Impacts on Bioproductivity of Terrestrial Ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie // *Russian Meteorology and Hydrology.* 2022. V. 47. № 1. C. 34–39.
<https://doi.org/10.3103/S1068373922010058>
- National report “Global climate and soil cover in Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)” V. 2. / Ed. R.S.-H. Edelgeriev. M.: OOO Izdatelstvo MBA, 2019. 476 p. (In Russian).
- Rakhmanov V.V.* Hydroclimatic role of forests. Moscow: Le-snaya promyshlennost', 1984. 240 p. (In Russian).
- Rasul A., Ibrahim S., Onojeghuo A.R., Balzter H.* A Trend Analysis of Leaf Area Index and Land Surface Temperature and Their Relationship from Global to Local Scale // *Land.* 2020. V. 9. № 10. P. 1–17.
<https://doi.org/10.3390/land9100388>
- Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S.* Analysis of the effect of sealed soil cover and landscaping on the temperature field of the Volgograd agglomeration according to MODIS data // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2020. V. 17. № 5. S. 125–141 (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-125-141>
- Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S.* Relationship between seasonal dynamics of surface temperature and NDVI in urbanized areas of the arid zone (on the example of the Volgograd agglomeration) // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2021. № 4. S. 72–83. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S0205961421040084>
- Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.).* Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Summary for Policymakers // *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems,* 2019.
- Voronkov N.A.* The role of forests in water protection. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 286 p. (In Russian).
- Xu L., Myneni R.B., Chapin III F.S., Callaghan T.V., Pinzon J.E., Tucker C.J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tømmervik H., Euskirchen E.S., Forbes B.C., Piao S.L., Anderson B.T., Ganguly S., Nemani R.R., Goetz S.J., Beck P.S.A., Bunn A.G., Cao C., Stroeve J.C.* Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nat. Clim. Change.* 2013. V. 3. № 6. P. 581–586.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1836>
- Zhang W., Wei F., Horion S., Fensholt R., Forkel M., Brandt M.* Global quantification of the bidirectional dependency between soil moisture and vegetation productivity // *Agric. For. Meteorol.* 2022. V. 313. № 4: 108735.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108735>
- Zhu Z., Piao S., Myneni R.B., Huang M., Zeng Z., Canadell J.G., Ciais P., Sitch S., Friedlingstein P., Arneeth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian Xu, Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T.A.M., Stocker B. D., Viogy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Zaehle S., Zeng N.* Greening of the Earth and its drivers // *Nat. Clim. Change.* 2016. V. 6. № 6. P. 791–795.
<https://doi.org/10.1038/nclimate3004>
- Zolotokrylin A.N.* Climatic desertification / *Resp.* Ed. A.N. Krenke. Moscow: Nauka, 2003. 246 p. (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОТРАЖЕНИЕ МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СПУТНИКОВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ АФРИКИ

© 2023 г. Л. М. Абрамова^а, *, И. М. Варенцов^а, Д. Ю. Абрамова^б

^аЦентр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, г. Троицк, Россия

^бИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, г. Троицк, Россия

*E-mail: labramova@igemi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 24.07.2022 г.

Пространственное распределение поля литосферных магнитных аномалий несет информацию о его источниках – глубинных тектонических структурах – и отражает процессы, протекающие на мантийных глубинах. По измеренным спутником CHAMP геомагнитным данным на высоте наблюдения ~290 км рассчитаны параметры литосферного магнитного поля над территорией Африканского континента. Построены серии карт литосферных магнитных аномалий модуля полного вектора поля T_a различных масштабов и степеней осреднения. Приведено распределение T_a над территориями Южной и Восточной Африки. Анализ карт литосферных магнитных аномалий над территориями влияния Африканского суперплюма показал хорошую согласованность с существующей гипотезой о прохождении мантийного потока суперплюма из нижней мантии в верхнюю и его дальнейшем продолжении под Восточно-Африканской рифтовой зоной в северо-восточном направлении. Полученные параметры аномального литосферного магнитного поля содержат информацию о намагниченности глубинных слоев литосферы, отражая магнитные свойства крупных региональных тектонических структур и топографию поверхности Кюри, которая связана с геотермическим режимом и тектонической обстановкой на разных уровнях литосферы. Работа показывает перспективность использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля при изучении тектоники активных зон и картировании глубинных неоднородностей литосферы на труднодоступных территориях.

Ключевые слова: литосферные магнитные аномалии, спутник Земли CHAMP, Африканский суперплюм, мантийный поток, горячая точка Эфиопия/Афар

DOI: 10.31857/S0205961423010025, EDN: MLOKBE

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – изучение морфологии региональных литосферных магнитных аномалий (ЛМА) над Африканским континентом, выделенных непосредственно из спутниковых измерений германского спутника CHAMP, и анализ их связи с геотектоникой и другими геофизическими полями. Регион представляет интерес в связи с наличием крупных геолого-тектонических единиц различной природы и высокой тектонической активностью, а также ограниченным объемом научных исследований, использующих для этих целей параметры ЛМА.

При исследовании глобальной тектоники большое внимание уделяется изучению возникновения, развития и последствий деятельности мантийных плюмов, которые генерируют процессы магматизма и эндогенного рудообразования и считаются ответственными за возникнове-

ние траппов, внутриконтинентальных рифтов и горячих точек (Loper, 1991; Maruyama, 1994; Ярмолюк и др., 2000; Pirajno, 2004; Добрецов, 2008; Zhao, 2009).

Гипотеза мантийного плюма была предложена шесть десятилетий назад Уилсоном (Wilson, 1963). В дальнейшем Морган (Morgan, 1971) для объяснения существования вулканических горячих точек, таких как Гавайи и Исландия, ввел понятие плюмов (*plumes*).

Плюмы – это мантийные потоки, продвигающиеся к поверхности Земли от основания мантии в виде “горячей струи” расплава и являющиеся важнейшими регуляторами термохимической машины Земли.

Приведенная на рис. 1 схема иллюстрирует процесс прохождения мантийного вещества от границы ядро-мантия в литосферу с выходом далее на земную поверхность.

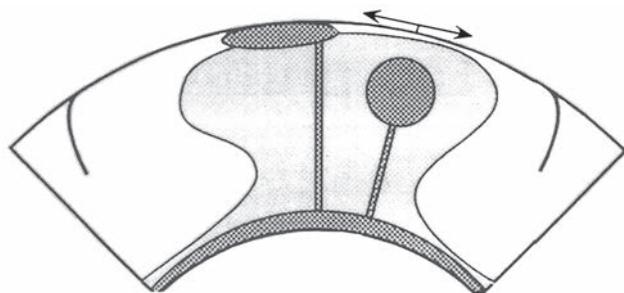


Рис. 1. Компьютерное моделирование геометрии суперплюма (Davies, Pribac, 1993).

Поднимающийся по каналу мантийный материал плюма при подходе к тугоплавкому основанию литосферы не может ее проплавить и начинает растекаться вдоль ее основания. Расплав плюма растекается до тех пор, пока не начинает формироваться “медленный” вторичный плюм, после чего на заключительной стадии процесса возникают центры прорыва магмы на земную поверхность, и происходит массовое (катастрофическое) излияние траппов (пикритов и базальтов) по периферии зоны излияния.

Диаметры приблизившихся к основанию литосферы “голов” плюмов могут достигать от 500 до 3000 км, в то время как “хвосты” плюмов как правило, имеют диаметр от 100 до 500 км.

Поверхностными проявлениями мантийных плюмов являются горячие точки, сфокусированные зоны мантийного плавления, для которых характерны высокий тепловой поток и активный вулканизм.

Плюмы и соответствующие им горячие точки в последние десятилетия активно изучаются геофизическими методами, поскольку позволяют выявлять специфические особенности зарождения и развития мантийных и мантийно – коровых рудообразующих систем, связанных с формированием крупных и уникальных рудных месторождений (Борисенко и др., 2006; Добрецов, 2008).

Основным методом исследования плюмов в настоящее время является сейсмическая томография. Достоверность результатов, полученных этим методом, как и всяким другим, определяется объемом полученных экспериментальных данных.

Большое количество мантийных плюмов и горячих точек расположено либо в океанических, либо в труднодоступных континентальных регионах. Здесь возникают технические трудности при проведении сейсмических работ, и пока мало стационарных сейсмических станций, в том числе, на территории Африканского континента, где расположен Африканский суперплюм (АСП).

В этой ситуации при исследовании процессов, связанных с плюмообразованием, локализацией мантийных плюмов и горячих точек, существен-

ным подспорьем оказывается использование измерений геомагнитного поля спутниками Земли, позволяющее обойти указанные трудности. В частности, возможным и эффективным представляется применение для анализа экспериментальных данных германского спутника CHAMP, что подтверждено результатами проведенных ранее авторами аналогичных исследований (Абрамова и др., 2019, 2020а, 2020б; Абрамова Л., Абрамова Д., 2021).

Уникальность более чем десятилетней миссии германского спутника CHAMP заключается в том, что им были получены огромные массивы высокоточных данных модуля полного вектора и компонент геомагнитного поля в узлах сетки, равномерно покрывающей практически всю поверхность Земли на высотах от 480 до 260 км.

Причем даже в конце “жизни”, в период постепенного естественного снижения орбиты аппарата, магнитометры не прекратили работы, продолжая поставлять качественные данные на весьма низкой высоте ~260 км. Благодаря этому использование экспериментальных данных, полученных на более близких к источникам поля уровнях, где величины ЛМА возрастают примерно в 2 раза, дает возможность построить карты ЛМА с хорошим разрешением.

По современным представлениям, Африканский суперплюм (АСП) – это крупномасштабная тектоническая структура с центром под Южной Африкой, образовавшаяся у основания мантии Земли.

Согласно геолого-геофизическим исследованиям, мантийный поток, произведенный АСП, продолжается от Южной Африки на северо-восток в виде широкого аномального апвеллинга (Ritsema et al., 1999; Ritsema, Allen, 2003; Simmons, et al., 2007; Forte et al., 2010).

Как представляет построенная по данным сейсмических исследований модель (Hansen et al., 2012), мантийный поток поднимается из нижней мантии в переходную зону, затем пересекает ее под северной Замбией или южной Танзанией, поднимается далее в верхнюю мантию и продолжается в северо-восточном направлении под Кению, Эфиопию, Афар и западную Аравию. Схематичное представление этого процесса иллюстрирует рис. 2.

Далее мы представляем результаты анализа карт магнитных аномалий над Африканским континентом, которые во многом являются образами воздействия Африканского суперплюма на магнитные свойства земной литосферы.

МАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Геомагнитное поле, измеренное на спутнике, является сложной функцией пространства и времени, поэтому основная проблема при выделении его части, относящейся к литосферным магнитным аномалиям, состоит в корректном разделении измеренного суммарного магнитного поля на составляющие, связанные с различными физическими источниками. Для получения их вклада требуется удалить из экспериментальных спутниковых данных “лишние” составляющие, максимально адекватно описывая их с помощью существующих на сегодняшний день математических моделей.

Методика выделения параметров литосферного магнитного поля из экспериментальных спутниковых измерений, усовершенствованная авторами в части удаления самой значительной составляющей — главного магнитного поля Земли (что позволило повысить надежность и точность выделения литосферной составляющей), неоднократно подробно приводилась ранее (Абрамова, Абрамова, 2014).

Следует отметить, что материалы миссии CHAMP, полученные в последние годы его работы на высотах ~300 км и ниже, приятно отличаются от данных предыдущих лет не только более значительными величинами полей, что обусловлено снижающейся высотой полета, но и качеством (по-видимому, усовершенствовалась методика предварительной обработки массива данных их собственниками).

Для анализа распределения поля ЛМА на высотах орбиты из базы данных спутника CHAMP над Африканским континентом были отобраны и обработаны геомагнитные данные, равномерно покрывающие область земной поверхности в пределах 12–44° E и 34° S–16° N.

По разработанным авторами методикам из данных измерений суммарного геомагнитного поля на спутнике CHAMP выделялись параметры аномального литосферного поля. Для исследуемой территории сформирована обширная база данных литосферных аномалий и построены карты модуля полного вектора T_a разных масштабов и высот наблюдения.

Для проверки надежности построений пространственного распределения поля расчет, как всегда, производился для нескольких независимых наборов спутниковых данных. Сравнение полученных вариантов подтвердило достаточно надежное воспроизведение структуры магнитных аномалий.

Количество экспериментальных точек, используемых при анализе каждой области, лежит в пределах 10000–12000.

Детальность построения карт аномального литосферного поля соответствует масштабу основных тектонических структур региона.

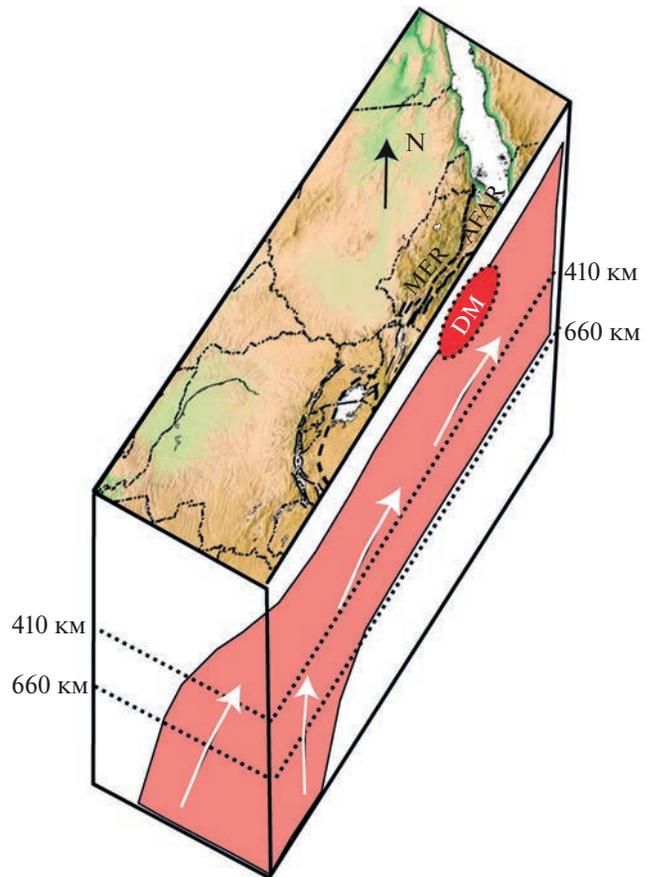


Рис. 2. Предполагаемая структура мантии под восточной частью Африканского континента. Розовая область и белые стрелки изображают поток материала суперплюма, MER — Главный Эфиопский Рифт, DM — зона повышенной степени плавления под горячей точкой Эфиопия/Афар (Hansen, Nyblade, 2013).

КАРТЫ ЛМА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ АФРИКАНСКОГО КОНТИНЕНТА

В настоящее время наиболее полным обобщенным источником глобального распределения магнитного поля является модель WDMAM (*World Digital Magnetic Anomaly Map*), созданная большим коллективом авторов (Maus et al., 2009), включающая в себя базу данных EMAG2, скомпилированную из материалов наземных, спутниковых, морских и аэромагнитных съемок для высоты над геоидом 4 км. Спутниковые магнитные данные брались для альтитуды 400 км.

Второй возможный источник магнитных параметров — непосредственное использование спутниковых данных на различных уровнях наблюдения.

Для выбора оптимального решения при построении карт ЛМА и оценки предпочтительности непосредственно измеренных спутниковых и скомпилированных данных, мы построили две карты распределения поля магнитных аномалий над Африканским континентом, используя мо-

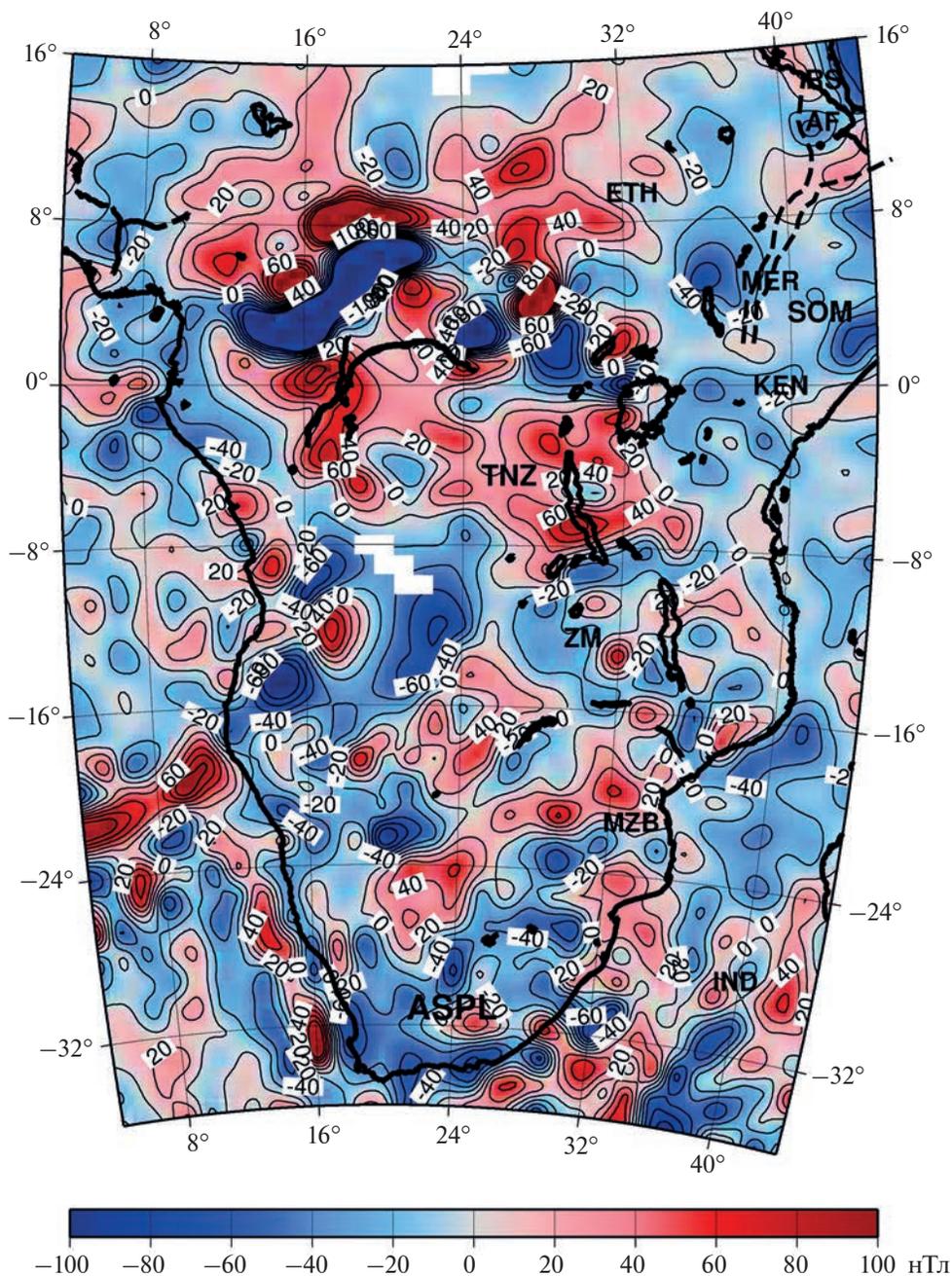


Рис. 3. Карта магнитных аномалий T_a территории Африки, построенная по данным базы EMAG2 (Maus et al., 2009). Высота над геоидом 4 км. Аббревиатуры: ASPL – Африканский суперплюм, IND – Индийский океан; RS – Красное море; государства: MZB – Мозамбик, ZM – Замбия; KEN – Кения; кратоны: KP – Каапваал, ZMB – TNZ Зимбабве; ETH – Эфиопский; SOM – кратон Сомали; AF – депрессия Афар; MER – Главный Эфиопский рифт. Данные используются с осреднением 100×100 км средствами GMT (blockmedian).

дельные данные EMAG2 на уровне 4 км над геоидом и выделенные по нашим технологиям спутниковые магнитные параметры на высоте 290 км.

На рис. 3 представлена карта аномалий модуля полного вектора магнитного поля T_a , построенная по данным базы EMAG2. “Белые пятна” на карте являются следствием ограниченности информации в данных EMAG2 для этих территорий.

Для построения карт литосферного магнитного поля использована программная система GMT (Wessel, Smith, 2007).

Карта ЛМА модуля полного вектора магнитного поля T_a на высоте ~ 290 км над изучаемым регионом представлена на рис. 4. Масштаб карты, параметры осреднения те же, что и на рис. 3.

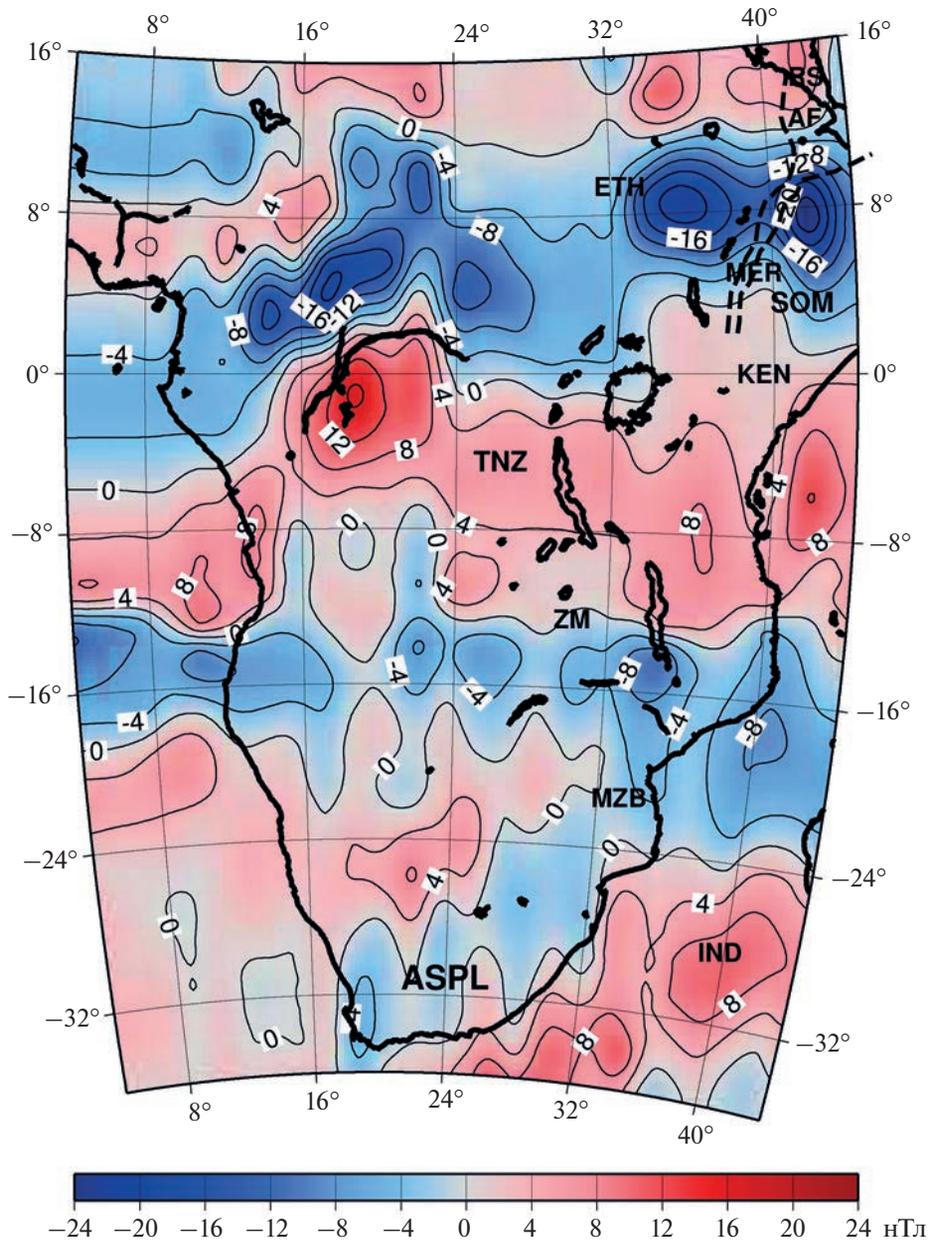


Рис. 4. Карта аномалий T_d над территорией Африканского континента по данным спутника CHAMP на высоте 290 км. Обозначения см. на рис. 3. Данные используются с осреднением 100×100 км средствами GMT (blockmedian).

Сравнение показывает существенное различие карт. На построенной по модельным данным карте наблюдается раздробленность поля на большое количество аномалий разного знака и размера в сравнении с картой ЛМА, построенной по измеренным данным на высоте спутника, рис. 4.

Здесь видны крупные аномалии со сглаженными формами, что представляется вполне логичным, поскольку геомагнитная съемка на спутниковых высотах фактически является пространственным фильтром низких частот, который

подавляет локальные аномалии и сохраняет региональные. Таким образом, на большой высоте в сглаженном виде сохраняются и могут быть выделены в основном аномалии, обусловленные крупными, залегающими на больших глубинах намагниченными структурами, которые и являются предметом изучения и использования при настоящих исследованиях.

Можно считать, что эти две карты, представляющие магнитные аномалии на разных высотах — 4 и ~290 км — отражают пространственное рас-

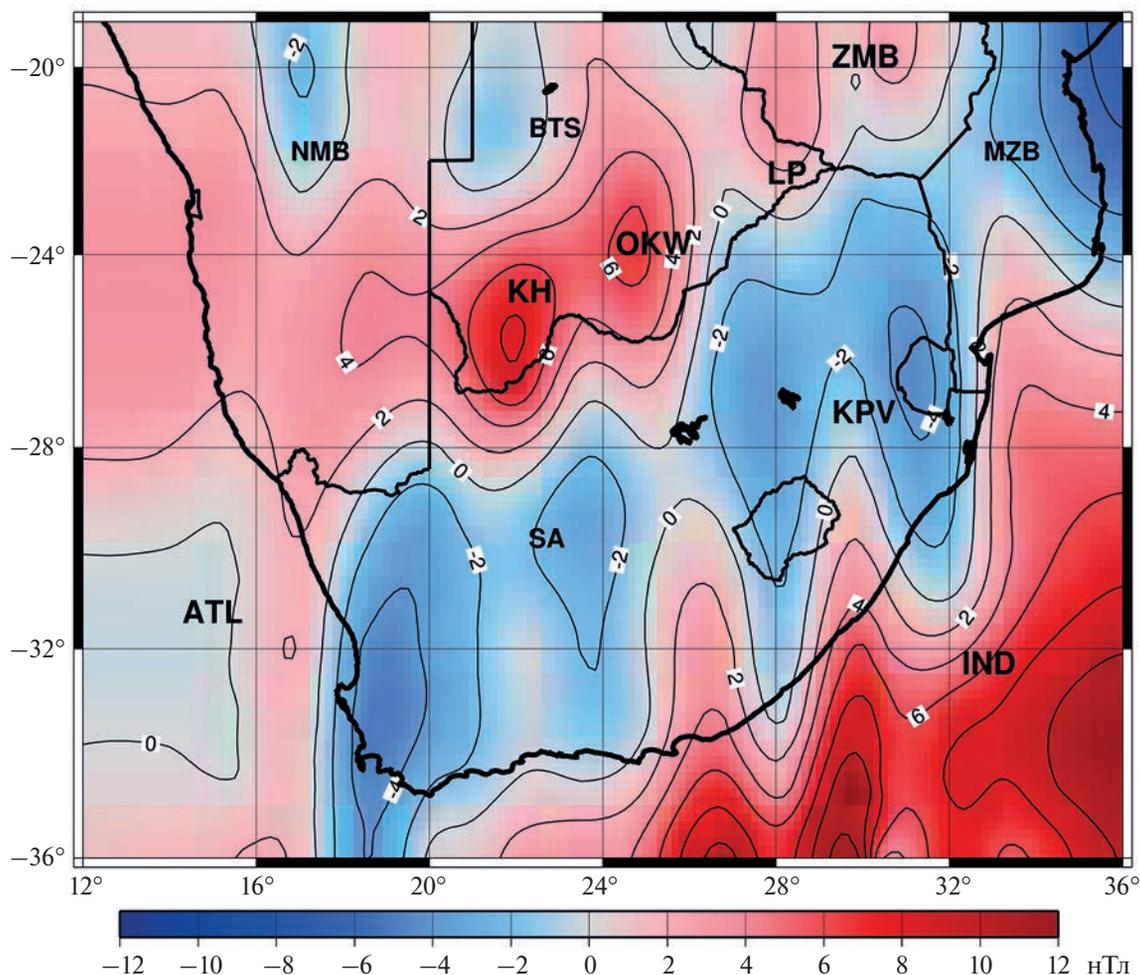


Рис. 5. Карта аномалий магнитного поля T_a над территорией Южной Африки. Аббревиатуры: NMB – Намибия, BTS – Ботсвана, MZB – Мозамбик, SA – ЮАР, ATL – Атлантический океан, IND – Индийский океан; складчатые пояса: KH – Хейсс, ОКВ – Оква, LP – Лимпопо; кратоны: КР – Каапваал, ZMB – Зимбабве.

пределение магнитных масс в поверхностных, неоднородно намагниченных структурах земной коры, и глубинных слоях литосферы соответственно.

В настоящей работе, анализируя ЛМА над территориями Южной Африки, Восточно-Африканской рифтовой зоны, Главного Эфиопского Рифта и области Эфиопия/Афар, мы будем использовать только непосредственно измеренные данные спутника CHAMP.

ЛМА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЮЖНОЙ АФРИКИ

Глобальные томографические исследования, проведенные на территории Африки в последние два десятилетия, показали наличие там крупных областей с пониженными сейсмическими скоростями поперечных S -волн в нижней и верхней

мантии (Ritsema, et al., 1999; Fouch et al., 2004; Simmons et al., 2007).

Пространственное распределение поля литосферных магнитных аномалий модуля полного вектора магнитного поля T_a , построенное по данным спутника CHAMP на уровне ~ 260 км для территории сектора, ограниченного координатами $20\text{--}36^\circ$ S и $12\text{--}36^\circ$ E, приведено на рис. 5 и представляет собой картину ЛМА, составленную положительными и отрицательными фрагментами магнитного поля. При построении использовано медианное осреднение по блокам размером 60×60 км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

Значительная положительная аномалия T_a наблюдается на видимой части акватории Индийского океана.

Над территориями складчатых поясов Хейсс (KH), Оква (ОКВ), Лимпопо (LP), протянувшихся с юго-запада на северо-восток, в целом, наблюда-

ется положительное магнитное поле невысокой интенсивности, на фоне которого выделяются аномалии с центрами $26^{\circ} \text{ S} - 22^{\circ} \text{ E}$ и $24^{\circ} \text{ S} - 25^{\circ} \text{ E}$, соответственно, с более высокими значениями.

Между поясом складчатых поясов и аномалией акватории Индийского океана, практически параллельно поясу положительных аномалий, наблюдается цепь отрицательных магнитных аномалий, также протягивающихся с юго-запада на северо-восток и образующая как бы “коридор” над областью, под которой предполагается местоположение АСП.

Низкий уровень литосферного аномального магнитного поля над этой территорией объясняется тем, что под действием горячего мантийного вещества плюма происходят активные процессы разогрева астеносферы, поднимающие уровень глубины, на которой достигается температура Кюри для ферромагнитных минералов, когда исчезают их магнитные свойства, что ведет к сокращению мощности магнитоактивного слоя литосферы.

Простираение пояса отрицательных литосферных магнитных аномалий четко соответствует существующей гипотезе о предполагаемом направлении движения мантийного потока АСП в северо-восточном направлении.

ЛМА НАД ВОСТОЧНОАФРИКАНСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНОЙ

В качестве следующего шага была поставлена задача проверить соответствие распределения ЛМА гипотезе распространения мантийного потока АСП под территорией Восточной Африки.

Разумеется, следует отдавать себе отчет в том, что мантийный поток, направляющийся от АСП на северо-восток, как это иллюстрирует модель на рис. 2, идеализирован, поскольку он не отражает флуктуаций, которые могут возникнуть из-за гетерогенного строения земной литосферы.

Локальные изменения формы мантийного потока могут происходить, например, вокруг областей с мощной архейской литосферой, либо при подъеме потока под области с более тонкой литосферой, что, в свою очередь, должно продуцировать неоднородности в поведении геофизических полей. Тем не менее, несмотря на естественную неоднородность мантийного потока, томографические данные указывают на существование доминирующего северо-восточного вектора, достаточного, чтобы объяснить происхождение нагретого материала под всей территорией Восточной Африки (Bagley, Nyblade, 2013).

Для оценки степени воздействия мантийного потока, произведенного АСП на структуру литосферного магнитного поля на территории Восточной Африки, были построены и проанализиро-

ваны серии карт модуля полного вектора магнитного поля T_a на планшетах $6^{\circ} \text{ S} - 14^{\circ} \text{ N}$, $28^{\circ} - 46^{\circ} \text{ E}$ с различными параметрами осреднения. В качестве исходных данных использованы измерения геомагнитного поля спутником CHAMP за 2010 г. на высоте наблюдения ~ 290 км.

Пример одной из таких карт T_a приведен на рис. 6. Использовано медианное осреднение по блокам размером 80×80 км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

Из рис. 6 видно, что практически все аномальное магнитное поле над территорией Восточной Африки к северу от экватора представляет собой область отрицательных значений различной интенсивности.

На общем фоне пониженных значений поля выделяются изометричные области отрицательных магнитных аномалий с амплитудами от 6 до 21 нТл в области Главного Эфиопского рифта (MER) и в крайней северо-восточной части Восточно-Африканской рифтовой зоны (EARZ). Они расположены практически на одной широте и имеют центры в $7.5^{\circ} \text{ N} - 38^{\circ} \text{ E}$; $7.5^{\circ} \text{ N} - 47.5^{\circ} \text{ E}$, соответственно. Аномалии тяготеют к территории Главного Эфиопского рифта, обозначенного на карте пунктирными линиями.

К югу от экватора, напротив, выделяется зона интенсивных положительных ЛМА T_a , образующих обширную неоднородную область со значениями более 10 нТл, тяготеющую в континентальной части своим центром к Танзанийскому кратону (TNZ). На акватории Индийского океана (IND) амплитуда положительной аномалии достигает значений 20–22 нТл.

Современная тектоника данной территории, включающей в себя Эфиопское плато, Восточно-Африканскую рифтовую зону и Танзанийский кратон, достаточно хорошо изучена различными сейсмическими методами.

Рис. 7 иллюстрирует результаты сейсмических исследований, обобщенные в виде модели PRI-S05. Цветом обозначены отклонения скоростей S-волн в большую или меньшую сторону от средней мантийной скорости соответственно (Montelli et al., 2006).

В результате анализа было сделано предположение, что зона аномальных сейсмических скоростей Афар является следствием плюмовой активности, так называемого, Эфиопского плюма, массовые излияния которого произошли 30–37 млн лет назад (Добрецов, 2008). Начиная с глубин ~ 200 км под Эфиопским плато, интенсивность низкоскоростной (плюмовой) аномалии, сильно возрастает, что, по мнению авторов, обусловлено повышенной пластичностью мантийного расплава в верхней мантии.

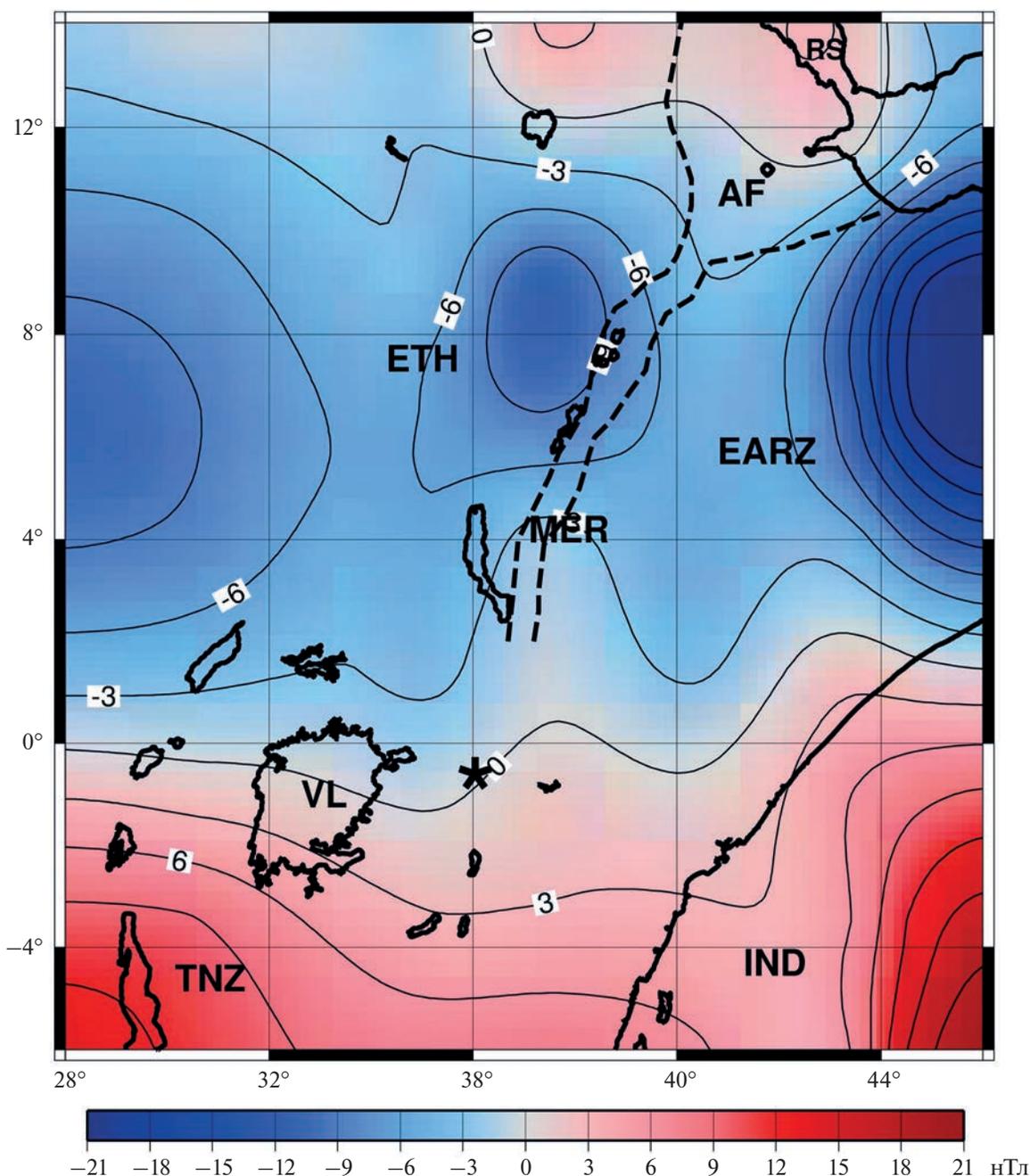


Рис. 6. Карта ЛМА T_a над территорией Восточной Африки на высоте 290 км. Аббревиатуры: ETH – Эфиопское плато; AF – депрессия Афар; MER – Главный Эфиопский рифт; EARZ – Восточно-Африканская рифтовая зона; TNZ – Танзанийский кратон; RS – Красное море; IND – Индийский океан; VL – озеро Виктория.

Наблюдаемая в этом регионе значительная область отрицательных величин литосферного магнитного поля вполне соответствует представлению о потере веществом нижней части земной коры магнитных свойств и соответствующему уменьшению мощности магнитоактивного слоя, произошедшим в результате длительного прогрева литосферы и поднятию изотермы Кюри магнетита.

Наличие положительной магнитной аномалии в районе Танзанийского кратона (TNZ) (рис. 6) говорит о том, что литосфера в этой области мощная и холодная, а ее вещество обладает высокой намагниченностью. Это заключение вполне согласуется с существованием к юго-западу от озера Виктория (VL) зоны повышенных сейсмических скоростей (см. рис. 7), полученной по результа-

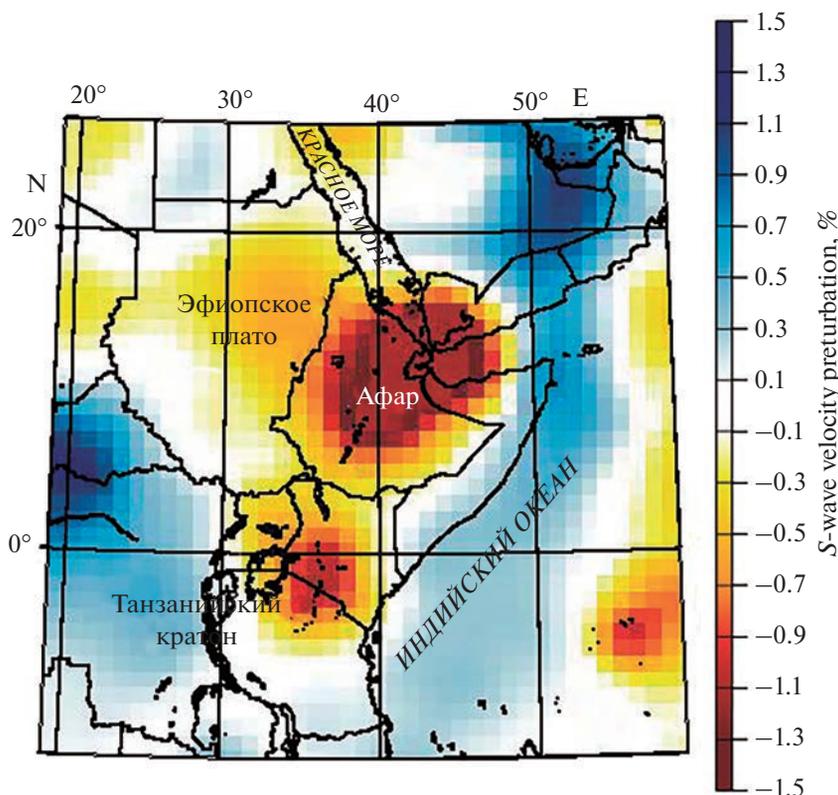


Рис. 7. Сечение скоростной модели S-волн PRI-S05 по данным томографии на глубине 300 км (Montelli et al., 2006).

там сейсмической томографии (Montelli et al., 2006).

Согласно сейсмическим данным, Танзанийский кратон по периметру окружен неоднородными зонами анизотропии сейсмической скорости. Такие особенности могут быть обусловлены обтеканием мантийного материала вокруг областей с более мощной литосферой, так называемых, астеносферных корней, которые обнаружены под кратоном Танзания (Bagley, Nyblade, 2013). Этим, по-видимому, и объясняется возникновение неоднородностей геофизических полей.

Область пониженных скоростей с центром 3° S— 37° E в восточной части Танзанийского кратона (рис. 7), которую принято обозначать как Танзанийский плюм, скорее всего, является следствием подобных локальных процессов. Здесь может происходить более сильный прогрев краевой части Танзанийского кратона мантийным веществом Африканского плюма, что и является причиной понижения сейсмических скоростей.

На карте поля литосферных магнитных аномалий (на рис. 6 эта область отмечена звездочкой) эта область достаточно хорошо визуализируется изолиниями, изменяющими направление на субмеридиональное в районе 2° S— 40° E, и характеризуется пониженными значениями T_a по отно-

шению к расположенным западнее и восточнее территориям. Однако отрицательные значения поля T_a здесь не достигают такого аномального уровня, как в области Эфиопия/Афар, что может свидетельствовать о меньшем объеме расплава, вовлеченного в процесс, либо о большей глубине протекания этого процесса.

ВЫВОДЫ

Анализ пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий, построенного по данным измерений геомагнитного поля на спутнике CHAMP над территорией Африканского континента, показал его адекватность существующей в настоящее время гипотезе о воздействии Африканского суперплюма на протекание мантийных процессов в Южной Африке и далее в северо-восточном направлении.

Положение и характеристики крупных литосферных магнитных аномалий, выделенных над территорией Южной Африки, в общем, согласуются с современными представлениями о геотектонических и геофизических процессах, вызванных воздействием на эту территорию Африканского суперплюма.

Показано, что существование в магнитном поле над территорией Восточной Африки аномалий

разных знаков с высокой долей вероятности может быть генетически связано с прохождением в данном регионе потока мантийного материала суперплюма в северо-восточном направлении.

В целом обнаружено хорошее соответствие положения магнитных образов наиболее значительных литосферных аномалий моделям томографических образов сейсмических скоростей, полученным на основе большого сейсмического эксперимента SASE.

Полученные параметры аномального литосферного магнитного поля содержат информацию о намагниченности глубинных слоев литосферы, отражая свойства крупных региональных тектонических структур, топографию поверхности Кюри, связанную с геотермическим режимом на разных уровнях литосферы, что свидетельствует о перспективности использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля при изучении тектоники активных зон литосферы в труднодоступных регионах.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Внешнее финансирование отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М. Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири (по измерениям спутника ШНАМР) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. С. 1081–1092.
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Филиппов С.В. Исследование литосферных магнитных аномалий Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса по данным измерений на спутнике ШНАМР // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 5–18.
<https://doi.org/10.21455/gr2019.2-1>
- Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. О возможностях использования спутниковых геомагнитных наблюдений в исследовании геолого-тектонического строения литосферы // Исслед. Земли из космоса. 2020а. № 2. С. 69–81.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420010029>
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н. Отражение тектоники Восточной Европы в литосферных магнитных аномалиях спутниковой миссии ШНАМР // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 47-й сессии Межд. сем. им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Воронеж: Научная книга. 2020б. С. 3–7.
- Абрамова Л.М., Абрамова Д.Ю. Отражение процессов мантийного плюмового магматизма в литосферных магнитных аномалиях, полученных по данным спутника ШНАМР // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 4. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421040023>
- Борисенко А.С., Сотников В.И., Изох А.Э., Поляков Г.В., Оболенский А.А. Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 166–182.
- Добрецов Н.Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 587–604.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. 2000. № 6. С. 3–29.
- Bagley B., Nyblade A. Seismic anisotropy in eastern Africa, mantle flow, and the African superplume // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 1500–1505.
<https://doi.org/10.1002/grl.50315>
- Davies G., Pribac F. Mesozoic seafloor subsidence and the Darwin rise: past and present // American Geophys. Union Monograph. 1993. V. 77. P. 39–52.
- Forte A., Qu'ere S., Moucha R., Simmons N., Grand S., Mitrovica J., Rowley D. Joint seismic-geodynamic-mineral physical modeling of African geodynamics: a reconciliation of deep-mantle convection with surface geophysical constraints // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. V. 295. P. 329–341.
- Fouch M.J., James D.E., Van Decar J., van der Lee S., the Kaapvaal Seismic Group. Mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe cratons // S. Afr. J. Geol. 2004. V. 107. P. 33–44.
<https://doi.org/10.2113/107.1-2.33>
- Hansen S., Nyblade A., Benoit M. Mantle structure beneath Africa and Arabia from adaptively parameterized P-wave tomography: Implications for the origin of Cenozoic Afro-Arabian tectonism // Earth Planet. Sci. Lett. 2012. V. 319–320. P. 23–34.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.023>
- Hansen S., Nyblade A. The deep seismic structure of the Ethiopia/Afar hotspot and the African superplume // Geophys. J. Int. 2013. V. 194(1). P. 118–124.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt116>
- Loper D.E. Mantle plumes // Tectonophysics. 1991. V. 187. P. 373–384.
- Maruyama Sh. Plume tectonics // Geol. Soc. Japan. 1994. V. 100. P. 24–34.
- Maus S., Barchhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., The'bault E., Caratori Tontini F. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst. 2009. V. 10 (8). Q08005.
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Montelli R., Nolet G., Dahlen F.A., Masters G. A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography // Geochem. Geophys. Geosyst. 2006. V. 7. Q11007.
<https://doi.org/10.1029/2006GC001248>
- Morgan, W. Convection plumes in the lower mantle // Nature. 1971. V. 230. P. 42–43.
- Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer Academic Publishers. 2004. 556 p.

- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P.* CHAMP Mission Status // *Advances in Space Research* 2002. V.30. P. 129–134. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4).
- Ritsema J., van Heijst H., Woodhouse J.* Complex shear wave velocity structure beneath Africa and Iceland // *Science*. 1999. V. 286. P. 1925–1928.
- Ritsema J., Allen R.* The elusive mantle plume // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 207. P. 1–12.
- Simmons N., Forte A., Grand S.* Thermochemical structure and dynamics of the African superplume // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34(2). L02301. <https://doi.org/10.1029/2006GL028009>
- Wessel P., Smith W.H.F.* The generic mapping tools // Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. <http://gmt.soest.hawaii.edu>.
- Wilson J.* A possible origin of the Hawaiian Islands // *Canadian J. Physics*. 1963. V. 41. P. 863–870.
- Zhao Dapeng.* Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Research*. 2009. V. 15. P. 297–323.

Image of Mantle Plume Processes in the Satellite Magnetic Field Over Africa Territory

L. M. Abramova¹, I. M. Varentsov¹, and D. Yu. Abramova²

¹*Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

²*Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

The spatial distribution of the lithospheric magnetic anomalies field carries information about its sources – deep tectonic structures – and reflects the processes occurring at mantle depths. Based on the geomagnetic data measured by the CHAMP satellite at an observation altitude of ~290 km, the lithospheric magnetic field parameters over the territory of the African continent were calculated. A lot of maps of the lithospheric magnetic anomalies field total intensity T_a based on various scales and degrees have been constructed. The distribution of T_a over the territories of South and East Africa is given. An analysis of lithospheric magnetic anomalies maps over the territories of African superplume influence showed good agreement with the existing hypothesis about the mantle superplume flow intrusion from the lower mantle to the upper mantle in the northeast direction and its further spread under the East African rift zone. The obtained parameters of the anomalous lithospheric magnetic field contain information about the magnetization of the lithosphere deep layers, reflecting the magnetic properties of large regional tectonic structures and the topography of the Curie surface, which is associated with the geothermal regime and tectonic setting at different levels of the lithosphere. The work shows the perspective of the geomagnetic field satellite observations using in the study of the active zones tectonics and mapping of deep lithosphere heterogeneities in hard-to-reach areas.

Keywords: lithospheric magnetic anomalies, CHAMP, African superplume, mantle flow, Ethiopia/Afar hotspot

REFERENCES

- Abramova D. Yu., Abramova L.M.* Litosfernyye magnitnyye anomalii na territorii Sibiri (po izmereniyam sputnika CHAMP) [Lithospheric magnetic anomalies on the territory of Siberia (based on measurements from the CHAMP satellite)] // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. P. 1081–1092 (in Russian).
- Abramova D. Yu., Abramova L.M., Varentsov Iv.M., Filippov S.V.* Issledovaniye litosfernykh magnitnykh anomalii Grenlandsko-Islandsko-Farerskogo vulkanicheskogo kompleksa po dannym izmereniy na sputnike CHAMP [Investigation of lithospheric magnetic anomalies of the Greenland-Iceland-Faroe Volcanic complex based on measurements on the CHAMP satellite] // *Geophysical research*. 2019. V. 20. № 6. P. 5–18. (in Russian).
- Abramova D. Yu., Filippov S.V., Abramova L.M.* O vozmozhnostyakh ispolzovaniya sputnikovykh geomagnitnykh nablyudeniy v issledovanii geologo-tektonicheskogo stroeniya litosfery [On the possibilities of using satellite geomagnetic observations in the study of the geological and tectonic structure of the lithosphere] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020a. № 2. P. 69–81. (in Russian).
- Abramova D. Yu., Abramova L.M., Varentsov Iv.M., Lozovsky I.N.* Otrazheniye tektoniki Vostochnoy Yevropy v litosfernykh magnitnykh anomaliiakh sputnikovoy missii CHAMP [Image of the tectonics of Eastern Europe in the lithospheric magnetic anomalies of the CHAMP satellite mission] // *Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Proceedings of the 47th session of the D.G. Uspensky – V.N. Strakhov. Voronezh: Scientific book*. 2020b. P. 3–7.
- Abramova L.M., Abramova D. Yu.* Otrazheniye protsessov mantiynogo plyumovogo magmatizma v litosfernykh magnitnykh anomaliiakh, poluchennykh po dannym sputnika CHAMP [Image of the Mantle Plume Magmatism Processes in the Lithospheric Magnetic Anomalies on the CHAMP satellite Data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2021. № 4. P. 3–14. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961421040023>
- Bagley B., Nyblade A.* Seismic anisotropy in eastern Africa, mantle flow, and the African superplume, *Geophys. Res. Lett.*, 2013. V. 40. P. 1500–1505. <https://doi.org/10.1002/grl.50315>.
- Borisenko A.S., Sotnikov V.I., Izokh A.E., Polyakov G.V., Obolensky A.A.* Permotriasovoye orudneniye Azii i yego

- svyaz' s proyavleniyem plyumovogo magmatizma [Permian-Triassic mineralization of Asia and its relationship with the manifestation of plume magmatism] // *Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. № 1. P. 166–182. (in Russian).
- Davies G., Pribac F.*, Mesozoic seafloor subsidence and the Darwin rise: Past and Present, *American Geophys. Union Monograph*. 1993. V. 77. P. 39–52.
- Dobretsov N.L.* Geologicheskie sledstviya termohimicheskoy modeli pljumov [Geological implications of the thermochemical plume model] // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49. № 7. P. 587–604. (in Russian).
- Forte A., Qu'ér'e S., Moucha R., Simmons N., Grand S., Mitrovica J., Rowley D.* Joint seismic-geodynamic-mineral physical modeling of African geodynamics: a reconciliation of deep-mantle convection with surface geophysical constraints // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 295. P. 329–341.
- Fouch M.J., James D.E., Van Decar J., van der Lee S., the Kaapvaal Seismic Group.* Mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe cratons // *S. Afr. J. Geol.*, 2004/ V. 107. P. 33–44.
<https://doi.org/10.2113/107.1-2.33>
- Hansen S., Nyblade A., Benoit M.* Mantle structure beneath Africa and Arabia from adaptively parameterized *P*-wave tomography: Implications for the origin of Cenozoic Afro-Arabian tectonism, *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. V. 319–320. P. 23–34.
- Hansen S., Nyblade, A.* The deep seismic structure of the Ethiopia/Afar hotspot and the African superplume // *Geophys. J. Int.* 2013. V. 194(1). P. 118–124.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt116>
- Loper D.E.* Mantle plumes // *Tectonophysics*. 1991. V. 187. P. 373–384.
- Maruyama Sh.* Plume tectonics // *Geol. Soc. Japan*. 1994. V. 100. № 1. P. 24–34.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozina J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., The'bault E., Caratori Tontini F.* EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2009. V. 10(8). Q08005.
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Montelli R., Nolet G., Dahlen F.A., Masters G.* A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. V. 7. Q11007.
<https://doi.org/10.1029/2006GC001248>
- Morgan W.* Convection plumes in the lower mantle // *Nature*. 1971. V. 230. P. 42–43.
- Pirajno F.* Ore deposits and mantle plumes. Kluwer Academic Publishers, 2004, 556 p.
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P.* CHAMP Mission Status // *Advances in Space Research* 2002. V. 30. P. 129–134.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4)
- Ritsema J., van Heijst H., Woodhouse J.* Complex shear wave velocity structure beneath Africa and Iceland // *Science*. 1999. V. 286. P. 1925–1928.
- Ritsema J., Allen R.* The elusive mantle plume // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 207. P. 1–12.
- Simmons N., Forte A., Grand S.* Thermochemical structure and dynamics of the African superplume // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34(2). L02301.
<https://doi.org/10.1029/2006GL028009>
- Wessel P., Smith W.H.F.* The generic mapping tools // *Technical reference and cookbook version 4.2*, 2007.
<http://gmt.soest.hawaii.edu>
- Wilson J.* A possible origin of the Hawaiian islands // *Canadian J. Physics*. 1963. V. 41. P. 863–870.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kuzmin M.I.* Severo-Aziatskiy superplyum v fanerozoje: magmatizm i glubinnaya geodinamika [North Asian superplume in the Phanerozoic: magmatism and deep geodynamics] // *Geotectonics*. 2000. № 6. P. 3–29. (in Russian).
- Zhao Dapeng.* Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Research*. 2009. V. 15. P. 297–323.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МОНИТОРИНГ СЕНОКОСНЫХ ПОЛЕЙ ПО ГЕОБОТАНИЧЕСКИМ, НАЗЕМНЫМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2023 г. И. Ю. Ботвич^а, *, Н. А. Кононова^а, Д. В. Емельянов^а, Т. И. Письман^а

^аИнститут биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

Проведена оценка возможности мониторинга сенокосных угодий на основе различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, CIGreen, NDRE, NDMI), рассчитанных по спутниковым данным Sentinel-2 в течение вегетационного сезона 2018 г. Геоботанические исследования и данные наземной спектрофотометрии проводились одновременно в одно и то же время суток и использовались как дополнительный этап мониторинга сенокосения. Показана возможность распознавания сенокосных угодий и определения даты сенокосения по наземным и спутниковым спектрометрическим данным. Отмечено падение величины индексов (NDVI, CIGreen, NDRE, NDMI) в дату сенокосения (25.07.2018 г.). Подтверждена достоверность возможности дешифрирования сенокосных полей по индексу NDVI. Показано, что даты сенокосения, определенные по спутниковым данным, хорошо согласуются с наземными датами сенокосения (25 июля и 27 августа). Построены карты пространственного распределения индекса NDVI сенокосных полей по спутниковым данным Sentinel-2 за даты (18 июня, 10 июля и 27 августа). Полученные карты позволяют выявлять сенокосные поля и дату сенокосения на больших территориях.

Ключевые слова: сенокосные угодья, спутниковые данные, Sentinel-2, Spectral Evolution, NDVI, CIGreen, NDRE, NDMI

DOI: 10.31857/S0205961423010037, **EDN:** MLOLYA

ВВЕДЕНИЕ

На всех этапах развития сельского хозяйства Российской Федерации одной из проблем было соответствие кормовой базы потребностям животноводства. В условиях рыночной экономики роль кормовой базы в производстве конкурентоспособной продукции животноводства в определенной степени возрастает. Это обусловлено изменениями форм и методов хозяйствования в аграрной системе.

Для интенсификации животноводства требуется создание устойчивой кормовой базы. Луговые и степные фитоценозы являются стабилизирующим средством сохранения окружающей среды (Родионова, 2017). Поддержание высокой урожайности фитоценозов на сенокосах является одной из основных задач сельского хозяйства.

Большое влияние на изменение растительных сообществ оказывает регулярное сенокосение, вызывающее изменение видового состава травостоя и его продуктивности. Характер этого воздействия зависит от сроков и частоты скашивания, высоты среза, способов ухода за сенокосом и может различно проявляться на различных типах степей и лугов (Лапенко и др., 2018).

Являясь источником биологически ценных кормов из дикорастущих трав, природные кормовые угодья (сенокосы) играют важнейшую роль в отечественном животноводстве. Повышенная антропогенная нагрузка и меняющиеся климатические условия часто приводят к трансформации природных травостоев, в том числе к изменению их продуктивности и видового состава. Организация устойчивого животноводства сопряжена с необходимостью постоянного контроля состояния естественных кормовых угодий. Для оценки состояния природных травостоев обычно проводят наземные геоботанические обследования, которые в силу своей трудоёмкости и больших размеров, требующих обследования территорий, не способны обеспечить регулярное получение информации с достаточно высоким уровнем точности (Ерошенко и др., 2018).

В настоящее время проведено недостаточно исследований по мониторингу сенокосения на основе дистанционного зондирования. Имеются данные по расчету вегетационного индекса NDVI полей хозяйства Курагинское (Россия) за 2020 г. Индекс NDVI получен на основе спутниковых снимков PlanetScore с пространственным разрешением 3 м. Получены карты пространственного

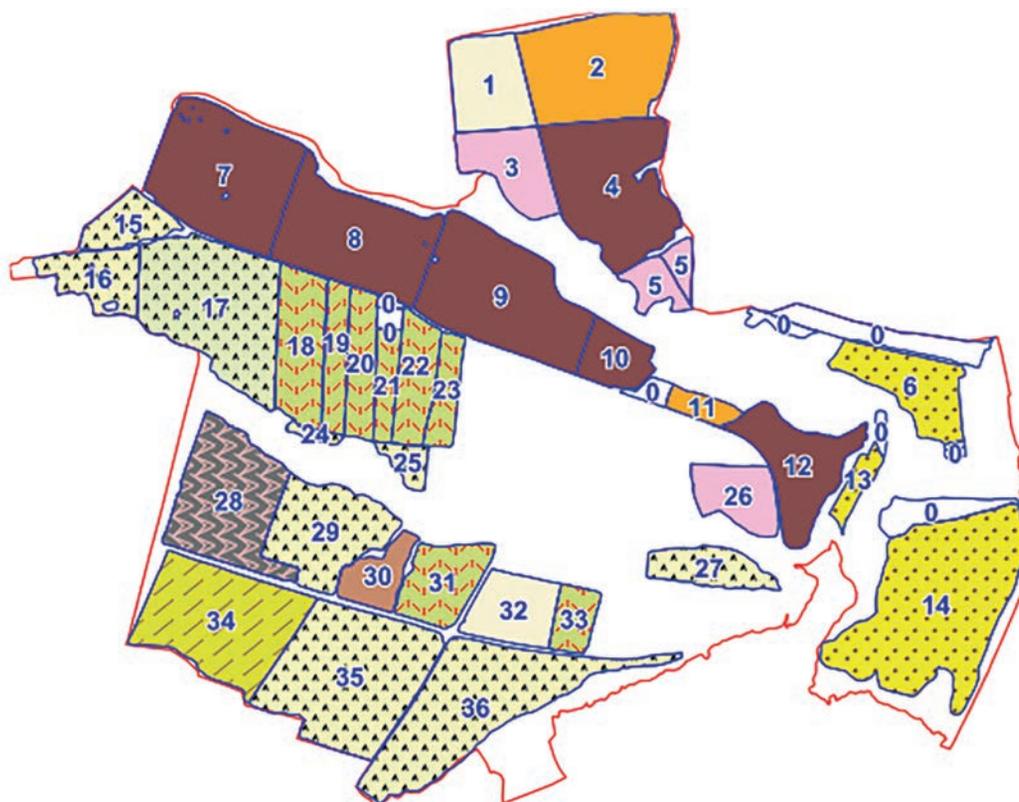


Рис. 1. Тематическая карта полей на территории Красноярского НИИСХ (Минино) в 2018 г. Поля № 34 и 35 – сенокосные угодья.

разрешения NDVI полей, анализ которых позволяет отличить поля до кошения и после кошения (Egunova, 2021).

В следующей работе представлены данные по исследованию стресса дефицита воды у растений, подверженных дефициту почвенной влаги (Bayat et al., 2016). Растения могут ощущать дефицит влаги после кошения. Показано, что наиболее чувствительными к дефициту воды параметрами являются листовой индекс (LAI) и индекс содержания воды в листьях (C_w).

В работе Bretas et al. показана корреляция индексов NDVI, EVI и OSAVI с биомассой пастбищ в Бразилии. Для расчета индексов использованы снимки Landsat 8 и Sentinel-2 (Bretas et al., 2020).

Целью данной работы является мониторинг сенокосных угодий на основе различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, CI-Green, NDRE, NDMI), рассчитанных по наземным спектрометрическим и спутниковым данным Sentinel-2 в течение вегетационного сезона 2018 г.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования. Объектом исследования являются поля на территории землепользования Красноярского научно-исследовательского института сельского хозяйства (НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН) вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край) в течение вегетационного периода 2018 г. Поля расположены в южной части Красноярской лесостепи, в 5–7 км от г. Красноярска (рис. 1). Территория землепользования – равнинная, южная, открытая, достаточно теплая часть лесостепи с выраженными остепненными участками. Поля № 34 и 35 являются сенокосными угодьями с 2016 г. и имеют площади 108 и 132 га соответственно.

Для верификации спутниковых данных исследуемые поля № 34 и 35 разделены на экспериментальные участки 1–9 (без сенокосения и с разной датой сенокосения в течение вегетационного сезона 2018 г.) (рис. 2).

Красноярская лесостепь имеет прохладный режим погоды, достаточное увлажнение (гидротермический коэффициент равен 1.2–1.6). Характеризуется суммой температур за период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$ от 1400 до 1600 $^{\circ}\text{C}$, количество осадков достигает за этот же период 160–210 мм,



Рис. 2. Карта исследуемых полей № 34 и 35, разделенных на экспериментальные участки: участки 1–3 (без сенокосения), участки 4–9 (с сенокосением в разные даты). Участки 4 и 5 скошены 25.07, участки 6 и 7 – 19.08, участки 8 и 9 – 27.08.

среднегодовое количество осадков составляет 488 мм. Период вегетации растений при температуре выше 10°C длится 100–105 дней (Кононова, 2019).

Геоботанические методы исследований. С целью достоверного определения изменения спектральных характеристик растительности до и после сенокосения на тестовом поле № 34 проведены модельные опыты. В пяти точках на площадках размером 50 × 50 см в трехкратной повторности определяли проективное покрытие и снимали спектры общего вида растительности (до среза). Затем проводился срез надземных побегов, после чего спектры снимали повторно. Параллельно определяли видовой состав. Для верификации данных дистанционного зондирования в пределах каждой пробной площадки определена сырая надземная фитомасса (Кононова, 2019).

Наземные спектрофотометрические методы. Наземные измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) проводились одновременно с геоботаническими исследованиями в течение вегетационного периода 2018 г. Для проведения наземной спектрометрии использовали полевой спектрометрический комплекс, состоящий из полевого портативного спектрометра Spectral Evolution PSR-1100F, портативного компьютера PDA GETAC, калибровочного отражающего эталона (Spectral Evolution), цифрового фотоап-

парата и соответствующего программного обеспечения (Ботвич и др., 2018; Pisman et al., 2019). С помощью данного комплекса производились измерения коэффициента спектральной яркости объекта в диапазоне от 320 до 1100 нм. Полученные спектры имеют привязку к координатам местности по GPS, высоте местности, обеспечены соответствующей фотосъемкой и голосовыми заметками. Измерения КСЯ растительности исследуемых полей выполнялись с 11 до 15 ч местного времени, что на широте проводимых работ обеспечивало достаточные условия освещения объектов.

Спутниковые данные. В работе использованы спутниковые данные Sentinel-2 за 2018 г. с пространственным разрешением 10 м. Для этого используются данные Sentinel-2, имеющие уровень обработки Level-2A. Атмосферная коррекция данных выполнена на основе алгоритма, предложенного в статье авторов (Richter and Schläpfer, 2011).

Для оценки возможности распознавания сенокосных полей и даты сенокосения использованы различные спектральные вегетационные индексы – NDVI, CiGreen, NDRE, NDMI (табл. 1).

NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель количества фотосинтетически активной биомассы (Rouse et al., 1974). Этот индекс использует контраст характеристик

Таблица 1. Формулы спектральных индексов по наземным спектрометрическим (Spectral Evolution PSR-1100F) и спутниковым (Sentinel-2) данным

Вегетационный индекс	Формула расчета
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$
CI _{Green} (Green Chlorophyll Index)	$CI_{Green} = NIR / GREEN - 1$
NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)	$NDRE = (NIR - RED\ Edge) / (NIR + RED\ Edge)$
NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$

Примечание: NIR – отражение в ближней инфракрасной области, RED – отражение в красной области спектра, GREEN – отражение в зеленой области спектра, RED Edge – отражение в крайней красной области, SWIR – отражение в средней инфракрасной области спектра.

двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных – поглощения пигментом хлорофилла в красном канале (RED) и высокой отражательной способности растительности в инфракрасном канале (NIR). На значения индекса влияет видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция склонов и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. В случае, если густота растительного покрова более 70%, индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного фона. Если густота растительного покрова меньше 30% и более 80% NDVI применять не стоит.

CI_{Green} – относительный индекс хлорофилла (Green Chlorophyll Index) – показатель фотосинтетической активности растительного покрова, наиболее часто используемый при оценке содержания хлорофилла а и b в листьях растений по мультиспектральным данным ДЗЗ, у которых отсутствует крайний красный канал (Gitelson et al., 2005). Чем больше содержание хлорофилла в листьях растений, тем выше значения индекса.

NDRE – нормализованный разностный индекс азота (Normalized Difference Red Edge Index) – показатель фотосинтетической активности растительного покрова, используемый для оценки концентраций азота в листьях растений с использованием ближнего инфракрасного (750–1000 нм) и крайнего красного (690–730 нм) каналов. Индекс применим при оценке угнетенной и стареющей растительности. Эффективен при оценке содержания азота в листьях растений по мультиспектральным данным, у которых есть крайний красный и ближний инфракрасный спектральные каналы (Barnes et al., 2000). Для растительности индекс NDRE принимает положительные значения, чем выше содержание азота в листьях растений, тем больше значение индекса.

NDMI – нормализованный разностный индекс влажности (Normalized Difference Moisture Index) – показатель содержания влаги в почве и листьях растений. Для расчета индекса используются значения спектральной яркости в ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах спектра. Данный индекс более чувствителен к

содержанию влаги в почве и листьях растений по сравнению с индексом NDWI за счет использования среднего инфракрасного канала. Индекс NDMI предназначен для оценки неоднородности степени увлажнения растительности и почв (Gao B.C., 1995).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геоботаническое исследование. Исследуемые поля представляют собой сенокосные угодья и залежи, возраст которых не превышает 3 года. Поле № 34 в основном является сенокосным угодьем с 2016 г. и поле № 35 – молодой залежью, отданной под сенокос (рис. 1). Горизонтальная структура травостоя на поле № 34 мозаичная. Общее проективное покрытие варьирует в пределах 65–85% в зависимости от видового состава. Мозаичность структуры травостоя способствовала значительным колебаниям фитомассы в разных срезах (табл. 2) (Кононова, 2019).

Злаковую основу составляет мезофит пырей ползучий *Elytrigia repens* (L.) Nevski со средней высотой 75 см и проективным покрытием до 50%. *Disymbrium loeselii* L. Из типично сорных видов также встречаются липучка ежевидная *Lappula echinata* Gilib. и льнянка обыкновенная *Linaria vulgaris* Mill. На участке отмечены монодоминантные полосы донника лекарственного *Melilotus officinalis* (L.) Pall., горошка приятного *Vicia cracca* L. с проективным покрытием до 60%, что существенно увеличивает кормовую ценность травостоя (Кононова, 2019).

Наземная спектрофотометрия. Геоботанические исследования и данные наземной спектрофотометрии проводились одновременно в одно и то же время суток (в период с 10 до 15 ч местного времени) и использовались как отдельный этап мониторинга сенокосения.

Известно, что растительный покров отличается характерным максимумом отражательной способности в зеленой (0.55 мкм), минимумом – в красной (0.66 мкм) и резким увеличением отражения в ближней инфракрасной зоне. Низкая отражательная способность вегетирующих расте-

Таблица 2. Виды доминирующих растений и величина сырой надземной фитомассы на опытных площадках размером 50 × 50 см на поле № 34

№ среза	Виды доминирующих растений	Общая сырая надземная фитомасса, г/м ²
1	Одуванчик лекарственный <i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg	569.7 ± 23.5
2	Липучка ежевидная <i>Lappula echinata</i> Gilib Гулявник Лезеля <i>Sisymbrium loeselii</i> L.	501.0 ± 26.8
3	Донник лекарственный <i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall.	694.0 ± 23.3
4	Пырей ползучий <i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	896.5 ± 38.5
5	Бодяк полевой <i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop., вьюнок полевой и донник лекарственный <i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall	772.6 ± 25.3

ний в красной зоне связана с поглощением, а ее увеличение в зеленой зоне — с отражением этих лучей хлорофиллом. Большие коэффициенты яркости в ближней инфракрасной зоне объясняются пропусканием этих лучей хлорофиллом и отражением их от внутренних тканей листа (Кострова, Костров, 2010).

На рис. 3. представлены наземные спектры сенокосных полей до сенокосения и после. Наземные спектры отражения травостоя до и после сенокосения существенно отличаются по величине КСЯ и по форме спектра. Зависимость КСЯ от длины волны сенокосных полей до сенокосения имеет вид классической кривой активной фотосинтезирующей растительности. Значения отражения в красном диапазоне спектра (0.66 мкм) определяются концентрацией хлорофилла, содержащегося в листьях растений. В красной зоне спектра величина КСЯ минимальна, т.е. отражение минимально (имеется наибольший прогиб). После сенокосения кривая зависимости КСЯ от длины волны выпрямляется, значение КСЯ, т.е. отражение в красной зоне спектра возрастает.

Спутниковый мониторинг. Для оценки возможности распознавания сенокосных угодий и определения даты сенокосения по спутниковым данным проведен анализ информативности различных вегетационных индексов (NDVI, CIGreen, NDRE, NDMI) в течение вегетационного периода 2018 г. (рис. 4).

Данные индексы являются показателями фотосинтетической активности растительного покрова: NDVI используется для качественной оценки величины фитомассы растений, CIGreen — для оценки содержания хлорофилла а и b в листьях растений, NDRE — для оценки концентрации азота в листьях растений. В результате выявлена идентичная динамика спектральных индексов NDVI, CIGreen и NDRE полей до сенокосения и после сенокосения (рис. 4, а, 4, б, 4, в). Отмечено падение величины индексов в дату сенокосения (25.07.2018). Связано это с тем, что в связи с сенокосением происходит уменьшение величины

фотосинтезирующей биомассы и соответственно — хлорофилла и азота.

Индекс NDMI является показателем содержания влаги в почве и листьях растений (рис. 4, г). В связи с этим динамика индекса NDMI аналогична динамике индексов NDVI, CIGreen и NDRE полей с сенокосением. Однако на поле без сенокосения в конце вегетационного периода динамика NDMI отличается от динамики остальных исследуемых индексов. В конце сезона растительность теряет влагу, иссушается, обнажается почва. В результате величина индекса NDMI уменьшается. Таким образом, выявлено, что индекс NDMI является более чувствительным к изменению растительности и почвы, чем индексы NDVI, CIGreen и NDRE.

На рис. 4. представлена динамика четырех вегетационных индексов: NDVI (а), CIGreen (б), NDRE (в) и NDMI (г) полей без сенокосения и с сенокосением по спутниковым данным Sentinel-2 (дата сенокосения — 25.07). При анализе спутниковых данных, представленных в нашей работе, выяснено, что динамика индексов NDVI, CIGreen, NDRE в течение вегетационного сезона подобна, так как они являются показателями фотосинтетической активности растительного покрова. Однако, отмечено, что в результате сенокосения произошло уменьшение величин индексов до значений, которые различаются для каждого индекса: для NDVI — 0.24, для CIGreen — 1, для NDRE — 0.15.

Подтверждением достоверности возможности дешифрирования сенокосных полей по индексу NDVI является сравнительная оценка выявления различных дат сенокосения в течение вегетационного периода по наземным и спутниковым данным (рис. 5). На рис. 5 представлена динамика NDVI для 3-х участков. Именно эти 3 участка выбраны потому, что на них сенокосение было проведено в разные даты. В результате показано, что даты сенокосения, определенные по спутниковым данным, хорошо согласуются с наземными датами сенокосения (25.07 и 27.08). Наземные

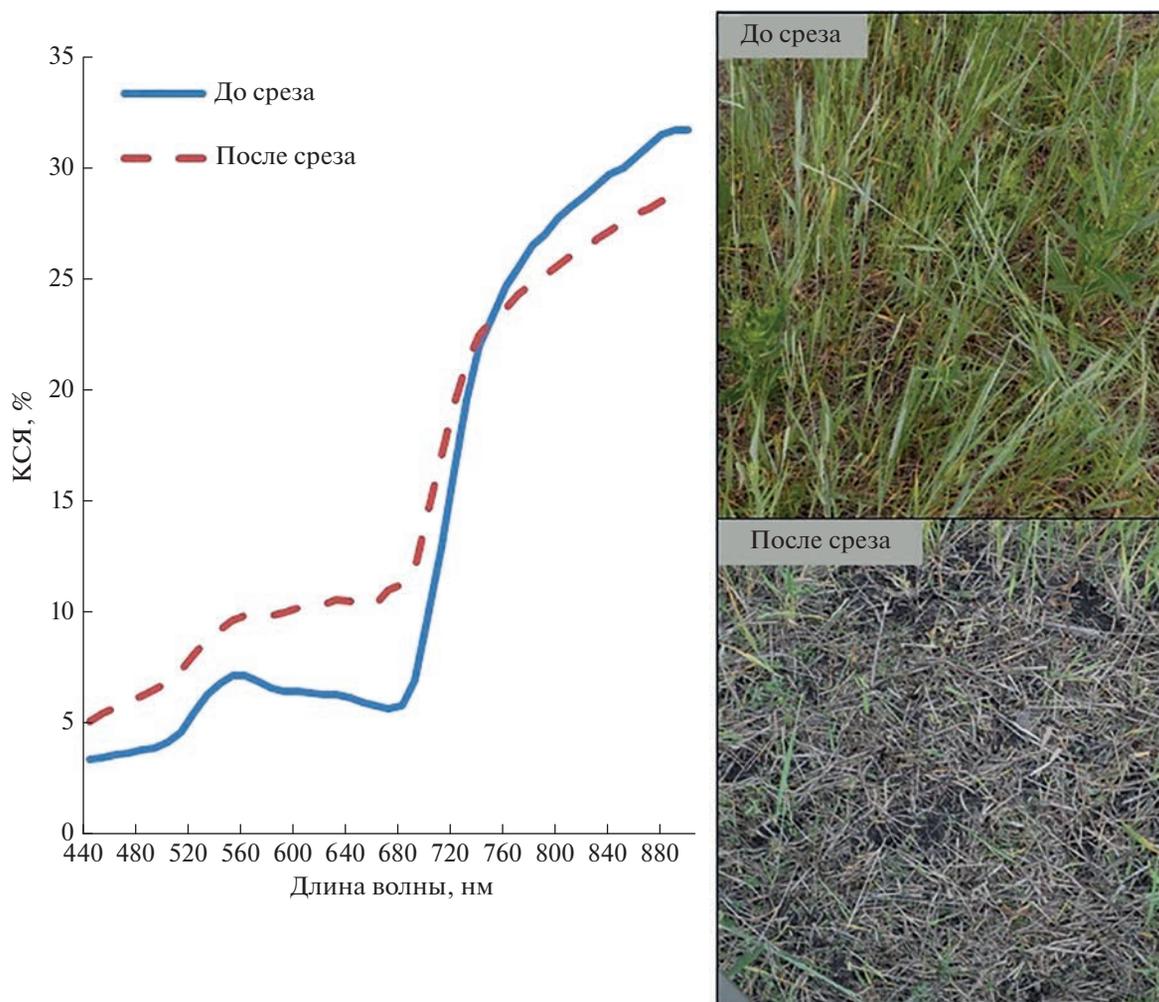


Рис. 3. Наземные спектры сенокосных полей до сенокосения и после.

данные использованы для верификации спутниковых данных — подтверждения достоверности использования резкого падения индекса NDVI при сенокосении в разные даты.

Наиболее информативным приемом, позволяющим отобразить и изучить пространственную структуру земельных угодий, служит картографирование. Интенсивно развивающиеся методы цифрового картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли являются наиболее перспективными в решении данной проблемы.

Построение карт пространственного распределения вегетационных индексов на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения в течение периода вегетации является неотъемлемой частью мониторинга растительности, в том числе сенокосных угодий.

На рис. 6 представлены карты пространственного распределения индекса NDVI исследуемых полей № 34 и 35 в течение вегетационного перио-

да (18.06, 10.07 и 27.08). В середине июня (18.06) растительность находится в активной фазе, в это время значения NDVI полей № 34 и 35 близки и достигают достаточно высоких величин — около 0.6–0.7 (рис. 6, а).

В начале июля (10.07) до сенокосения на отдельных площадках поля № 34 (выделено желто-красным цветом) показатели NDVI достигают более высоких значений (0.7–0.8) (рис. 6, б).

Доминирующий на обоих полях злак пырей ползучий формирует достаточно плотный травостой. Среднее проективное покрытие доминанта составляет 50%, в то же время на отдельных площадках поля № 34 покрытие пырея достигает 80%, что и обуславливает высокие показатели NDVI. Одновременно на поле № 35 (трехлетняя залежь) некоторые виды растений зацветают, в связи с чем величина NDVI начинает уменьшаться (выделено синим цветом).

В конце августа (27.08) на поле № 34, на участке 5 (выделено зеленым цветом) величина индекса

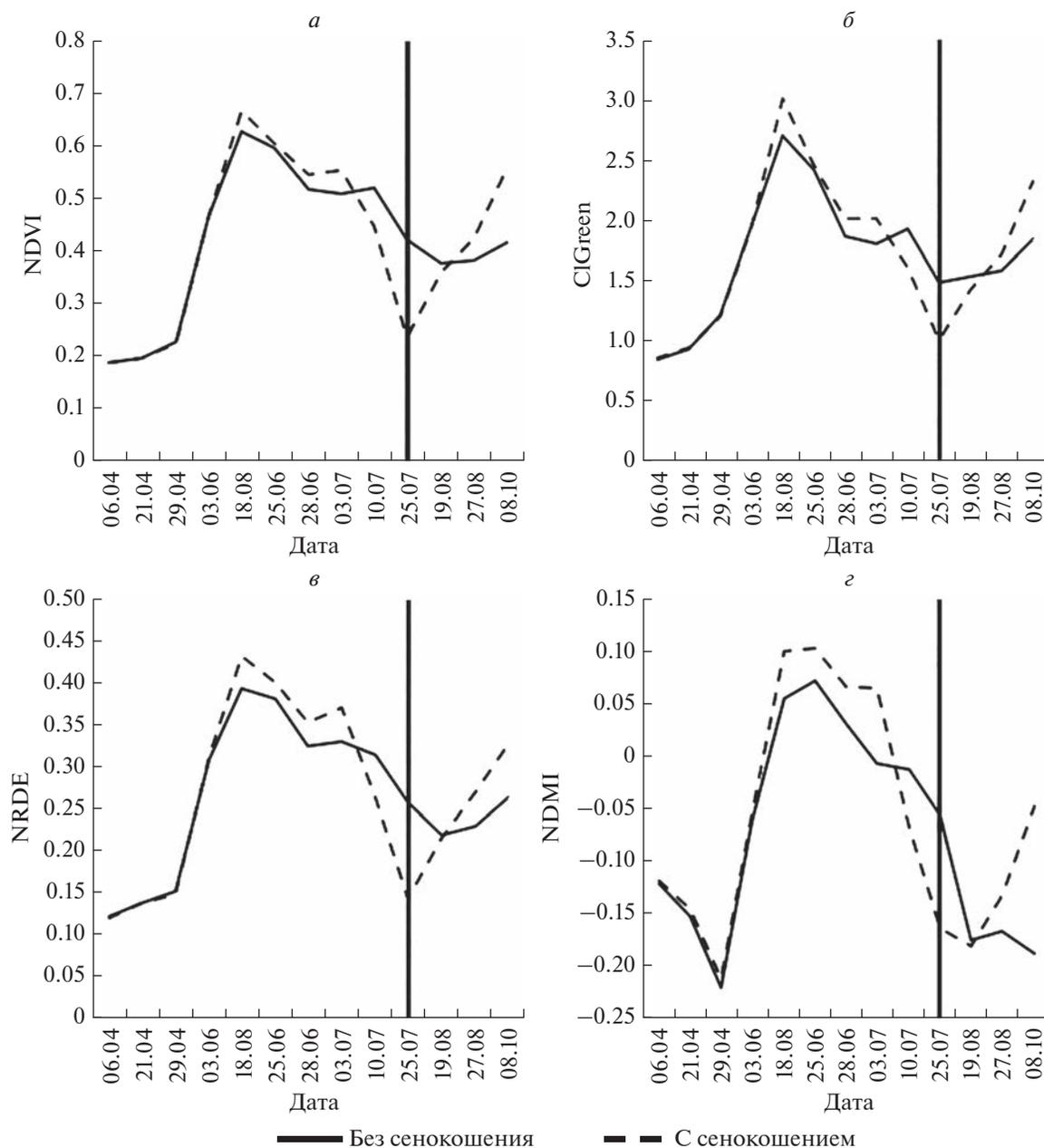


Рис. 4. Динамика вегетационных индексов: NDVI (а), CIGreen (б), NDRE (в) и NDMI (г) полей без сенокосения и с сенокосением по спутниковым данным Sentinel-2 (дата сенокосения – 25.07).

NDVI повышена за счет того, что трава была скошена в конце июля (25.07) и через месяц она снова выросла (рис. 6, в). На участке (6–9) сенокосение проводилось в августе (19.08 и 27.08), в результате чего величина индекса NDVI уменьшилась (обозначено синим цветом).

На поле № 35 в конце августа (27.08) величина NDVI падает за счет пожелтения растительности залежи, так как на этом поле сенокосения не было.

Таким образом, на основе рассматриваемых в данной работе вегетационных индексов (NDVI,

CIGreen и NDRE), которые являются показателями фотосинтетической активности и NDMI, который является показателем содержания влаги в почве и листьях растений, построен алгоритм классификации сенокосных угодий и определения дат сенокосения. Алгоритм приведен для наиболее часто используемого индекса NDVI.

Для участков 1–9 строятся графики динамики NDVI в течение вегетационного сезона. Для определения дат сенокосения использовали классификацию типа дерево решений, основанную на ис-

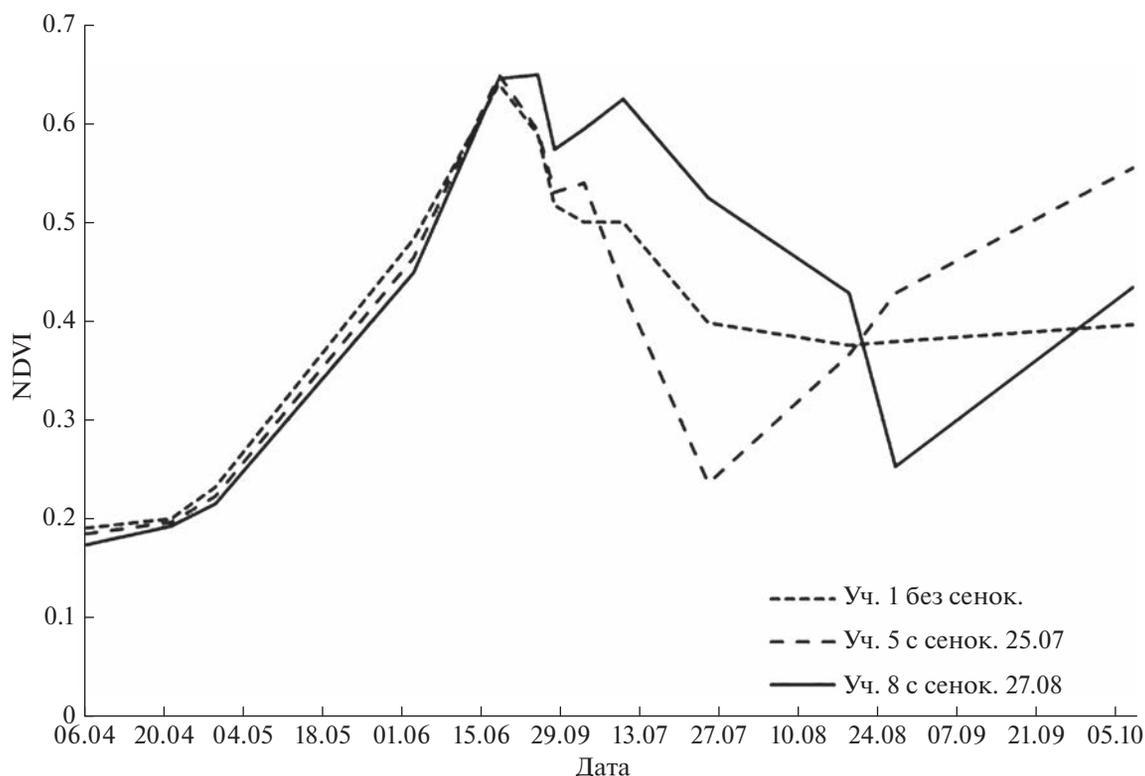


Рис.5. Динамика NDVI экспериментальных участков (без сенокоса и с сенокосом в разные даты) в течение вегетационного периода по спутниковым данным Sentinel-2.

пользовании пороговых величин. Поиск дат сенокоса выполняется для значений NDVI в июле–августе, так как в более ранний период сенокоса на данной территории не проводится. Далее в алгоритме используются две пороговые величины: 1 – значение NDVI должно быть выше значений, полученных в конце апреля–начале мая. В этот период времени снежный покров отсутствует, рост растительного покрова не происходит. На участках присутствует стерня и остатки расти-

тельности с предыдущего периода вегетации. 2 – значение NDVI должно быть ниже пороговой величины 0.33. Величина данного порога определена на основании значений NDVI тестовых участков 1–3 (без сенокоса).

Таблица 3. Даты сенокоса исследуемых участков (1–9) по величине NDVI в течение вегетационного периода 2018 г. на основе спутниковых данных Sentinel-2

Номер участка	Дата сенокоса
1	–
2	–
3	–
4	25.07
5	25.07
6	19.08
7	19.08
8	27.08
9	27.08

Сравнение дат сенокоса, определенных по спутниковым данным, с наземными датами покосов показало достоверность определения дат сенокоса по спутниковым данным. Для участков 1–3 отмечено постепенное уменьшение величины NDVI в течение вегетационного сезона, что приводит к выводу об отсутствии сенокоса. Действительно, по наземным данным на этих участках сенокоса не производилось. Для участков 4–9 отмечено резкое уменьшение величины NDVI в разные даты: для участков 4 и 5 – 25.07, для участков 6 и 7 – 19.08 и для участков 8 и 9 – 27.08. Резкое уменьшение величины NDVI свидетельствует об уменьшении биомассы, т.е. скашивании травы. Даты сенокоса, определенные по спутниковым данным, подтверждены наземными данными.

Результаты определения дат сенокоса тестовых участков 1–9 представлены в табл. 3.

Таким образом, нам удалось различать даты скашивания травы. Как и ожидалось, облака и смешанные пиксели снижали точность обнаружения скашивания. Необходимо отметить отли-

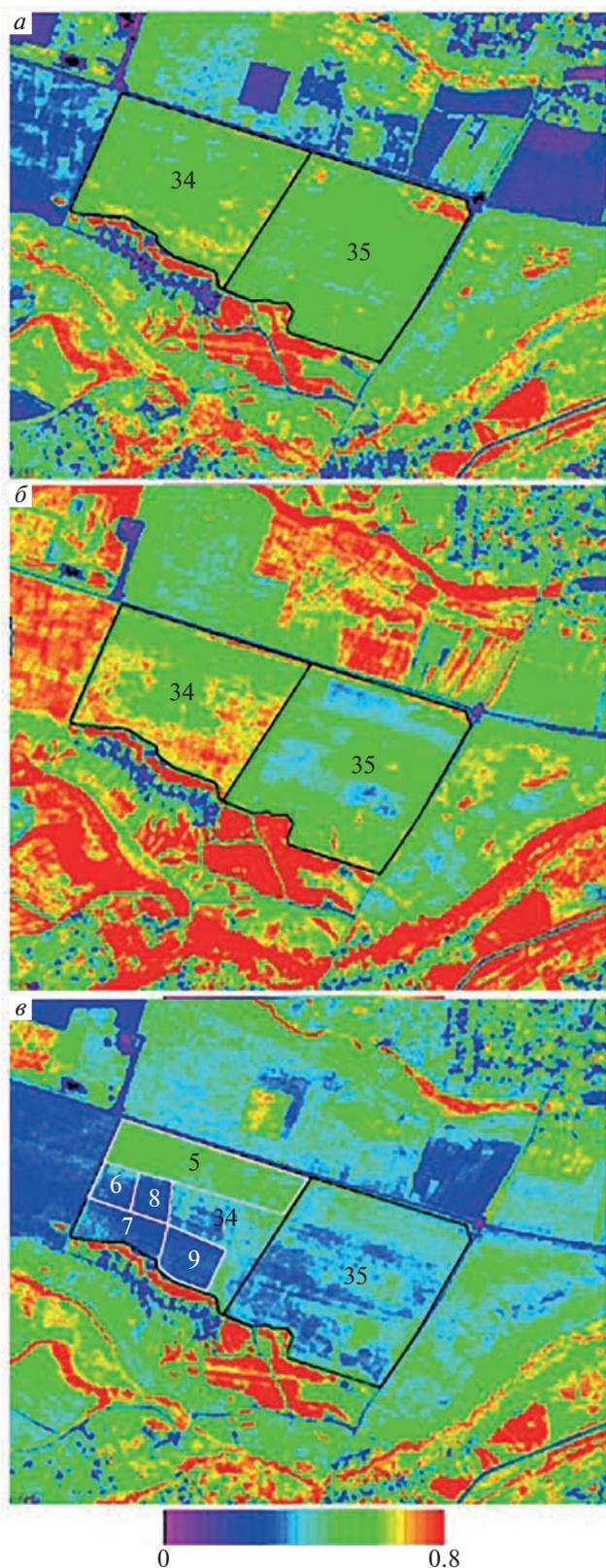


Рис. 6. Карты пространственного распределения индекса NDVI сенокосных полей, построенные за даты: 18.06 (а), 10.07 (б) и 27.08 (в) по спутниковым данным Sentinel-2.

чие определения скашивания и использования поля под пастбище. При скашивании величина NDVI уменьшается резко, при выпасе величина NDVI снижается плавно.

Трудности в обнаружении скашивания связаны с применением на одном участке разных способов использования поля (временная залежь, тени от близко расположенного леса и т.д.). В этом случае есть преимущество для обнаружения сенокосения при использовании больших площадей и построении карт пространственного распределения вегетационных индексов (в данном случае NDVI на площадях 108 и 132 га).

Другие авторы обнаружили, что маскирование облаков имеет большое значение для идентификации кошения травянистых угодий по двум причинам. Во – первых, однодневные облачные наблюдения вызывают внезапное падение NDVI, которое можно спутать с покосом. Во – вторых, затяжная облачность препятствует обнаружению быстрых событий, таких как кошение травы. В благоприятных условиях (температура, влажность) трава может быстро отрастать, и величина NDVI возвращается в течение недели к уровню до кошения. Таким образом, даже еженедельные облачные периоды могут помешать обнаружению кошения (Koleska, 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оценки возможности мониторинга сенокосных угодий на основе наземных спектрометрических данных и различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, CiGreen, NDRE, NDMI), рассчитанных по спутниковым данным Sentinel-2 в течение вегетационного сезона на 2018 г., сделаны следующие выводы:

- показана возможность распознавания сенокосных угодий по наземным спектрометрическим данным. Геоботанические исследования и данные наземной спектрофотометрии проводились одновременно в одно и то же время суток и использовались как отдельный этап мониторинга сенокосения.

- показана возможность распознавания сенокосных угодий и определения даты сенокосения по спутниковым данным. Отмечено падение величины вегетационных индексов (NDVI, CiGreen, NDRE и NDMI) в дату сенокосения (25.07.2018 г.), что подтверждается наземными данными.

- подтверждена достоверность возможности дешифрирования сенокосных полей по индексу NDVI. Показано, что даты сенокосения, определенные по спутниковым данным, хорошо согласуются с наземными датами сенокосения (25 июля и 27 августа).

- на основе рассматриваемых в данной работе вегетационных индексов (NDVI, CiGreen, NDRE

и NDMI) построен алгоритм классификации сенокосных угодий и определения дат сенокосения. Алгоритм приведен для наиболее часто используемого индекса NDVI.

– построены карты пространственного распределения индекса NDVI сенокосных полей № 34 и 35 по спутниковым данным Sentinel-2 за даты (18 июня, 10 июля и 27 августа). Полученные карты позволяют выявлять сенокосные поля и даты сенокосения на больших территориях. Поля № 34 и 35 имеют площади 108 и 132 га соответственно.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Внешнее финансирование отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ботвич И.Ю., Письман Т.И., Кононова Н.А., Шевырнов А.П.* Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.
- Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Лапенко Н.Г., Самофал Е.В., Сторчак И.Г.* Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 53–66.
- Кононова Н.А., Ларько А.А., Емельянов Д.В., Ботвич И.Ю.* Оценка состояния сенокосных земель красноярского края на основе наземной спектрометрии // Вестник КрасГАУ. 2019. № 2. С. 31–37.
- Кострова Ю.Б., Костров Б.В.* Использование дистанционного зондирования земли в целях повышения эффективности сельскохозяйственного производства // Вестник РГАТУ, 2010. № 3. С. 88–90.
- Лапенко Н.Г., Ерошенко Ф.В., Сторчак И.Г., Дудченко Л.В., Шестакова Е.О.* Деградационные процессы в степных сообществах и данные дистанционного зондирования Земли // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 50–53.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11011>
- Ларько А.А., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Кононова Н.А.* Оценка состояния сенокосных угодий на основе наземной и спутниковой спектрометрии // Вестник КрасГАУ. 2020. № 2. С. 11–17.
<https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-2-11-17>
- Родионова А.В., Тебердиев Д.М.* Продуктивность долголетнего сеяного сенокоса и плодородие дерново-подзолистых почв // Успехи современной науки. 2017. Т. 1. № 10. С. 178–182.
- Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Lascano R.J.* Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data // In Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA. 2000. V. 1619.
- Bayat B., Tol C., Verhoef W.* Remote Sensing of Grass Response to Drought Stress Using Spectroscopic Techniques and Canopy Reflectance Model Inversion // Remote Sens. 2016. 8. 557.
<https://doi.org/10.3390/rs8070557>
- Bretas I.L., Valente D.S.M., Silva F.F., Chizzotti M.L., Paulino M.F., D'Aurea A.P., Paciullo D.S.C., Pedreira B.C., Fernanda H.M., Chizzotti F.H.M.* Prediction of aboveground biomass and dry-matter content in *Brachiaria* pastures by combining meteorological data and satellite imagery // Grass and Forage Science. 2020.
<https://doi.org/10.1111/gfs.12517>
- Erunova M.G., Simakina A.S., Yakubailik O.E.* Smart analysis of agricultural land use with NDVI at Kuraginskoye agricultural experimental production facility // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 677. 2021. 032105.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032105>.
- Gao B.C.* A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // In SPIE's 1995 Symposium on OE, Aerospace Sensing and Dual Use Photonics. 1995. V. 2480.
- Gitelson A.A., Vina A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J.* Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops // Geophys Res Lett. 2005. 32: L08403.
<https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Gitelson A.A., Gritz U., Merzlyak M.N.* Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // J. Plant Physiol. 2003. 160: 271–82.
- Kolecka N., Ginzler C., Pazur R., Price B., Verburg P. H.* Regional Scale Mapping of Grassland Mowing Frequency with Sentinel-2 Time Series // Remote Sens. 2018. 10. 1221.
<https://doi.org/10.3390/rs10081221>
- Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N.* The Information Content of Spectral Vegetation Indices in the Interpretation of Satellite Images of Cultivated Fields // Biophys. 2019. 64(4). P. 588–592.
- Richter R., Schläpfer D.* Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide", DLR IB 565-01/11, Wessling, Germany, 2011. (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>).
- Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. 1974. V. 1. P. 48–62.

Grassland Monitoring Based on Geobotanical, Ground, Spectrometric and Satellite Data

I. Yu. Botvich¹, N. A. Kononova¹, D. V. Emelyanov¹, and T. I. Pisman¹

¹Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

The study assessed the possibility of grassland monitoring based on various spectral vegetation indices (NDVI, CiGreen, NDRE, NDMI) calculated according to Sentinel-2 satellite data during the 2018 growing sea-

son. Geobotanical studies and collection of ground-based spectrophotometry data were carried out simultaneously, at the same time of day, and were used as an additional stage of haymaking monitoring. It was possible to identify grasslands and determine the date of mowing based on ground and satellite spectrometric data. A drop in the indices (NDVI, cIGreen, NDRE, NDMI) was observed on the date of mowing (25.07.2018). The possibility of grassland interpretation based on the NDVI index was proven reliable. It was shown that the dates of mowing determined according to satellite data were in good agreement with the ground dates of mowing (July 25th and August 27th). The spatial distribution maps of the NDVI index of grasslands according to Sentinel-2 satellite data for certain dates (June 18th, July 10th, and August 27th) were drawn. The resulting maps make it possible to identify grasslands and mowing dates in large areas.

Keywords: grassland, satellite data, Sentinel-2, Spectral Evolution, NDVI, cIGreen, NDRE, NDMI

REFERENCES

- Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Lascano R.J.* Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data // In Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA.2000. V. 1619.
- Bayat B., Tol C., Verhoef W.* Remote Sensing of Grass Response to Drought Stress Using Spectroscopic Techniques and Canopy Reflectance Model Inversion // *Remote Sens.* 2016. 8. 557.
<https://doi.org/10.3390/rs8070557>.
- Botvich I.Yu., Pisman T.I., Kononova N.A., Shevyrnogov A.P.* Sezonnaya dinamika rastitel'nosti zaleznyh zemel' Krasnoyarskoj lesostepi po nazemnym i sputnikovym dannym [Seasonal dynamics of fallow land vegetation in Kras-3 Research Earth from space. 2018. № 6. P. 39–51. (In Russian).
- Bretas I.L., Valente D.S.M., Silva F.F., Chizzotti M.L., Paulino M.F., D'Aurea A.P., Pacullo D.S.C., Pedreira B.C., Fernanda H.M. Chizzotti F.H.M.* Prediction of aboveground biomass and dry-matter content in *Brachiaria* pastures by combining meteorological data and satellite imagery // *Grass and Forage Science.* 2020.
<https://doi.org/10.1111/gfs.12517>.
- Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Lapenko N.G., Samofal E.V., Storchak I.G.* Vozmozhnosti distancionnoj ocenki sostoyaniya i stepeni degradacii prirodnyh kormovyh ugodij [Possibilities of remote assessment of the state and degree of degradation of natural fodder lands] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2018. T. 15. № 7. P. 53–66. (In Russian).
- Erunova M.G., Simakina A.S., Yakubailik O.E.* Smart analysis of agricultural land use with NDVI at Kuraginskoye agricultural experimental production facility // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 677. 2021. 032105.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032105>.
- Gao B.C.* A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // In SPIE's 1995 Symposium on OE, Aerospace Sensing and Dual Use Photonics.1995. Vol. 2480.
- Gitelson A.A., Vina A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J.* Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops // *Geophys Res Lett.* 2005. 32: L08403,
<https://doi.org/10.1029/2005GL022688>.
- Gitelson A.A., Gritz U., Merzlyak M.N.* Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // *J. Plant Physiol.* 2003. 160: 271–82.
- Kolecka N., Ginzler C., Pazur R., Price B., Verburg P.H.* Regional Scale Mapping of Grassland Mowing Frequency with Sentinel-2 Time Series // *Remote Sens.* 2018. 10. 1221,
<https://doi.org/10.3390/rs10081221>.
- Kononova N.A., Larko A.A., Emelyanov D.V., Botvich I.Yu.* Ocenka sostoyaniya senokosnyh zemel' krasnoyarskogo kraja na osnove nazemnoj spektrometrii [Assessment of hay lands based on ground-based spectrometry (on the example of agricultural land of the Krasnoyarsk region)] // *The Bulletin of KrasGAU.* 2019. № 2. P. 31–37. (In Russian).
- Kostrova Y.B., Kostrov B.V.* Ispol'zovanie distancionnogo zondirovaniya zemli v celyah povysheniya effektivnosti sel'skohozyajstvennogo proizvodstva [Using soil remote sensing to improve agricultural production efficiency] // *Vestnik RGATU.* 2010. № 3. P. 88–90. (In Russian).
- Lapenko N.G., Eroshenko F.V., Storchak I.G., Dudchenko L.V., Shestakova E.O.* Degradacionnye processy v stepnyh soobshchestvah i dannye distancionnogo zondirovaniya Zemli [Degradation processes in steppe communities and Earth remote sensing data]// *Achievements of Science and Technology of AIC.* 2018. T. 32. № 10. P. 50–53. (In Russian).
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11011>
- Larko A.A., Botvich I.Yu., Emelyanov D.V., Kononova N.A.* Ocenka sostoyaniya senokosnyh ugodij na osnove nazemnoj i sputnikovoj spektrometrii [The assessment of the state of grasslands on the basis of ground and satellite spectrometry] // *The Bulletin of KrasGAU.* 2020. № 2. P. 11–17. (In Russian).
<https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-2-11-17>
- Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N.* The Information Content of Spectral Vegetation Indices in the Interpretation of Satellite Images of Cultivated Fields // *Biophys.* 2019. 64(4). P. 588–592.
- Richter R., Schläpfer D.* Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide", DLR IB 565-01/11, Wessling, Germany, 2011.
(<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>).
- Rodionova A.V., Teberdiev D.M.* Produktivnost' dolgoletnego seyanogo senokosa i plodorodie dernovo-podzolistykh pochv [Productivity of long-term seeded hayfields and fertility of soddy-podzolic soils] // *Advances in modern science.* 2017. T. 1. №1 0. P. 178–182. (In Russian).
- Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium.* 1974. V. 1. P. 48–62.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ В ПЕРЕХОДНОЙ ПРИРОДНО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ВОЛГОГРАДСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ

© 2023 г. В. А. Силова*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук”, Волгоград, Россия

*E-mail: viktorialem@mail.ru

Поступила в редакцию 22.07.2022 г.

Северная часть Волгоградского Заволжья расположена в переходной зоне от Малого Сырта к Прикаспийской низменности. Для этой зоны характерно изменение климатических условий в сторону уменьшения количества выпадающих осадков и почвенных условий, выражающихся в переходе от степных к полупустынным типам почв. Такое состояние земель обусловлено особенностями физико-географических условий переходной зоны и влиянием хозяйственной деятельности. В результате мониторинга появляется возможность отслеживать процессы их деградации, приводящие к падению плодородия почв. Использование результатов мониторинга позволит планировать проведение мероприятий по нейтрализации последствий их деградации. Основные результаты исследований деградированных земель в районе Волгоградского Заволжья получены на основе спутниковых изображений Landsat 7, 8 за двадцатилетний период. На основе изучения динамики изменения площадей подверженных деградации проведено геоинформационное картографирование деградированных земель в период с 1984 по 2020 гг. Оценка деградации проводится с использованием инструментов геоинформационного анализа и данных дистанционного зондирования земли на территории исследований. При этом были выявлены изменения площади очагов деградации с проективным покрытием менее 10%, установлено их пространственное распределение, установлено изменение такой площади за период исследований. Роль космоснимков в системе мониторинга заключается в своевременном установлении изменений состояния изучаемой территории, в том числе растительности (проективного покрытия), определения их площади и пространственного расположения, а также уточнения геометрических характеристик объектов исследований, которые можно выявить на отображаемом растре. Анализ состояния земель осуществляется по проективному покрытию растительности, которое с большой вероятностью устанавливается по тону изображения, как основной характеристике растра космических снимков и идентифицируется на отдельные изучаемые объекты. В настоящее время в связи с засушливостью климата на территории Волгоградского Заволжья, низким естественным плодородием почв, ненормированной хозяйственной нагрузкой продолжается процесс деградации земель (Ткаченко, Кошелев, 2019). Очаги деградации с проективным покрытием менее 10% составляют в среднем свыше 150 тыс. га. Рост площади таких участков деградации установлен в 1984, 1995, 1999, 2004, 2007, 2018, 2020 гг. Площадь участков деградации на территории исследования в отдельные годы превышала 300 тыс. га, что на 100% выше чем среднее за все время исследований. В связи с этим мониторинг Волгоградского Заволжья имеет большое значение для своевременного выявления процессов деградации земель в аридных условиях и разработки мер по их реабилитации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, опустынивание, деградация, Заволжье

DOI: 10.31857/S0205961423020045, **EDN:** ТСХОУ1

ВВЕДЕНИЕ

Исследования состояния земель в переходных природно-географических зонах показывают, что в настоящее время площади деградированных участков растут. На территории Волгоградского Заволжья отмечается тенденция роста площадей деградированных земель, что объясняет актуальность исследования. Единая направленность расширения деградированных, а также безлюдных территорий прослеживается в южных ареалах

Волгоградского Заволжья (Рулев, 2012; Ткаченко, 2014).

В связи с этим основной задачей работы является мониторинг изменения площадей участков подверженных деградации в переходной природно-географической зоне Волгоградского Заволжья.

Наиболее эффективным методом изучения состояния земель является аэрокосмический мониторинг, позволяющий за короткое время провести исследования на больших территориях и существенно снизить экономические затраты (Guo,

et al., 2017). Аэрокосмический мониторинг проведен с использованием спутниковых данных за двадцатилетний период. Использование геоинформационных технологий дает возможность провести картографическую оценку пространственного положения и площадей деградированных земель (Виноградов, 1984).

Деградация земель на территории Волгоградского Заволжья обусловлена климатическими и почвенными условиями, а также нерегламентированной хозяйственной нагрузкой. В связи с тем, что территория исследований расположена в переходной зоне от Малого Сырта к Прикаспийской низменности здесь отмечается существенное изменение почвенных условий каштановых почв (от темно-каштановых в северной части до светло-каштановых в южной), широко распространены солонцы, особенно в бессточной части. В связи с этим опустынивание обусловлено такими видами деградации как: водной эрозией в северной части территории исследования, засолением на всей территории и дефляцией на равнинных участках. Сумма среднегодовых осадков за последнее двадцатилетие составляет 286 мм при испаряемости до 1000 мм в год. Среднегодовая температура воздуха составляет 7°C, перепад между максимальной и минимальной температурой составляет порядка 80°C (Сажин, Кулик, Васильев, 2010). В переходной природно-географической зоне развитие процессов деградации, таких как засоление, дефляция и эрозия усугубляют сложные условия для развития хозяйственной деятельности (Рулев, Канишев, Шинкаренко, 2016).

В результате исследования установлена цикличность изменения площадей деградированных земель и зависимость площади деградации от количества выпадающих осадков, являющимся доминирующим фактором в переходной природно-географической зоне “степь–полупустыня” Волгоградского Заволжья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Мониторинг состояния земель в переходной природно-географической зоне был проведен по методике использования результатов дешифрирования данных дистанционного зондирования территории Волгоградской Заволжья и геоинформационного картографирования подстилающих поверхностей на основе программного комплекса QGIS. В работе использованы космоснимки спутников Landsat 7 (до мая 2003 г.) и Landsat 8 полученных с сервиса <https://earthexplorer.usgs.gov>. Снимки для анализа выбирались с периода 2003 по 2013 гг. без пропущенных полос в весенне–летний период.

Состояние земель Волгоградской Заволжья определяется по космоснимкам на основании установления значений проективного покрытия растительности исследуемой территории, так как проективное покрытие с высокой точностью

(ошибка менее 20%) определяется по данным дистанционного зондирования земли (Виноградов, 1993). Для выявления пространственного распределения контуров растительности проводится геоинформационный анализ пространственного распределения проективного покрытия и составляются соответствующие картографические слои (Кулик, Рулев, Юфев, 2013, 2015).

На основании анализа пространственного распределения проективного покрытия осуществляется векторизация полученных данных и создаются векторные контуры, а в соответствии с методическими рекомендациями по выявлению деградированных и загрязненных земель, где определены для зоны полупустыни соответствующие степени деградации земель (Kulik, Petrov, Yuferev, Tkachenko, Shinkarenko, 2020).

В нашей работе рассмотрена крайняя степень деградации земель (бедствие) (Виноградов, 1993), для выявления очагов возможного опустынивания территории (Zonn, Kust, Andreeva, 2017).

Для классификации опустынивания по изображению на космоснимках выбрано значение проективного покрытия 0–10% от зонального. Классификация растрового изображения проводилась в программном комплексе QGIS. Для охвата всей территории исследования были использованы отдельные каналы спектральной съемки № 2 (B), № 3 (G), № 4 (R), № 8 (Panchrom), на основе которой созданы цветосинтезированные снимки с разрешением 15м. Для анализа использовались спектральные снимки территории Волгоградского Заволжья с пространственным разрешением 30 м и точностью позиционирования 12 м (Кузнецов, Пошеонов, Рыжиков, 2015).

Объединение полученных снимков позволило разработать космокарту на территорию исследования.

Исследования деградации и опустынивания в переходных природно-географических зонах проводились Б.В. Виноградовым, К.Н. Куликом, В.И. Петровым и В.Г. Юфевым и др. В их работах были определены причины негативных явлений, связанных с опустыниванием.

Особенностью переходных природно-географических зон является периодическое изменение климатических условий, характерных как для степной, так и для полупустынной зоны и соответствующей реакции растительного покрова на это изменение (Kulik, Petrov, Rulev, Kosheleva, Shinkarenko, 2018). Разработки, связанные с изучением деградации и опустынивания, определили подходы к выявлению негативных явлений и установления масштабов и пространственного распределения их степени (Lyu, et al., 2020).

Для верификации данных дистанционного зондирования земли были разработаны фотоэталон деградации земель. На фотоэталонах были

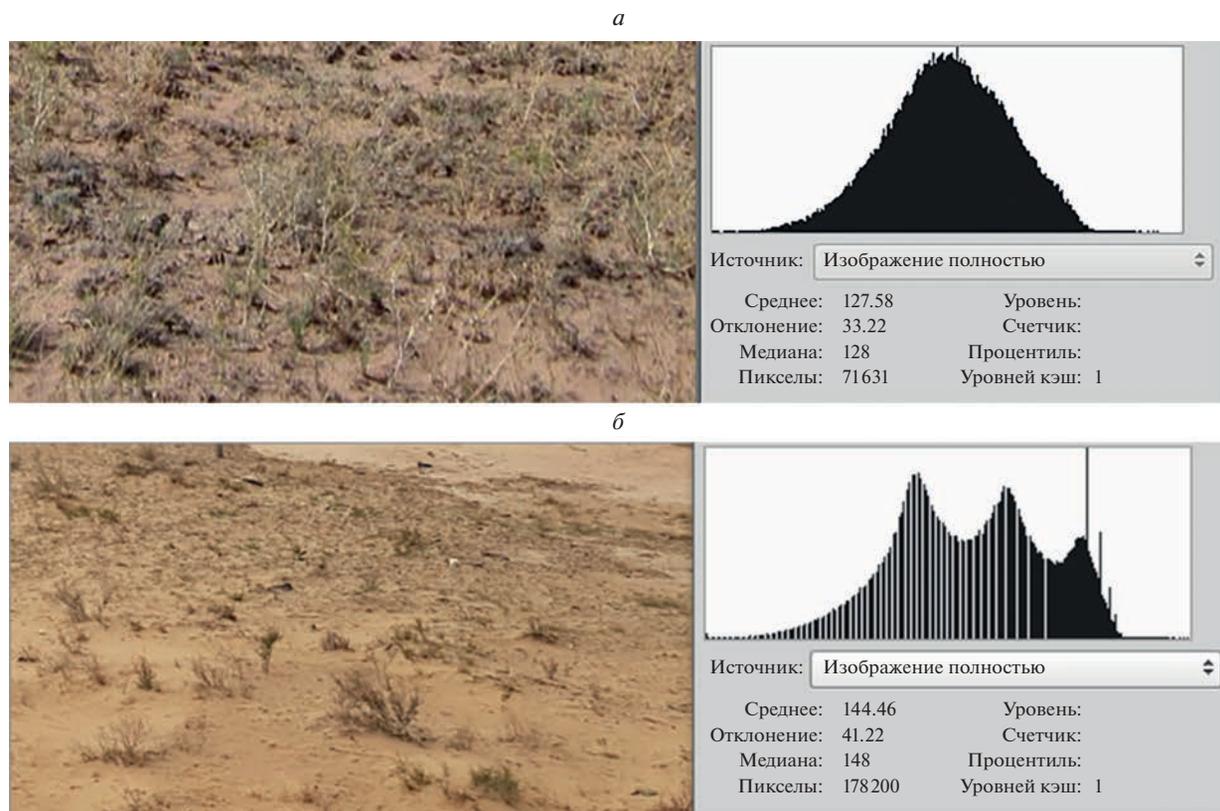


Рис. 1. Фотоэталон с проективным покрытием: а – 25%, б – 10%.

получены средние значения тона изображения и вычислено стандартное отклонение, путем анализа пикселей раstra подстилающей поверхности выделены участки, подверженных деградационным процессам. Фотоэталонирование позволяет получить данные по доли очагов опустынивания в исследуемом регионе.

Методика дешифрирования заключается в полуавтоматической классификации изображения космоснимка основанная на выделении тона изображения растительности с различным проективным покрытием. В нашем случае для установления степени деградации использовался диапазон тона пикселей, соответствующий проективному покрытию менее 10%.

Для проведения мониторинга состояния земель (Юферев, 2007) был применен метод пространственно-временного анализа космокарт, разработанных на период с 2000 по 2020 гг. на которых выделялись контуры, соответствующие степени деградации бедствия.

Оценка динамики площади деградации земель на территории исследования проводилась с использованием регрессионного анализа с разработкой уравнения регрессии и определением коэффициентов аппроксимации и определением корреляционной связи расчетных и фактических данных (Кузьмина, Трешкин, 2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мониторинг состояния земель в переходной природно-географической зоне Волгоградского Заволжья проведен на основе данных дистанционного зондирования спутников Landsat 7, 8 в период 1984–2020 гг.

Фотоэталонирование тестовых участков позволило выявить значения фототона изображения для характерных участков деградированных земель.

Для проведения исследований были отобраны репрезентативные тестовые участки территории Волгоградского Заволжья, на которые были получены спектрзональные снимки и разработаны космокарты территории Заволжья. В результате классификации снимков по проективному покрытию были получены контуры участков, со степенью деградации “бедствие” и разработаны космокарты деградации по годам исследования (рис. 2).

В табл. 1 приведены значения площадей деградированных земель (степень деградации “бедствие”) и количество осадков по годам исследования.

На рис. 3 данные за весь период исследований, вместе с моделью – уравнением связи площади опустынивания с временем от начала исследований.

Корреляционный анализ данных проведен по годам исследований начиная с 1984 года (первый год исследования) по 2020 год в течение 37 лет по-

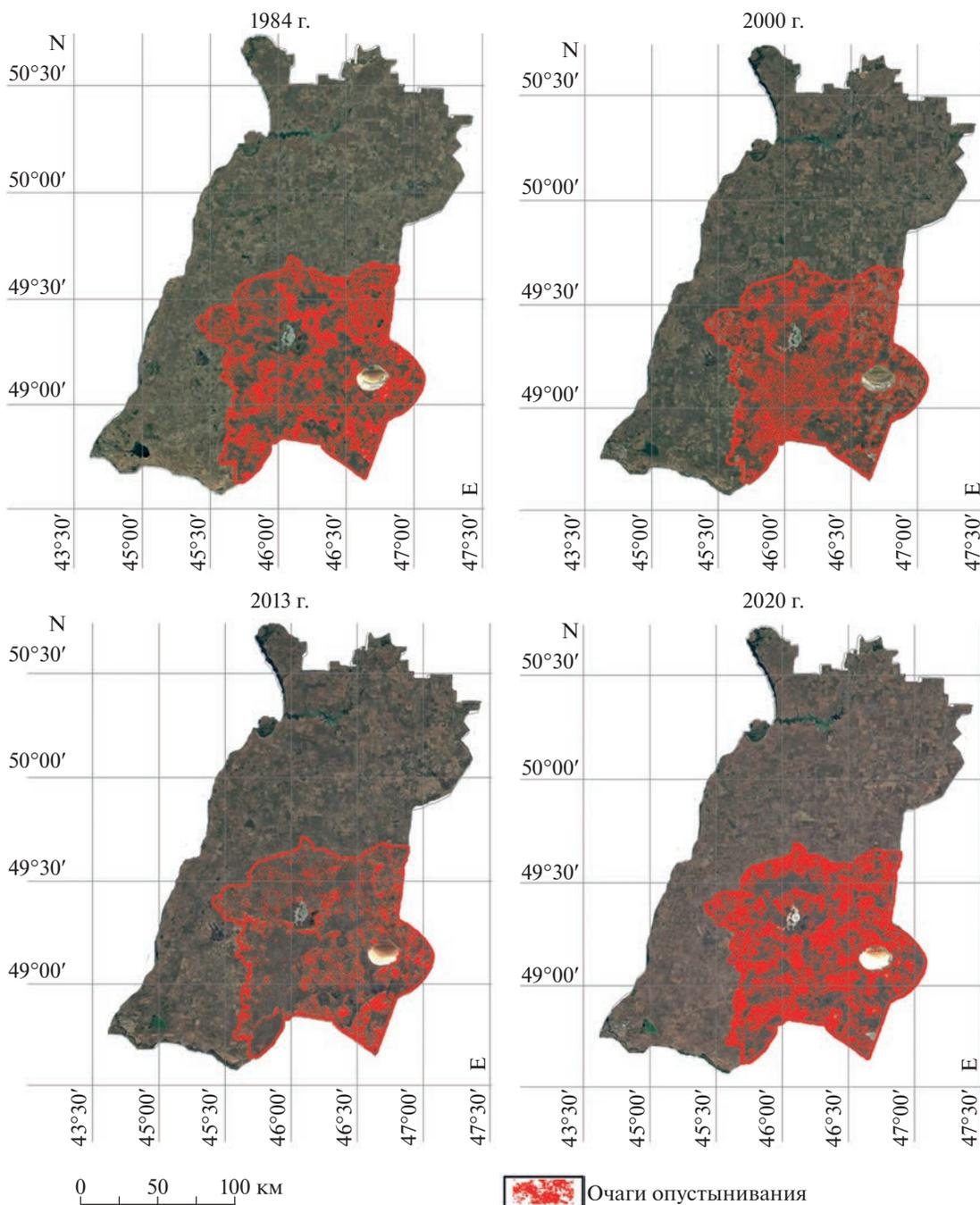


Рис. 2. Космокарты деградации земель Волгоградского Заволжья по годам исследований.

казал отрицательную связь между суммарным количеством осадков и площадью опустынивания (рис. 3).

В связи с тем, что площадь очагов опустынивания изменяется во времени, то можно на основании многолетних изменений такой площади разработать модель ее изменений на основании ретроспективного анализа.

Закономерность изменения площадей очагов подверженных опустыниванию ($S_{оп}$), по времени

от начала исследований ($t = 1-37$) можно описать уравнением регрессии.

$$S_{оп} = -50 \times \sin(-2.41t + 0.0256) + 281.$$

Коэффициент корреляции значения модели площади опустынивания по данным 1984 г. с фактическим изменением площадей опустынивания $R = 0.53$.

Проведенный мониторинг территории Заволжья Волгоградской области за 37 лет с использованием данных дистанционного зондирования

Таблица 1. Площади деградированных земель и количество осадков по годам исследований

Номер года исследований	Год исследований	Осадки, мм	Площадь опустынивания, тыс. га	Номер года исследований	Год исследований	Осадки, мм	Площадь опустынивания, тыс. га
1	1984	198.8	338.12	20	2003	322.2	235.30
2	1985	374.4	294.84	21	2004	342.6	338.94
3	1986	271.4	319.11	22	2005	266	249.24
4	1987	394	282.30	23	2006	223.2	314.30
5	1988	418	309.59	24	2007	257.7	338.98
6	1989	495.2	439.68	25	2008	275.5	286.24
7	1990	477.4	200.19	26	2009	292.5	263.93
8	1991	317.5	318.64	27	2010	275.4	308.13
9	1992	374.5	204.96	28	2011	269.2	250.93
10	1993	458.9	200.68	29	2012	290.3	216.06
11	1994	279.8	369.01	30	2013	412.5	161.97
12	1995	342.3	378.15	31	2014	244.6	160.68
13	1996	241.8	263.54	32	2015	222.9	251.66
14	1997	402.5	329.86	33	2016	327.0	238.75
15	1998	227.5	229.40	34	2017	250.0	268.10
16	1999	285.1	324.79	35	2018	254.0	339.50
17	2000	371.9	297.51	36	2019	274.0	194.56
18	2001	329.6	175.74	37	2020	182.0	442.73
19	2002	332.9	278.71				

по материалам спутниковых снимков позволил определить изменение площади очагов опустынивания и сумм атмосферных осадков за период с 1984 по 2020 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате космического мониторинга изменения площадей опустынивания на территории

Волгоградского Заволжья было установлено, что площадь опустынивания в основном зависит от количества выпадающих осадков. Установлено, что в связи с цикличностью выпадения осадков наблюдается цикличность изменения площади опустынивания. Определена тенденция к снижению количества выпадающих осадков за исследуемый период (на 80 мм). Данные дистанционного зондирования земли дают возможность выявить

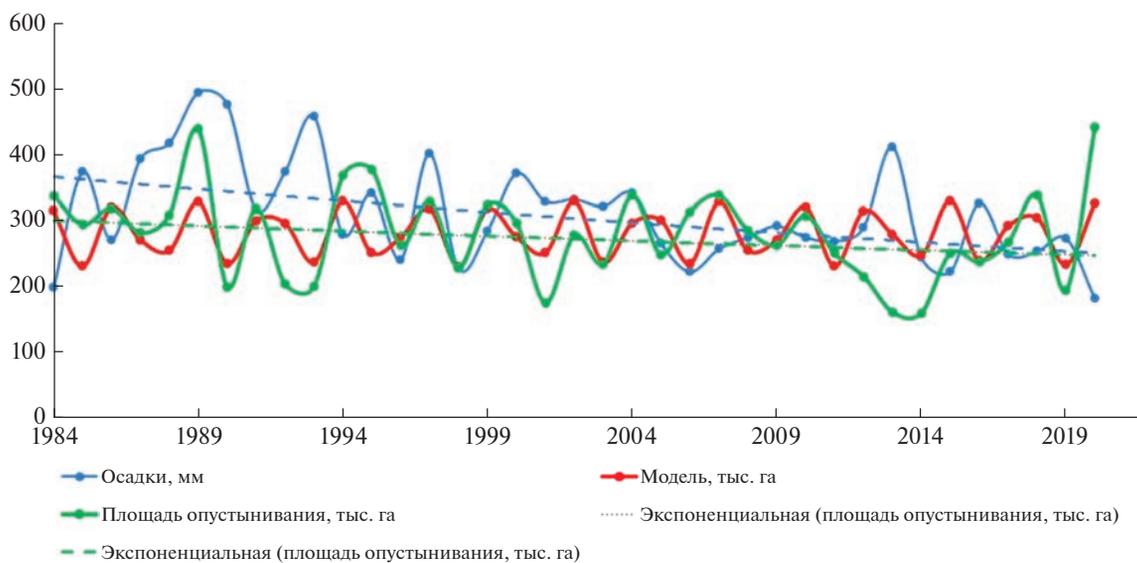


Рис 3. Площади деградированных земель и количество годовых осадков по годам исследования.

участки опустынивания, выделить их контуры и определить площади. За последние годы просматривается тенденция к стабилизации площади опустынивания, не смотря на снижение количества выпавших осадков. Однако в 2020 г. отмечено резкое увеличение площади, обусловленное засухой. Циклическая функция, представленная в работе уравнением дает возможность прогнозировать с определенной достоверностью вероятные изменения площади опустынивания в последующие годы.

Таким образом для сохранения и восстановления экосистем в условиях аридного климата на территории Заволжья Волгоградской области необходимо проведение фитомелиоративных мероприятий по реабилитации деградированных земель, для повышения продуктивности естественных пастбищ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН госрегистрация № 1220200000100311-3 по теме FNFT-2022-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
- Виноградов Б.В.* Дистанционные индикаторы опустынивания и деградации почв. Почвоведение. 1993. № 2. С. 98–103.
- Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И., Рыжиков А.С.* Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от ка "Landsat-8" // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 37–42.
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е.* Климатические изменения в бассейне Нижней Волги и их влияние на состояние экосистем // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 3(60). С. 14–32.
- Кулик К.Н., Рулев А.С., Юфев В.Г.* Геоинформационный анализ очагов опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 4. С. 91–98.
- Кулик К.Н., Рулев А.С., Юфев В.Г.* Геоинформационный анализ динамики опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. 2015. Т. 21. № 3. С. 23–32.
- Рулев А.С.* Компьютерное картографирование пространственного распределения градиентов показателей регионального климата юго-востока Европейской части России // Вестник ВолГУ. География и геоинформатика. Серия 11. 2012. № 1(3). С. 72–77.
- Рулев А.С., Канищев С.Н., Шинкаренко С.С.* Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 113–123.
- Сажин А.Н., Кулик К.Н., Васильев Ю.И.* Погода и климат Волгоградской области. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. 306 с.
- Ткаченко Н.А.* Качественная оценка и картографирование деградации пахотных земель Волгоградского Заволжья // Изв. Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 2(46). С. 21–23.
- Ткаченко Н.А., Кошелев А.В.* Подверженность процессам деградации сельскохозяйственных угодий Волгоградского Заволжья // Научно-агрономический журн. 2019. № 2(105). С. 7–9.
- Юфев В.Г.* Дистанционный мониторинг состояния и динамики агроландшафтов // Земледелие. 2007. № 3. С. 8–9.
- Guo Q., Fu B., Shi P., Cudahy T., Zhang J., Xu H.* Satellite Monitoring the Spatial-Temporal Dynamics of Desertification in Response to Climate Change and Human Activities across the Ordos Plateau, China // Remote sensing. 2017. V. 9. № 6. P. 255.
- Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S.* K 30-letiyu General'nogo plana po bor'be s opustynivaniem chernozemov i Kizlyarskih pastbishch [On the 30th anniversary of the "General plan to combat desertification of Black lands and Kizlyar pastures"] // Arid ecosystems. 2018. V. 8(1). P. 5–20. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2079096118010067>
- Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S.* Geoinformacionnyy analiz opustynivaniya Severo-Zapadnogo Kaspiya [Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian] // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. № 2. P. 98–105. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
- Lyu Y., Shi P., Han G., Liu L., Guo L., Hu X., Zhang G.* Desertification Control Practices in China // Sustainability. 2020. 12: 3258. <https://doi.org/10.3390/su12083258>
- Zonn I.S., Kust G.S., Andreeva O.V.* Paradigma opustynivaniya: 40 let razvitiya i global'nye usiliya [Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts] // Arid ecosystems. 2017. V. 7. № 3. P. 131–141. (In Russian).

Satellite Monitoring of Desertification in the Transitional Natural-Geographical Zone of the Volgograd Region

V. A. Silova

Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of agroecology, complex melioration and protective afforestation of the Russian Academy of Sciences", Volgograd, Russia

The northern part of the Volgograd Volga region is located in the transition zone from the Small Syrt to the Caspian lowland. This zone is characterized by a change in climatic conditions towards a decrease in the amount of precipitation and soil conditions, expressed in the transition from steppe to semi-desert soil types. This condition of the lands is due to the peculiarities of the physical and geographical conditions of the transition zone and the influence of economic activity. As a result of monitoring, it becomes possible to monitor the processes of their degradation, leading to a drop in soil fertility. The use of monitoring results will make it possible to plan measures to neutralize the consequences of their degradation. The main results of studies of degraded lands in the Volgograd Volga region

were obtained on the basis of satellite images of Landsat 7, 8 over a twenty-year period. Based on the study of the dynamics of changes in areas subject to degradation, geoinformation mapping of degraded lands was carried out in the period from 1984 to 2020. Degradation assessment is carried out using geoinformation analysis tools and Earth remote sensing data in the research area. At the same time, changes in the area of degradation foci with a projective coverage of less than 10% were revealed, their spatial distribution was established, and the change in such an area over the period of research was established. The role of satellite images in the monitoring system is to timely establish changes in the state of the studied territory, including vegetation (projective cover), determine their area and spatial location, as well as clarify the geometric characteristics of research objects that can be identified on the displayed raster. The analysis of the state of the lands is carried out by the projective vegetation cover, which is most likely established by the tone of the image as the main characteristic of the satellite images raster and is identified into individual objects under study. Currently, due to the aridity of the climate on the territory of the Volgograd Volga region, low natural soil fertility, abnormal economic load, the process of land degradation continues (Tkachenko, Koshelev, 2019). Degradation foci with a projective coverage of less than 10% average over 150 thousand hectares. The growth of the area of such degradation sites is established in 1984, 1995, 1999, 2004, 2007, 2018, 2020 years. The area of degradation sites in the study area in some years exceeded 300 thousand hectares, which is 100% higher than the average for the entire time of research. In this regard, monitoring of the Volgograd Volga region is of great importance for the timely detection of land degradation processes in arid conditions and the development of measures for their rehabilitation.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, desertification, degradation, Trans-Volga region

REFERENCES

- Guo Q., Fu B., Shi P., Cudahy T., Zhang J., Xu H. Satellite Monitoring the Spatial-Temporal Dynamics of Desertification in Response to Climate Change and Human Activities across the Ordos Plateau, China // *Remote sensing*. 2017. V. 9. № 6. P. 255.
- Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S. K 30-letiyu "General'nogo plana po bor'be s opustynivaniem chernozemov i Kizlyarskih pastbishch [On the 30th anniversary of the "General plan to combat desertification of Black lands and Kizlyar pastures"] // *Arid ecosystems*. 2018. V. 8(1). P. 5–20. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2079096118010067>
- Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S. Geoinformacionnyy analiz opustynivaniya Severo-Zapadnogo Kaspiya [Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian] // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. № 2. P. 98–105. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
- Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G. Geoinformacionnyy analiz ochagov opustynivaniya na territorii Astrahanskoj oblasti [Geoinformation analysis of desertification foci on the territory of the Astrakhan region] // *Arid ecosystems*. 2013. V. 19. № 4. P. 91–98. (In Russian).
- Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G. Geoinformacionnyy analiz dinamiki opustynivaniya na territorii Astrahanskoj oblasti [Geoinformation analysis of desertification dynamics on the territory of the Astrakhan region] // *Arid ecosystems*. 2015. V. 21. № 3. P. 23–32. (In Russian).
- Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E. Klimaticheskie izmeneniya v bassejne Nizhnej Volgi i ih vliyanie na sostoyanie ekosistem [Climatic changes in the Lower Volga basin and their impact on the state of ecosystems] // *Arid ecosystems*. 2014. V. 20. № 3(60). P. 14–32. (In Russian).
- Kuznecov A.E., Poshekhonov V.I., Ryzhikov A.S. Tekhnologiya avtomaticheskogo kontrolya tochnosti geopriyazki sputnikovyh izobrazhenij po opornym snimkam ot ka "Landsat-8" [Technology of automatic control of accuracy of geo-linking of satellite images based on reference images from the spacecraft "Landsat-8"] // *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2015. № 3. P. 37–42. (In Russian).
- Lyu Y., Shi P., Han G., Liu L., Guo L., Hu X., Zhang G. Desertification Control Practices in China // *Sustainability*. 2020. 12: 3258. <https://doi.org/10.3390/su12083258>
- Rulev A.S. Komp'yuternoe kartografirovaniye prostranstvennogo raspredeleniya gradientov pokazatelej regional'nogo klimata yugo-vostoka Evropejskoj chasti Rossii [Computer mapping of spatial distribution of gradients of indicators of the regional climate of the south-east of the European part of Russia] // *Vestnik VolGU. Geografiya i geoinformatika. Seriya 11*. 2012. № 1(3). P. 72–77. (In Russian).
- Rulev A.S., Kanishchev S.N., Shinkarenko S.S. Analiz sezonnoj dinamiki NDVI estestvennoj rastitel'nosti Zavolzh'ya Volgogradskoj oblasti [Analysis of seasonal dynamics of NDVI natural vegetation of the Volga region of the Volgograd region] // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2016. V. 13. № 4. P. 113–123. (In Russian).
- Sazhin A.N., Kulik K.N., Vasiliev Yu.I. Pogoda i klimat Volgogradskoj oblasti [Weather and climate of the Volgograd region] Volgograd: VNIALMI. 2010. 306 p.
- Tkachenko N.A. Kachestvennaya ocenka i kartografirovaniye degradacii pahotnyh zemel' Volgogradskogo Zavolzh'ya [Qualitative assessment and mapping of degradation of arable lands of the Volgograd Volga region] // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. № 2(46). P. 21–23. (In Russian).
- Tkachenko N.A., Koshelev A.V. Podverzhennost' processam degradacii sel'skohozyajstvennyh ugodij Volgogradskogo Zavolzh'ya [Susceptibility to degradation processes of agricultural lands of the Volgograd Volga region] // *Nauchno-agronomicheskij zhurnal*. 2019. № 2(105). P. 7–9. (In Russian).
- Yuferev V.G. Distancionnyy monitoring sostoyaniya i dinamiki agrolandshaftov [Remote monitoring of the state and dynamics of agricultural landscapes] // *Agriculture*. 2007. № 3. P. 8–9. (In Russian).
- Vinogradov B.V. Aerokosmicheskij monitoring ekosistem [Aerospace monitoring of ecosystems]. Moscow: Nauka. 1984. 320 p.
- Vinogradov B.V. Distancionnye indikatory opustynivaniya i degradacii pochv [Remote indicators of desertification and soil degradation] // *Soil science*. 1993. № 2. P. 98–103.
- Zonn I.S., Kust G.S., Andreeva O.V. Paradigma opustynivaniya: 40 let razvitiya i global'nye usiliya [Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts] // *Arid ecosystems*. 2017. V. 7. № 3. P. 131–141. (In Russian).

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДЕТАЛЬНОГО ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ КА LANDSAT-8: НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ, РОССИЯ

© 2023 г. И. О. Нафигин^а, *, В. Т. Ишмухаметова^а, С. А. Устинов^а, В. А. Минаев^а, В. А. Петров^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, Россия

*E-mail: estera-st@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

В работе рассматривается пригодность использования мультиспектральных данных дистанционного зондирования спутника Landsat-8 для проведения регионального геолого-минералогического картирования территории Юго-Восточной Забайкалья (Россия) в условиях средне-низкогорного рельефа и континентального климата. Для повышения спектральной информативности спутниковых данных Landsat-8 использованы статистические алгоритмы обработки, включающие: метод анализа главных компонент (РСА), минимальной доли шума (MNF) и независимого компонентного анализа (ICA). Результаты статистической обработки были сопоставлены с классами геологических материалов: минералы группы оксидов/гидроксидов, содержащие переходные ионы железа (Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}); группа глинистых минералов, содержащих Al–ОН и Fe, Mg–ОН; минералы, содержащие двухвалентный ион железа (Fe^{2+}) и растительный покров. Сгенерированы и проинтерпретированы псевдоцветные RGB композиты, отражающие распределение и мультипликацию классов геологических материалов. Для построения схемы перспективности на обнаружение полезных ископаемых была произведена интеграция информативных тематических слоев с использованием модели нечеткой логики. Полученная схема сопоставлена с геологической информацией и сделаны положительные выводы о пригодности территории для проведения дальнейших дистанционных исследований по картированию гидротермально измененных зон и продуктов гипергенеза с целью локализации участков, перспективных на выявление гидротермально-метасоматической минерализации.

Ключевые слова: Landsat-8, геолого-минералогическое картирование, статистические методы, дистанционное зондирование земли, гидротермальная минерализация, прогнозно-поисковые работы

DOI: 10.31857/S0205961423010086, EDN: MNATCH

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений повышения эффективности прогнозно-поисковых работ на твердые полезные ископаемые является применение современных методов и технологий с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Кирсанов и др., 2019; Смирнова и др., 2020). Осуществление комплекса прогнозных работ с помощью дистанционных методов выполняется последовательно в соответствии с традиционным подходом к изучению территорий — от региональных к крупномасштабным работам (Сахновский и др., 2009). В работе рассматривается первый этап прогнозно-поискового комплекса работ с применением дистанционных методов, соответствующий региональному уровню исследований. На данном этапе примене-

ние различных статистических методов обработки данных ДЗЗ направлено на оценку пригодности использования материалов мультиспектральной спутниковой съемки Landsat-8 для геолого-минералогического картирования при геоморфологических, климатических и почво-растительных условиях, свойственных исследуемой территории.

Исследуемая территория Юго-Восточного Забайкалья имеет широкий металлогенический потенциал (Au, U, Mo, Pb–Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, флюорит) и является перспективной на обнаружение новых гидротермальных месторождений твердых полезных ископаемых. В связи с тем, что площадь данной территории достаточно обширна и составляет более 50 тыс. кв. км, проведение на ней детальных полевых прогнозно-поисковых работ в сложных климатических условиях экономически затратно. По этой причине необходимо

рассмотреть различные доступные дистанционные подходы к картированию, классификации и идентификации классов геологических материалов, а также к выявлению индикаторов геологических процессов, с целью локализации перспективных участков на рудную минерализацию гидротермальной и гипергенной природы.

В настоящее время теме геологического картирования по снимкам Landsat-8 посвящено множество публикаций (Amer et al., 2010; Clark and Swayze, 1995; Colby, 1991; Corumluoglu et al., 2015; Gabr et al., 2010; Inzana et al., 2003; Lawrence et al., 2005; Mars and Rowan, 2011; Rockwell and Hofstra, 2008; Pour et al., 2018a, 2018b; Pour and Hashim, 2015; Rajendran and Nasir, 2019). Однако в связи с пространственным разрешением и спектральным диапазоном данных Landsat-8, а также с геологическими, географическими и климатическими условиями территории, геологическое дешифрирование сводится к картированию мафических, кислых, силикатных горных пород, глинистых (Al–ОН и Fe, Mg–ОН) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов, а также минералов группы оксидов/гидроксидов, содержащих переходные ионы железа (Fe^{3+} и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория располагается в Юго-Восточной части Забайкальского края (Россия) и простирается с запада на восток между долинами рек Онон и Аргунь, а с севера на юг между долиной реки Газимур и государственными границами страны с Китаем и Монголией. Административно Юго-Восточная часть Забайкалья включает Борзинский, Забайкальский, Краснокаменский, Приаргунский, Александрово-Заводский, Калганский, Нерчинско-Заводский и Газимуро-Заводский муниципальные районы (рис.1) (Новикова, 2014). Тектоническая позиция территории определяется ее положением на стыке Сибирского кратона и Монголо-Охотской складчато-глыбовой области (Ищукова и др., 1998).

Рельеф территории преимущественно средне-низкогорный, в основном представлен хребтами, разделенными обширными впадинами и широкими долинами многочисленных рек. Средняя высота над уровнем моря составляет около 700 м. Равнинные формы рельефа имеют подчиненное значение и приурочены в основном к межгорным понижениям. Горные территории в основном труднодоступные, поэтому межгорные понижения заняты земельным фондом, на котором базируется сельскохозяйственное хозяйство. Климат резко континентальный. Господство антициклонального состояния атмосферы обуславливает большое количество солнечных дней. Среднегодовая температура воздуха составляет -1°C .

Геологическое строение исследуемого района весьма сложное и характеризуется продолжительным развитием разновозрастных, разнообразных по составу и генезису образований, залегание которых осложнено складчатостями и разрывными нарушениями.

Упрощенная версия детальной геологической карты миллионного масштаба (Шивохин и др., 2010) представлена на рис. 2.

Геологические структуры и рудовмещающие вулканоплутонические комплексы Южного Приаргуны эволюционировали в течение протерозойского (завершился около 600 млн лет назад), каледонского (~520–410 млн лет назад) и герцинского (~360–210 млн лет назад) тектономагматических циклов, в процессе тектономагматической активизации в позднем мезозое (~160–100 млн лет назад) и на неотектоническом этапе развития региона. Позднемезозойская тектономагматическая активизация наиболее продуктивна по проявлению рудогенетических процессов, определивших металлогенический облик территории (Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020).

Вулканические толщи позднемезозойского вулканизма, сложенные преимущественно трахибазальтами, базальтами, трахиандезитами, андезитами, трахириолитами, риолитами и диоритпорфиритами, получили распространение в основном в локальных структурах, возникших как в пределах крупных впадин, так и в поднятиях между ними. Таким образом, осадочно-вулканогенные комплексы пород позднемезозойского активизационного этапа, слагающие грабенообразные впадины и локальные вулканотектонические структуры, составляют верхний структурный этаж, который образовался на протерозой-палеозойском гранит-метаморфическом фундаменте, слагающим нижний этаж.

После завершения вулканизма вдоль долгоживущих тектонических структур проявились многостадийные гидротермальные процессы, сформировавшие рудные месторождения, а в узлах пересечения долгоживущих глубинных разломов, образовались крупные рудные узлы золото-порфировой, молибден-медно-порфировой, золото-сульфидной, полиметаллической, флюоритовой и молибден-урановой минерализации.

Основным фактором, определяющим размещение месторождений полезных ископаемых, в пределах исследуемой территории, является литолого-структурный, т.к. месторождения в основном приурочены к линейным зонам разрывных нарушений разного порядка и узлам пересечения долгоживущих глубинных зон разломов северо-восточного простирания с зонами разломов северо-западного, меридионального и широтного простираний (Ищукова и др., 1998).

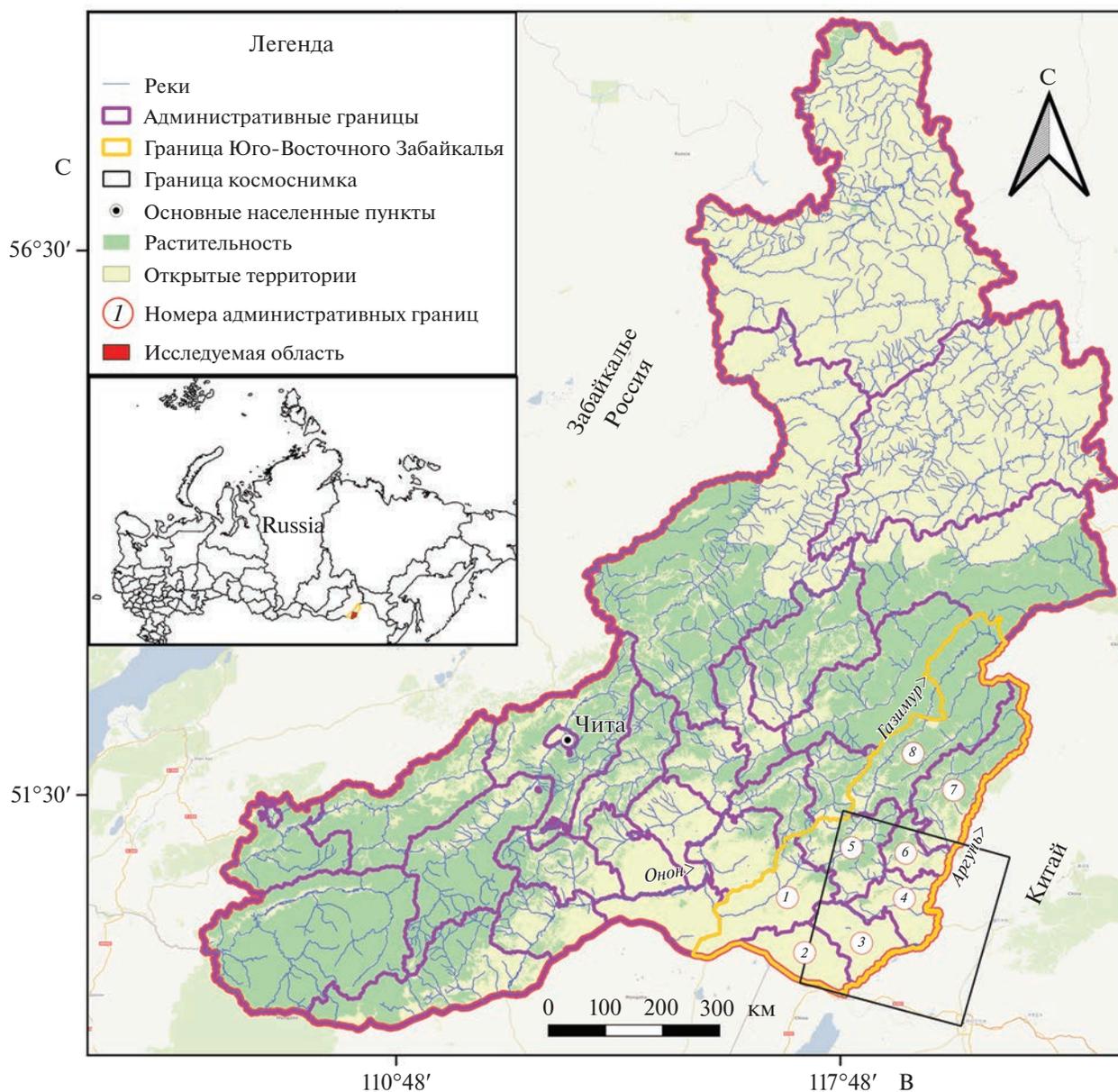


Рис. 1. Картограмма Забайкальского края, Россия (Нафигин и др.). Муниципальные районы: 1 – Борзинский; 2 – Забайкальский; 3 – Краснокаменский; 4 – Приаргунский; 5 – Александрово-Заводский; 6 – Калганский; 7 – Нерчинско-Заводский; 8 – Газимуро-Заводский.

Также заметная роль в образовании и размещении месторождений полезных ископаемых принадлежит гипергенным процессам. Ими обусловлены некоторые качественные и количественные характеристики руд на отдельных объектах. В первую очередь это касается россыпей золота и других металлов, значительной части месторождений строительных материалов, а также некоторых коренных месторождений металлических полезных ископаемых. В результате процессов гипергенеза на исследуемой территории были сформированы площадные и линейные коры вы-

ветривания, зоны окисления сульфидных месторождений и железные шляпы, а также образовались россыпи минералов, устойчивых к процессам выветривания. В качестве металлотектов, контролирующих размещение полезных ископаемых, рассматриваются железные шляпы и линейные коры выветривания, развивающиеся преимущественно по линейным зонам разрывных нарушений разного порядка (Шивохин и др., 2010).

Несмотря на относительно высокую опоскованность, ранее проведенные исследования ука-

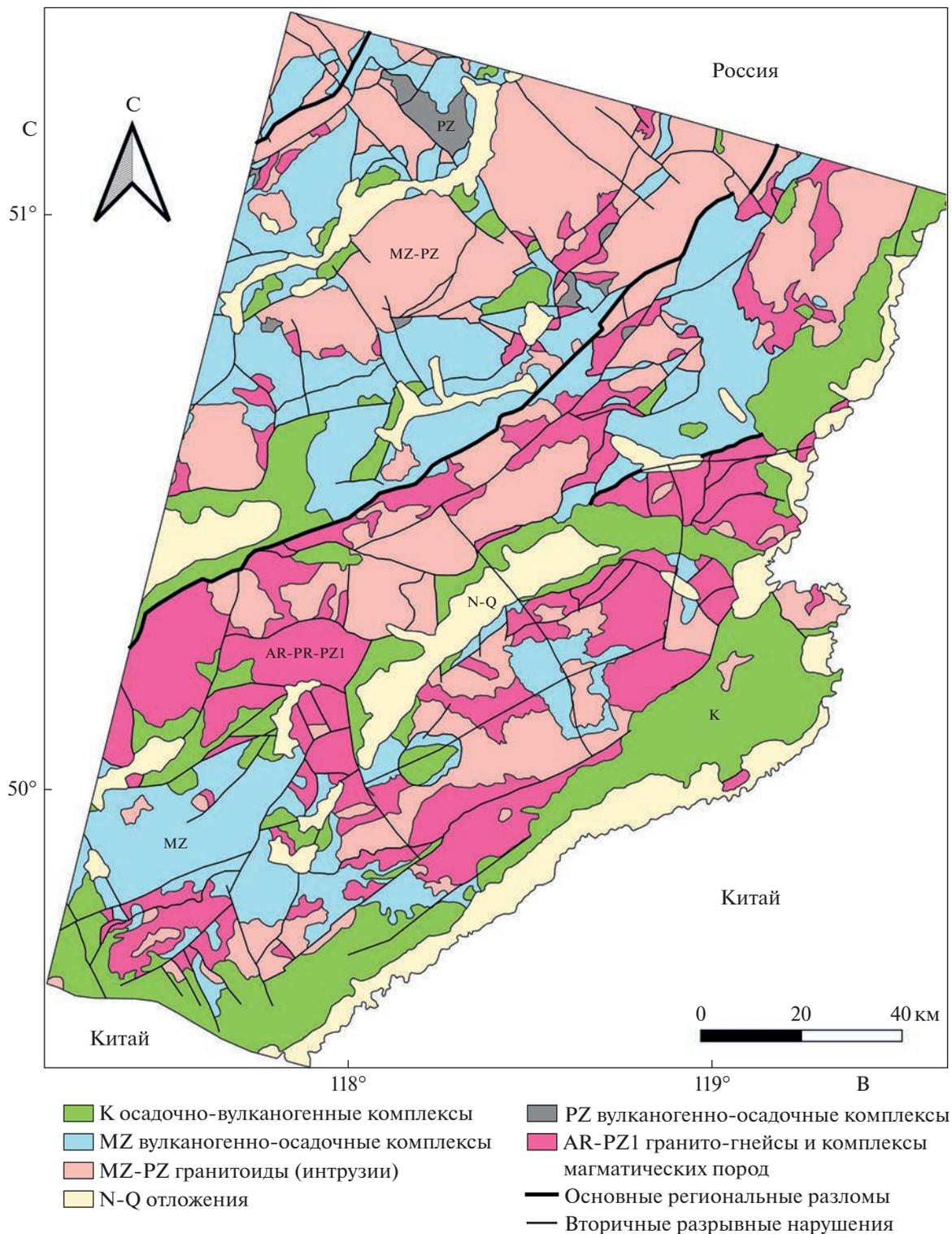


Рис 2. Схема геологического строения района исследования (модификация (Шивохин и др., 2010)).

зывают на то, что рассматриваемая территория имеет хорошие перспективы наращивания минерально-сырьевой базы по многим видам полезных ископаемых.

ДААННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

Характеристика спутниковых оптических данных. Landsat-8 запущен 11 февраля 2013 года и является восьмым в серии спутников (<http://sci->

ence.nasa.gov/missions/ldcm). На Landsat-8 установлено 2 сенсора OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infra-Red Sensor). OLI-сенсор собирает данные для восьми коротковолновых спектральных каналов с пространственным разрешением 30 метров и 15 метрового панхроматического канала: канал 1 – глубокий синий (0.43–0.45 μm), канал 2 – синий (0.45–0.51 μm), канал 3 – зеленый (0.53–0.59 μm), канал 4 – красный (0.64–0.67 μm), канал 5 – ближний инфракрасный (0.85–0.88 μm), канал 6 – коротковолновый инфракрасный (1.57–1.65 μm), канал 7 – коротковолновый инфракрасный (2.11–2.29 μm), канал 8 – панхроматический (0.50–0.68 μm), и канал 9 – перистые облака (Cirrus) (1.36–1.38 μm). 1 – канал OLI сенсора используется в основном для наблюдений за окрасом океана в прибрежных зонах, а 9 коротковолновый инфракрасный канал OLI сенсора позволяет обнаруживать перистые облака (Cirrus), т.к. он захватывает сильную спектральную функцию поглощения водяного пара (Irons et al., 2012). TIRS-сенсор собирает данные изображения для двух тепловых каналов: канал 10 (10.60–11.19 μm) и канал 11 (11.50–12.51 μm) с пространственным разрешением 100 м. Кроме каналов OLI и TIRS сенсоров в наборе данных Landsat-8 OLI присутствует канал “оценка качества”, представляющий собой побитно упакованные данные о поверхностных, атмосферных и сенсорных условиях съемки, которые могут повлиять на общую полезность данного пикселя (Acharya and Yang, 2015).

Данные Landsat-8 OLI собираются полосой захвата в 185 километров и сегментируются на сцены размером 185 \times 180 км, имеют высокое отношение сигнала к шуму и 12-битное квантование данных, что позволяет измерять тонкую изменчивость отражения земной поверхности, что целесообразно для регионального геологического картирования (Irons et al., 2012).

Предобработка спутниковых оптических данных. Для данного исследования из Информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных дистанционного зондирования Земли (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov>) на дату 21 октября 2017 г. было получено дневное безоблачное изображение Landsat-8 уровня обработки 1T (с поправкой на рельеф) LC08_L1TP_165013_20161001_20170320_01_T1 (path/row 165/13), покрывающее исследуемую территорию. Полученный продукт является ортотрансформированным и его картографическая проекция определена в 50 зоне Универсальной поперечной проекции Меркатора (UTM) с использованием датума всемирной системы геодезических параметров Земли 1984 г. (WGS84).

Предобработка спутниковых данных для проведения геолого-минералогического картирова-

ния была выполнена авторами наряду с современным мировым опытом (Sekandari et al., 2022; Wambo et al., 2020; Pour and Hashim, 2015):

- для калибровки исходных цифровых значений (DN) изображения к отражающей способности дневной поверхности земли (диапазон от 0 до 1) применен алгоритм быстрого атмосферного анализа спектрального гиперкуба в пределах прямой видимости (FLAASH) (Cooley et al., 2002) с использованием субарктической летней атмосферной и сельской аэрозольной моделей MODTRAN (Berk et al., 1989);

- на основе канала “оценка качества” произведена изоляция пикселей, которые могут внести погрешности в дальнейшую обработку изображения;

- рассчитаны Нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) (Rouse et al., 1973) и Нормализованный относительный индекс воды (NDWI) (Gao, 1996) с целью маскировать растительный и водный покров дневной поверхности, т.к. области земной поверхности с преобладанием сильного (интенсивного) растительного и водного покрова делают невозможным оценку уникального спектрального вклада горных пород и почв в пиксель изображения;

- вырезана исследуемая область.

Композитное изображение в псевдоцветах. Для дешифрирования земной поверхности широко используются различные цветовые комбинации спутниковых снимков, полученных в VNIR, SWIR и TIR спектральных диапазонах. Однако среди множества свободно доступных спутниковых оптических данных для проведения геологического картирования успешно себя зарекомендовали данные Landsat (Mwaniki et al., 2015). Композитное изображение в ложных цветах (FCC) является одним из лучших способов интерпретации растровой информации, полученной в различных диапазонах электромагнитного спектра (как видимого, так и не видимого), с использованием аддитивной RGB-модели (Richards and Xiruping, 2006). Цветовые композиты набора данных Landsat в основном используются для распознавания классов материалов таких как, горные породы, растительность и водные объекты (Chukwu et al., 2013). Для литологического картирования, создание композита ложного цвета (FCC) основано на комбинации коллективно наименее коррелированных спектральных каналов, отражающих уникальные спектральные характеристики поглощения и отражения различных горных пород и минералов (Sabins, 2007). Полученные комбинации спектральных каналов позволяют различать области с различными структурами, литологическими разностями и минералами, которые характеризуются на полученном FCC изображении различными цветами и их градиентами. Цве-

Таблица 1. Матрица собственных векторов, полученная в ходе PCA трансформации

Собственные векторы	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 4	Канал 5	Канал 6	Канал 7
PC1	-0.0495	-0.0650	-0.1497	-0.2377	-0.4534	-0.6808	-0.4953
PC2	0.4064	0.4415	0.4805	0.4465	0.0958	-0.0443	0.0636
PC3	-0.1689	-0.1306	-0.0420	0.0887	0.8011	-0.1440	-0.5313
PC4	-0.1444	-0.2034	-0.1624	-0.2091	0.3025	-0.5585	0.6814
PC5	0.5881	0.3506	-0.1666	-0.6658	0.2266	0.0788	-0.0507
PC6	0.5190	-0.2626	-0.6596	0.4748	-0.0200	-0.0258	0.0079
PC7	0.4096	-0.7420	0.5057	-0.1544	-0.0130	0.0207	-0.0388

товая гамма одной и той же комбинации может отличаться для каждой исследуемой территории, что в свою очередь связано с различными обстановками осадконакопления и минеральным составом горных пород (Bishta, 2009).

В рамках нашего исследования был подобран RGB композит из 2, 5 и 7 каналов Landsat-8, являющийся наиболее информативным для регионального картирования различных геологических формаций в пределах Юго-Восточного Забайкалья.

Анализ главных компонент. Анализ главных компонент (PCA) является статистическим методом, преобразующим набор коррелированных данных в набор некоррелированных линейных данных, которые называются “главными компонентами” (PCs) (Ruiz-Armenta and Prol-Ledesma, 1998; Ourhif and Algouti, 2019). Он может быть основан как на ковариационной, так и на корреляционной матрице (Pour and Hashim, 2016). PCA широко применяется для геолого-минералогического картирования территорий на основе спектральных особенностей материалов на дневной поверхности, зафиксированных сенсорами дистанционного зондирования (Pour and Hashim, 2016). Как правило, набор данных, преобразованный этим методом, обычно сохраняет до 97% информации исходного набора данных (Kruse et al., 1993). Основной целью данного преобразования является максимизация отношения сигнал/шум для повышения надежности выделения объектов дневной поверхности по их спектральным характеристикам.

Некоррелированные линейные комбинации (нагрузки собственных векторов) первых семи каналов Landsat-8 содержат информацию, связанную с Fe³⁺, Fe²⁺ (гематит, ярозит и др.), Al/Fe–OH (биотит, серицит и др.), Mg–Fe–OH (хлорит, эпидот и др.), CO₃²⁻ (кальцит, доломит и др.) и Si–OH (опал/халцедон и др.) группами минералов. Эта информация может быть извлечена из спектральных каналов ближнего (VNIR), коротковолнового (SWIR) и теплового (TIR) инфракрасных

диапазонов (Loughlin, 1991; Pour and Hashim, 2016). Как правило, PCs с сильными нагрузками собственных векторов в определенных спектральных каналах характеризуют отражательную и поглощающую способность указанных ранее групп минералов противоположными знаками. Положительная нагрузка в спектральном канале подчеркивает группу минералов в виде ярких пикселей, в то время как отрицательная нагрузка отображает группу минералов в виде темных пикселей (Loughlin, 1991).

Метод PCA был применен к семи каналам Landsat-8 (1–7), используя ковариационную матрицу. В табл. 1 представлена матрица собственных векторов для выбранных каналов Landsat-8 (1–7), полученная при PCA трансформации.

Метод главных компонент с предварительной нормализацией шума. Метод главных компонент с предварительной нормализацией шума (MNF) – хорошо известная технология обработки мультиспектральных и гиперспектральных изображений, уменьшающая и отделяющая шумовые компоненты (Green et al., 1988). MNF является линейным преобразованием и состоит из двух последовательных PCA трансформаций. Первая трансформация использует ковариационную матрицу шумов для декорреляции и перемасштабирования шумовых компонент. Данные, имеющие единичную дисперсию и не имеющие межканальной корреляции, рассматриваются как шум и отделяются от остальных данных. На следующем этапе к изолированным от шумов данным применяется стандартная PCA трансформация, целью которой является повторный пересмотр среднеквадратических отклонений шумовых компонент. Подобно изображениям PC, MNF изображения также упорядочиваются в соответствии с максимальной изменчивостью данных с отличием в том, что PCs упорядочиваются в соответствии с уменьшением дисперсии, а MNFs в соответствии с уменьшением уровня полезного сигнала.

В табл. 2 представлена матрица собственных векторов первых семи каналов Landsat-8 (1–7), полученная при MNF трансформации.

Таблица 2. Матрица собственных векторов, полученная в ходе MNF трансформации

Собственные векторы	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 4	Канал 5	Канал 6	Канал 7
PC1	-0.0824	-0.1040	-0.1910	-0.2730	-0.4650	-0.6520	-0.4800
PC2	0.2390	0.2730	0.3450	0.4040	0.5100	-0.0455	-0.3440
PC3	0.3680	0.3430	0.3500	0.2260	-0.6300	-0.1410	0.3960
PC4	0.2160	0.1880	0.0786	0.0844	-0.2680	0.5880	-0.6970
PC5	0.5890	0.3820	-0.2830	-0.6080	0.2290	-0.0178	0.0768
PC6	-0.4570	0.3190	0.6370	-0.5290	0.0414	0.0363	-0.0330
PC7	0.4450	-0.7170	0.4800	-0.2350	0.0311	0.0154	-0.0291

Независимый компонентный анализ. Независимый компонентный анализ (ИКА) является статистическим методом, извлекающим независимые компоненты (источники) из многомерного сигнала за счет разложения наблюдаемых случайных переменных в линейную комбинацию независимых случайных компонент (Comon, 1994). В основе данного подхода лежат два основных предположения: 1) распределение компонентов, составляющих сигнал, отлично от нормального, т.е. негауссово; 2) компоненты статистически независимы друг от друга. ИКА по своей формулировке близок к PCA, но в отличие от него он направлен на поиск набора независимых, а не ортогональных компонент. Также он использует статистику более высокого порядка и может различать интересующие объекты даже тогда, когда они занимают лишь небольшую часть пикселей изображения (Adiri et al., 2019).

С целью обособления максимально независимых пикселей, связанных с минералами гидротермальной природы и продуктами гипергенеза, ИКА анализ был применен к результатам PCA трансформации, т.е. к семи изображениям главных компонент. Полученные результаты были проанализированы на основе статистических коэффициентов, двумерных диаграмм рассеяния и их визуального анализа.

Моделирование на основе нечеткой логики. Моделирование на основе нечеткой логики основано на теории нечеткой логики, предложенной L.A. Zadeh (Zadeh, 1965). Это форма неоднозначной логики, в которой переменные могут принимать любые вещественные (действительные) значения в диапазоне от 0 до 1 включительно (Novák et al., 1999). Моделирование на основе нечеткой логики успешно применяется для построения схем распределения перспективных областей на рудную минерализацию в пределах металлогенических провинций (Ghanbari et al., 2012; Kim et al., 2019). Моделирование на основе нечеткой логики для картирования перспективных зон на обнаружение полезных ископаемых обычно состоит из трех последовательных этапов: 1) фаззификация

фактических данных; 2) логическая интеграция фаззифицированных фактических данных при помощи сети вывода и подходящего нечеткого оператора; 3) дефаззификация полученных результатов с целью облегчения их интерпретации (Carranza, 2008). Результатом первого этапа является набор значений нечеткого множества, выражающегося в виде непрерывного ряда от 0 до 1. Значение 0 означает отсутствие принадлежности к определенному нечеткому множеству, а значение 1 – полную принадлежность. В промежутке степень принадлежности значений соответствует выбранной функции множества. Фаззификация производится для каждой фактической карты, которая в дальнейшем будет подлежать интеграции. При интегрировании методом нечеткой логики взвешивается весь фаззифицированный набор данных на основе значений расстояний между объектами и каждому пикселю или пространственному положению назначается определенный вес в диапазоне от 0 до 1 (Carranza, 2008).

Для логической интеграции наборов данных, используемых при поиске полезных ископаемых, обычно используются пять типов наложений: Нечеткое И (AND), Нечеткое ИЛИ (OR), Нечеткое произведение (Product), Нечеткая сумма (Sum) и Нечеткая гамма (Gamma) (Bonham-Carter, 1994).

В табл. 3 приведен перечень входных слоев и параметры фаззификации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Композитное изображение в ложных цветах. Цветной RGB композит из 2, 5 и 7 (рис. 3) спектральных каналов Landsat-8 отображает классы геологических материалов, имеющих спектральные характеристики, связанные с оксидами/гидроксидами железа (Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}), а также с глинистыми (Al-OH и Fe, Mg-OH) и карбонатными (CO_3^{2-}) минералами. Данное утверждение основано на том, что минералы группы оксидов/гидроксидов железа имеют тенденцию к сильному поглощению в диапазоне от 0.4 до

Таблица 3. Параметры фаззификации для выбранных тематических слоев

Исходные данные	Входные слои	Диагностируемая группа минералов	Функция множества	Нечеткий оператор
Набор данных КА ДЗЗ Landsat-8 (VNIR-SWIR)	PC4	Глинистые и карбонатные минералы	Линейная	И
	MNF4			
	IC2			
	PC5	Минералы, содержащие оксиды/гидроксиды железа		
	MNF5			
	IC3	Геоботаническая аномалия и минералы с содержанием второго иона железа (Fe^{2+})		
	PC3			
	MNF3			
IC5				

1.1 μm (особенности поглощения Fe^{3+} от 0.45–0.90 μm , а Fe^{2+} от 0.90–1.2 μm) (Hunt and Ashley, 1979), что соответствует 2, 4 и 5 каналам Landsat-8. Глинистые (Al–OH and Fe, Mg–OH) и карбонатные (CO_3^{2-}) минералы имеют спектральные особенности поглощения в диапазоне от 2.1 до 2.4 μm , а отражательные в диапазоне от 1.55–1.75 μm (Hunt and Ashley, 1979), что соответствует 7 и 6 каналам Landsat-8 соответственно. Тем самым, данная цветовая комбинация хорошо подчеркивает текстурные характеристики магматических горных пород, отличая их от осадочных (Ourhzif and Algouti, 2019).

Также, следует отметить, что 5 канал чувствителен к растительному покрову. Это позволяет отличать районы с высокой растительностью от гидротермально измененных зон. Особенности поглощения растительного покрова находятся в диапазоне 0.45–0.68 μm , а высокая отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне от 0.7 до 1.2 μm (Ruiz-Argenta and Prol-Ledesma, 1998).

Визуальный анализ полученного псевдоцветного изображения показывает, что на основе определенных групп минералов исследуемую территорию можно условно разделить на северо-восточную и юго-западную части. Юго-западная часть характеризуется обильным пространственным распределением минералов класса оксида/гидроксида трехвалентного железа с примесью группы глинистых минералов (синий, фиолетовый, бледно-зеленый оттенки на рис. 3), а северо-восточная часть обладает равномерным пространственным распределением группы глинистых минералов с примесью минералов класса оксида/гидроксида двухвалентного железа. Растительный покров (плотный зеленый цвет) в основном приурочен к наиболее расчлененному и высокогорному рельефу территории.

Сверяясь с геологической картой (Шивохин и др., 2010), можно сделать вывод, что такое разделение классов геологических материалов на композитном RGB изображении, вероятно, связано с разновозрастными осадочными (алевролиты, песчаники, аргиллиты, конгломераты, туфо-песчаники, глины, суглинки и т.д.), магматическими (граниты, гранодиориты, граносиениты и т.д.) и метаморфическими (гнейсы, плагиогнейсы, гнейсо-граниты, амфиболиты, кристаллические сланцы, милониты и т.д.) горными породами, а также с процессами выполаживания территории преимущественно в ее юго-западной части. Магматические и метаморфические породы на RGB композите (см. рис. 3) выражены идентичными цветовыми характеристиками, что говорит о схожести их химического состава и в текущем исследовании рассматриваются как единый класс геологических материалов.

Основываясь на выявленных классах геологических материалов, структурно-геоморфологических предпосылках, геолого-ландшафтных условиях, наличии сельскохозяйственных угодий, цветовой гамме и градиентных переходах, подчеркивающих геологические границы, на основе псевдоцветного RGB композита было выделено 16 геолого-морфологических структур (см. рис. 3), связанных, согласно геологической карте (Шивохин и др., 2010), преимущественно с гранит-гранодиоритовыми и гранито-гнейсовыми комплексами.

Метод главных компонент. Анализ статистических данных, полученных при проведении PCA трансформации над VNIR и SWIR спектральными каналами Landsat-8 (см. табл. 1) показывает, что PCs могут рассматриваться как весомые показатели: растительного покрова; группы минералов с содержанием двухвалентного иона железа (Fe^{2+}); минералов группы оксидов/гидроксидов железа (Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}); группы глинистых (Al–OH и Fe, Mg–OH) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов. В табл. 3 представлены значения нагрузки

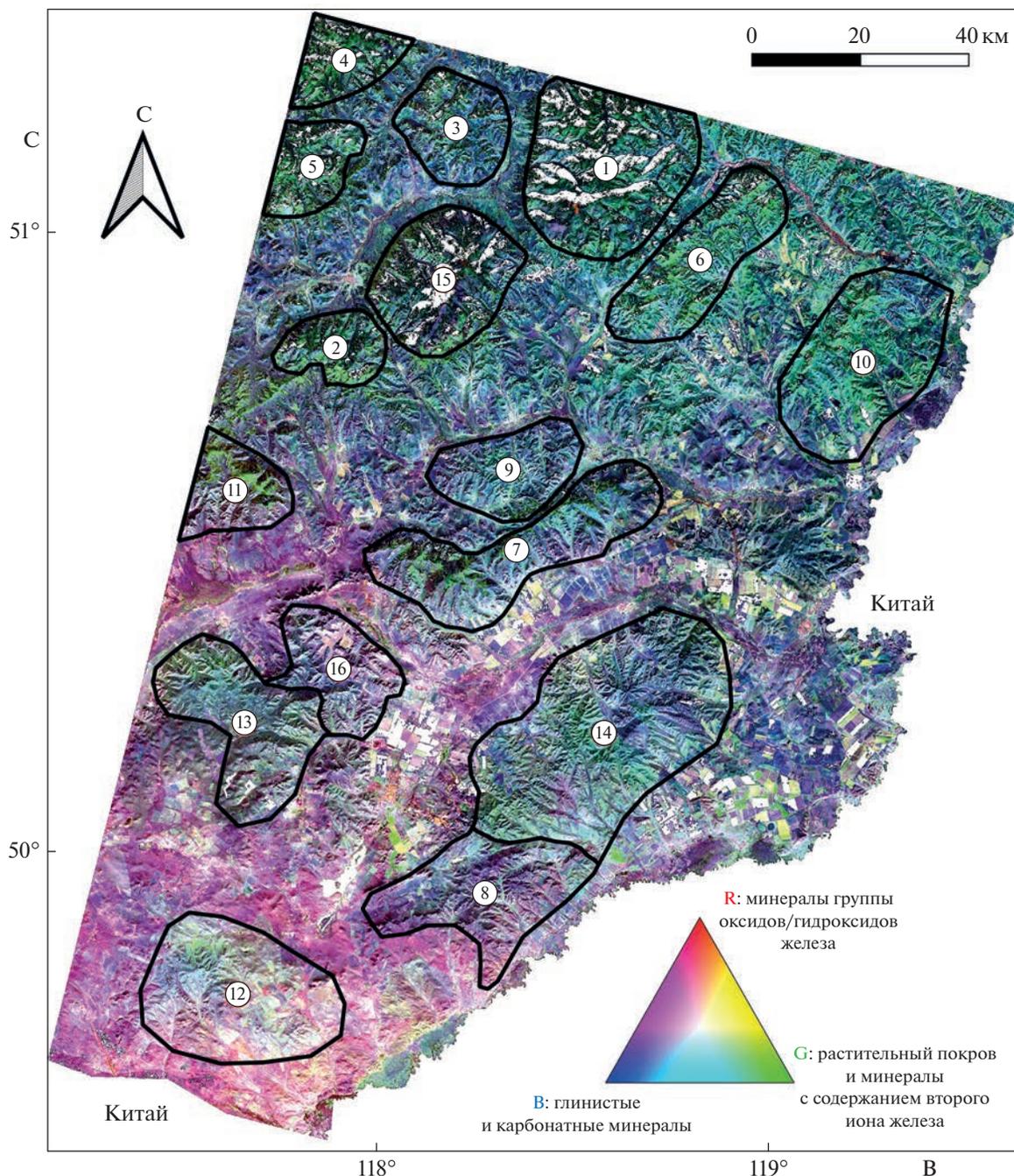


Рис. 3. Псевдоцветное RGB композит из 2, 5 и 7 каналов Landsat-8. 1–16 дешифрованные геолого-морфологические структуры.

собственных векторов для каждого PCs. Анализируя значение и знак нагрузки собственного вектора в PCs можно определить, что PC1 содержит отрицательную нагрузку во всех каналах. Это свидетельствует о том, что ни один из каналов не внес уникального вклада в формирование PC1, следовательно, он не может быть идентифицирован.

PC2 показывает умеренную и слабую положительную нагрузку практически во всех каналах кроме 6, имеющего очень слабую отрицательную нагрузку (-0.0443). На основе этого можно сделать вывод, что группа гидроксилсодержащих ($Al-OH$ и $Fe, Mg-OH$) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов проявляется на изображении PC2 в виде

темных пикселей из-за отрицательной нагрузки в 6 канале. Для удобства визуализации темные пиксели были инвертированы в светлые путем перемножения значений матрицы на -1 .

PC3 содержит сильную положительную нагрузку в 5 канале (0.80112) и умеренную отрицательную нагрузку в 7 канале (-0.5313), а вклад остальных каналов в формирование PC3 слаб и умерен. Следовательно, PC3 отображает полезную информацию, связанную с растительным покровом и группой Fe^{2+} минералов, в виде ярких пикселей.

PC4 имеет умеренную нагрузку в 6 (-0.5585) и сильную в 7 (0.6814) каналах с противоположными знаками. Учитывая, что нагрузка в 6 канале достаточно умеренная, а отрицательный вклад других каналов слаб, темные пиксели PC4 можно рассматривать как более надежные индикаторы группы гидроксилсодержащих (Al—OH и Fe, Mg—OH) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов по сравнению с пикселями PC2. Темные пиксели в PC4 были преобразованы в светлые за счет перемножения их на -1 .

Собственные вектора PC5 имеют сильную отрицательную нагрузку в 4 канале (-0.6658) и умеренную положительную нагрузку в 1 канале (0.5881). При этом нагрузка остальных каналов проявлена слабо. Следовательно, группа минералов, содержащих оксиды/гидроксиды железа (Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}) определяется в PC5 в основном темными пикселями. С целью преобразования темных пикселей в светлые, их значения были помножены на -1 .

Величины и знаки нагрузок собственных векторов для PC6 и PC7 (см. табл. 1) не указывают на наличие уникальных вкладов каналов Landsat-8 в их формирование, которые, как ожидалось, должны отражать гидротермально измененные горные породы и продукты гипергенеза.

На основе анализа матрицы нагрузок собственных векторов были выбраны компоненты PC4, PC5 и PC3 для формирования RGB композита (рис. 4). В R-канал был помещен PC4 (группа гидроксилсодержащих (Al—OH и Fe, Mg—OH) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов), в G-канал PC5 (группа минералов, содержащих оксиды/гидроксиды железа), а в B-канал PC3 (растительный покров и группа минералов, содержащих двухвалентный ион железа).

Метод главных компонент с предварительной нормализацией шума. По аналогии с PCA трансформацией, исходными данными для MNF послужили первые семь каналов Landsat-8. Поэтому, полученные результаты также могут быть рассмотрены как карты распределения растительного покрова и группы минералов с содержанием двухвалентного иона железа, минералов

группы оксидов/гидроксидов железа (Fe^{3+} и Fe^{3+} , а также группы глинистых (Al—OH и Fe, Mg—OH)

и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов, т.е. продуктов гипергенеза и гидротермально измененных минералов. Сравнение значений матриц собственных векторов MNF (см. табл. 2) и PCA (см. табл. 1) трансформаций показывает, что они имеют схожую картину распределений с незначительными отклонениями в сотых долях. Для количественной оценки взаимосвязи главных и шумовых компонент были построены двухмерные диаграммы рассеяния (рис. 5).

На диаграмме PC3 и MNF3 (рис. 5, а) прослеживается положительная линейная зависимость, сходящаяся при высоких значениях. Поэтому оба спектральных канала компонент описывают один и тот же класс природных материалов, т.е. растительный покров совместно с группой Fe^{+2} минералов. Наилучшим образом данный класс подчеркивает компонента PC3, т.к. в ее формирование 5 канал Landsat-8 внес наибольшую нагрузку (0.8011), чем в формирование MNF3 (0.63). Компоненты PC4 и MNF4 (рис. 5, б) также имеют положительную линейную корреляцию, но с увеличением дисперсии при высоких значениях (Pour et al., 2018a), и оба описывают группу гидроксилсодержащих и карбонатных минералов. График (в) на рис. 5 показывает очень сильную положительную корреляцию между PC5 и MNF5, что обосновывает тесное пространственное распределение минералов группы оксидов/гидроксидов железа.

Следовательно, выводы, сделанные при анализе матрицы собственных векторов PCA трансформации, уместны и при анализе матрицы собственных векторов MNF. Такое подобие связано с тем, что MNF трансформация основана на двух последовательных PCA преобразованиях и должна более надежно описывать спектральные классы и их пространственное распределение, чем PCA.

Определив, что 3, 4 и 5 шумовые компоненты имеют ключевое значение при определении основных групп гидротермально измененных пород и продуктов гипергенеза, на их основе был скомбинирован RGB композит (рис. 6).

На полученном изображении зоны с высоким содержанием глинистых и карбонатных групп минералов представлены красным, розовым и пурпурным цветами, приуроченными, преимущественно, к структурным нарушениям и дренирующим системам, а также к апикальным частям хребтов и делювиальным склонам (Wambo et al., 2020).

Широкое распространение минералов группы оксидов/гидроксидов железа в основном связано с альфегумусовыми почвами, являющимися основным природным элементом ландшафта на

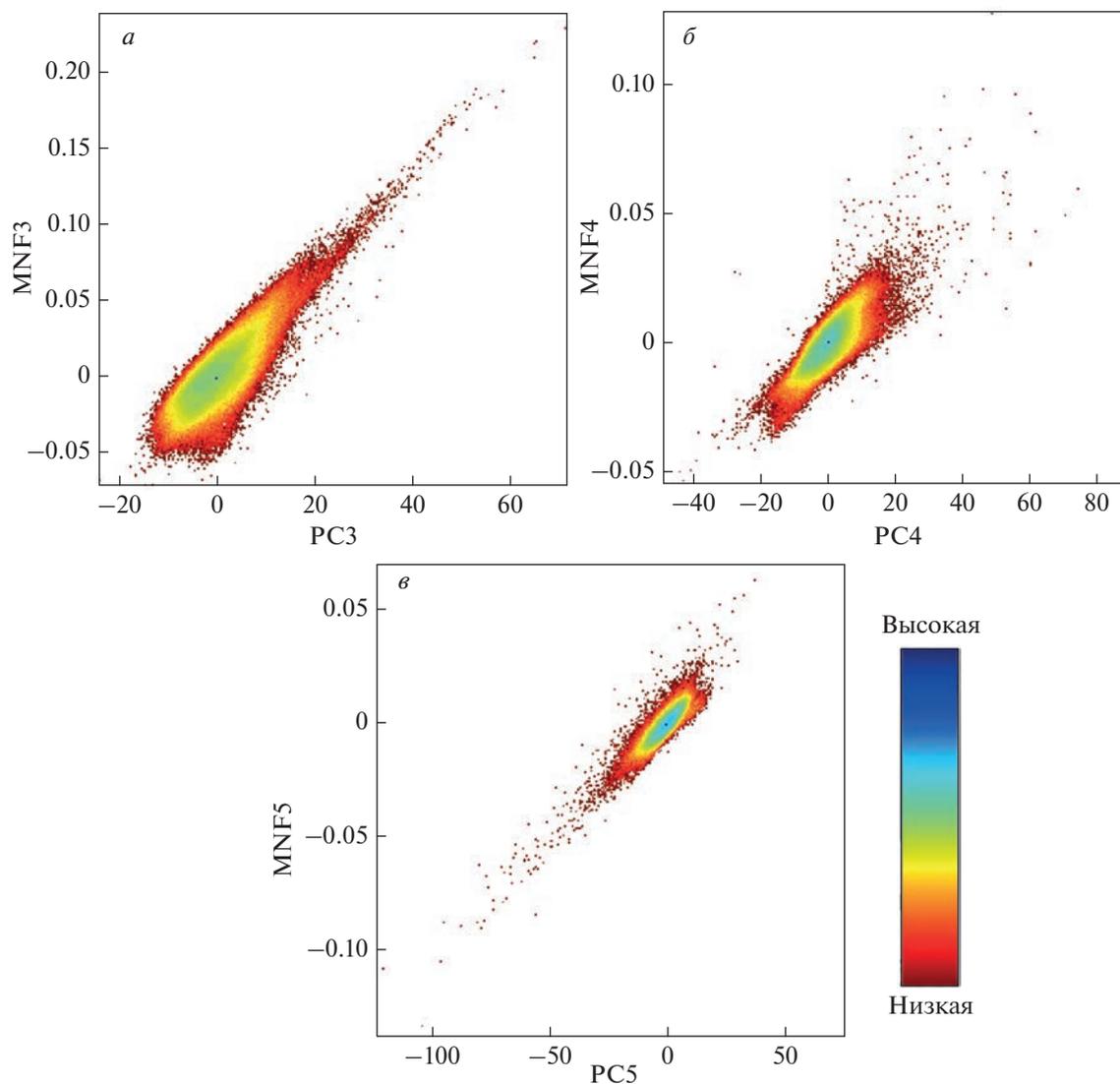


Рис. 5. (а) – двухмерный корреляционный график для PC3 и MNF3. (б) – двухмерный корреляционный график для PC4 и MNF4. (в) – двухмерный корреляционный график для PC5 и MNF5.

алов, посредством построения двухмерных диаграмм рассеяния.

В ходе анализа диаграмм рассеяния (рис. 7) было установлено, что изображение IC5 изолирует данные, связанные с растительным покровом и минералами Fe^{+2} группы (рис. 7, а), IC2 изолирует группу глинистых и карбонатных минералов (рис. 7, б), а IC3 изолирует минералы группы оксидов/гидроксидов железа (рис. 7, в).

Данное заключение основано на том, что на всех установленных диаграммах отчетливо прослеживается обратная линейная зависимость, что позволяет определить принадлежность входных данных к одному и тому же спектральному классу геологического материала. Также, анализ ковариационной и корреляционной матрицы для выбранных IC компонент подтверждает их макси-

мальную независимость друг от друга, так как их диагональные элементы эквивалентны, а их значения практически равны нулю (табл. 4, 5) (Pour et al., 2018a).

Следовательно, для отображения изолированных пикселей (улучшенных характеристик) определенных геологических материалов был построен RGB композит из IC2, IC3 и IC5 (рис. 8). Перед построением композита знаки значений компоненты IC5 были инвертированы, т.к. взаимосвязь IC5 с PC3 имеет обратную линейную зависимость (см. рис. 7, а), а знак нагрузки собственных векторов для PC3 в 5 канале Landsat-8 является положительным.

На синтезированном ICA композите (см. рис. 8) наблюдается более строгое разделение групп минералов и их локализация среди растительного

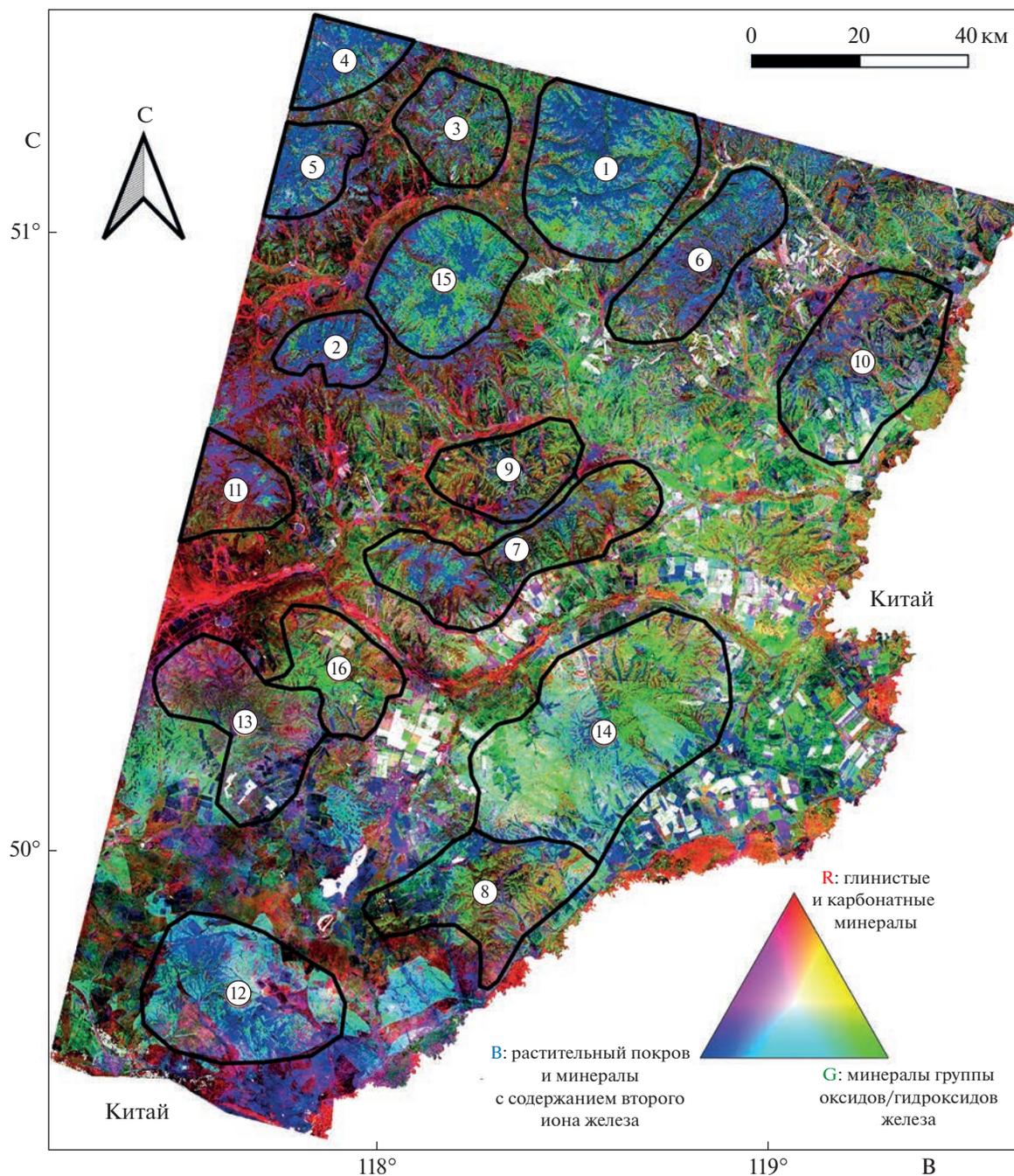


Рис. 6. MNF композит (R: MNF4, G: MNF5, B: MNF3). 1–16 дешифрованные геолого-морфологические структуры.

покрова по сравнению с результатами PCA и MNF преобразований. Растительный покров в зависимости от его плотности, помимо темно синего оттенка, приобрел бледно-серый и бледно-бирюзовый оттенки. Также стали более явно выражены геоморфологические структуры, в основном речные системы совместно с аллювиальными и делювиальными отложениями, сложенными преимущественно гидроксилсодержащими минералами (красный и розовый оттенки).

Области, затронутые преимущественно окислительными процессами (зеленый и светло-зеленый оттенки), также подверглись пространственному распределению, и стали более плотно локализованы. Желтые и оранжевые оттенки, свойственные также результатам PCA и MNF, предположительно, связаны с зонами гидротермально измененных горных пород или продуктами гипергенеза.

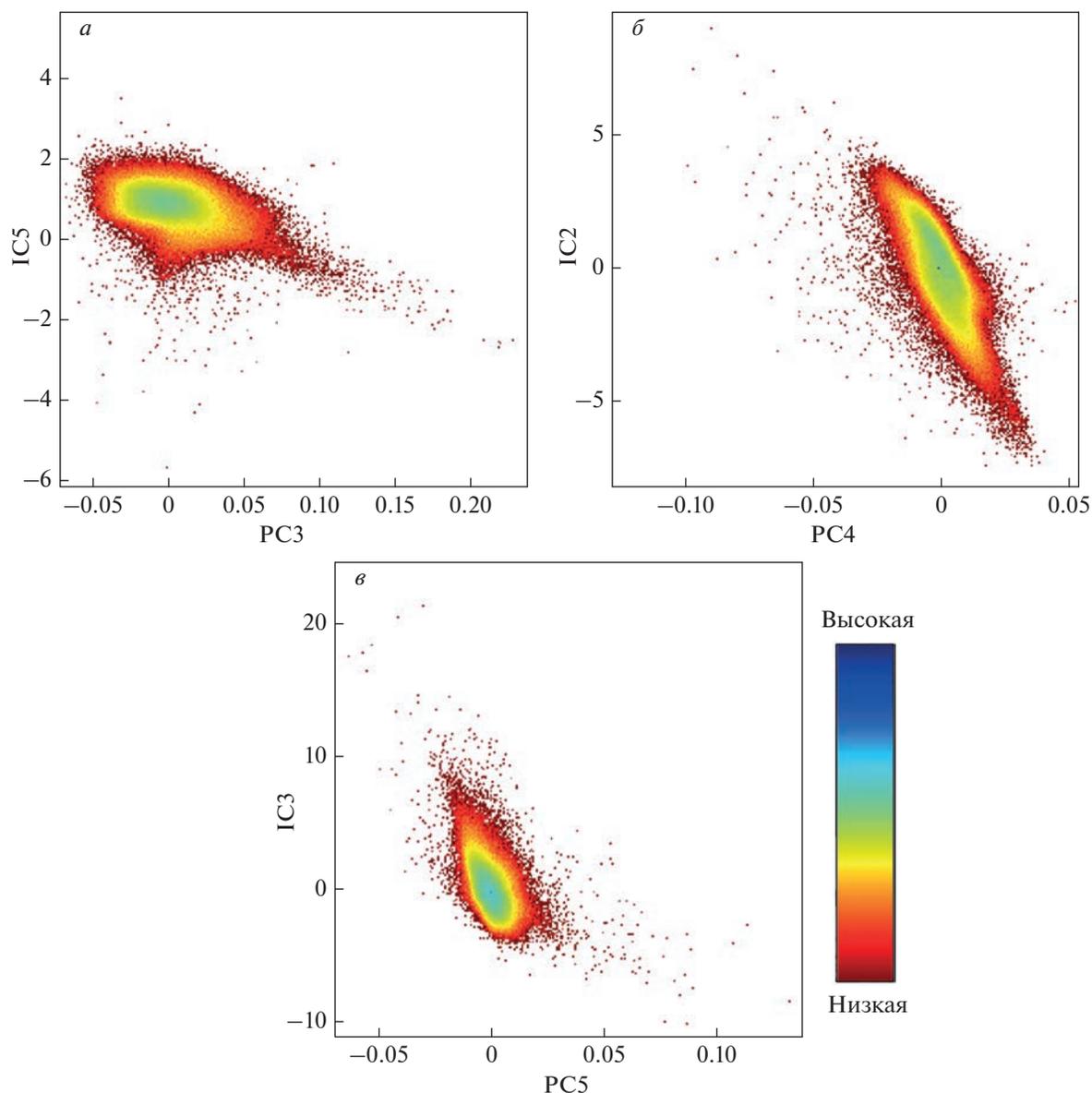


Рис. 7. (а) – двухмерный корреляционный график для PC3 и IC5. (б) – двухмерный корреляционный график для PC4 и IC2. (в) – двухмерный корреляционный график для PC5 и IC3.

Моделирование схемы перспективности на обнаружение полезных ископаемых. Для того чтобы построить схему регионального пространственного распределения наиболее благоприятных нахождение рудной минерализации областей на основе модели нечеткой логики были использованы соответствующие тематические слои, полученные в ходе статистического преобразования набора данных Landsat-8 методами PCA, MNF и ICA (см. табл. 3). Из PCA трансформации были выбраны PC4, PC5 и PC3 тематические компоненты, из MNF – MNF3, MNF4 и MNF5 тематические компоненты, а из ICA – IC2, IC3 и IC5 тематические компоненты. Перед проведением ин-

теграции, с использованием оператора “AND”, выбранные тематические слои сначала были переклассифицированы, а затем фазифицированы, используя линейную функцию множеств. Полученная схема перспективности на обнаружение полезных ископаемых в пределах исследуемой территории представлена на рис. 9.

Для проведения пространственного анализа распределения классов нечеткого множества, относительно расположения комплексов пород, рудных узлов, лицензионных площадей известных полезных ископаемых и тектонических нарушений, они были нанесены на схему (см. рис. 9). Анализ показал, что предполагаемые высоко-

Таблица 4. Ковариационная матрица, полученная при ICA трансформации над результатами PCA

Ковариация	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
IC1	3.67E-02	2.03E-12	-1.73E-12	-5.69E-13	1.12E-13	-1.70E-13	-2.42E-14
IC2	2.03E-12	3.28E-04	-4.89E-14	-2.72E-14	6.67E-15	-6.43E-15	-3.86E-15
IC3	-1.73E-12	-4.89E-14	1.91E-04	7.73E-15	-2.65E-15	1.84E-15	1.36E-15
IC4	-5.69E-13	-2.72E-14	7.73E-15	2.85E-05	-1.14E-15	1.09E-15	6.63E-16
IC5	1.12E-13	6.67E-15	-2.65E-15	-1.14E-15	1.25E-05	-3.63E-16	-9.34E-17
IC6	-1.70E-13	-6.43E-15	1.84E-15	1.09E-15	-3.63E-16	1.62E-06	1.69E-16
IC7	-2.42E-14	-3.86E-15	1.36E-15	6.63E-16	-9.34E-17	1.69E-16	9.44E-07

Таблица 5. Корреляционная матрица, полученная при ICA трансформации над результатами PCA

Корреляция	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
IC1	1.00E+00	5.84E-10	-6.53E-10	-5.57E-10	1.66E-10	-6.95E-10	-1.30E-10
IC2	5.84E-10	1.00E+00	-1.95E-10	-2.82E-10	1.04E-10	-2.78E-10	-2.19E-10
IC3	-6.53E-10	-1.95E-10	1.00E+00	1.05E-10	-5.42E-11	1.04E-10	1.02E-10
IC4	-5.57E-10	-2.82E-10	1.05E-10	1.00E+00	-6.03E-11	1.60E-10	1.28E-10
IC5	1.66E-10	1.04E-10	-5.42E-11	-6.03E-11	1.00E+00	-8.06E-11	-2.72E-11
IC6	-6.95E-10	-2.78E-10	1.04E-10	1.60E-10	-8.06E-11	1.00E+00	1.36E-10
IC7	-1.30E-10	-2.19E-10	1.02E-10	1.28E-10	-2.72E-11	1.36E-10	1.00E+00

перспективные зоны с интенсивностью от 0.6 до 1 в основном приурочены к мезозойским вулканогенно-осадочным комплексам, неоген-четвертичным отложениям, протяженным разломным зонам и контактам интрузивных тел (см. рис. 2). Также наблюдается повышенная концентрация перспективных зон (от 0.7 до 1) в пределах рудных узлов и лицензионных площадей (см. рис. 9) и приуроченность к ним большинства известных рудных объектов золотой, урановой, полиметаллической и флюоритовой минерализации, локализация которых, также контролируется протяженными разрывными нарушениями (см. рис. 9). Стоит отметить, что не всегда наблюдается согласованность между высоко-перспективными аномалиями (от 0.6 до 1), рудными узлами и рудными объектами: иногда аномалии расположены в стороне от рудных объектов или за пределами рудных узлов. Такое частичное совпадение, с одной стороны, говорит о том, что метод не является универсальным и должен быть использован наряду с традиционными методами проведения региональных прогнозно-поисковых исследований. А с другой стороны позволяет обратить внимание на участки, которые ранее не считались перспективными.

Помимо этого, был проведен пространственный анализ между известными зонами гидротермально-метасоматических изменений пород и предположительно перспективными зонами с интенсивности от 0.7 до 1. В ходе этого анализа была выявлена пространственная закономер-

ность в локализации этих зон в пределах областей гидротермально-метасоматических изменений, широко проявленных на исследуемой территории: аргиллизация, пропилитизация, серицитизация, окварцевание и грейзенетизация, скарнирование.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наше исследование было нацелено на оценку возможности проведения регионального геолого-минералогического картирования территории Юго-Восточного Забайкалья (Россия) на основе набора данных Landsat-8 в условиях резко-континентального климата, наличия умеренной растительности и альфегумусовых почв, влияющих в той или иной степени на спектральную кривую гидротермально измененных минералов или маскирующих гидротермально измененные зоны. Для минимизации отрицательно влияющих природных факторов при проведении геолого-минералогического картирования была использована безоблачная сцена с датой съемки, характеризующаяся наименьшей степенью влажности и растительности. Для устранения корреляции между спектральными каналами, выявления и удаления скрытых факторов, препятствующих геолого-минералогическому картированию, и, как итог, для классификации независимых друг от друга пикселей изображения, отражающих уникальную спектральную характеристику гидротермально измененных минералов или их групп, были ис-

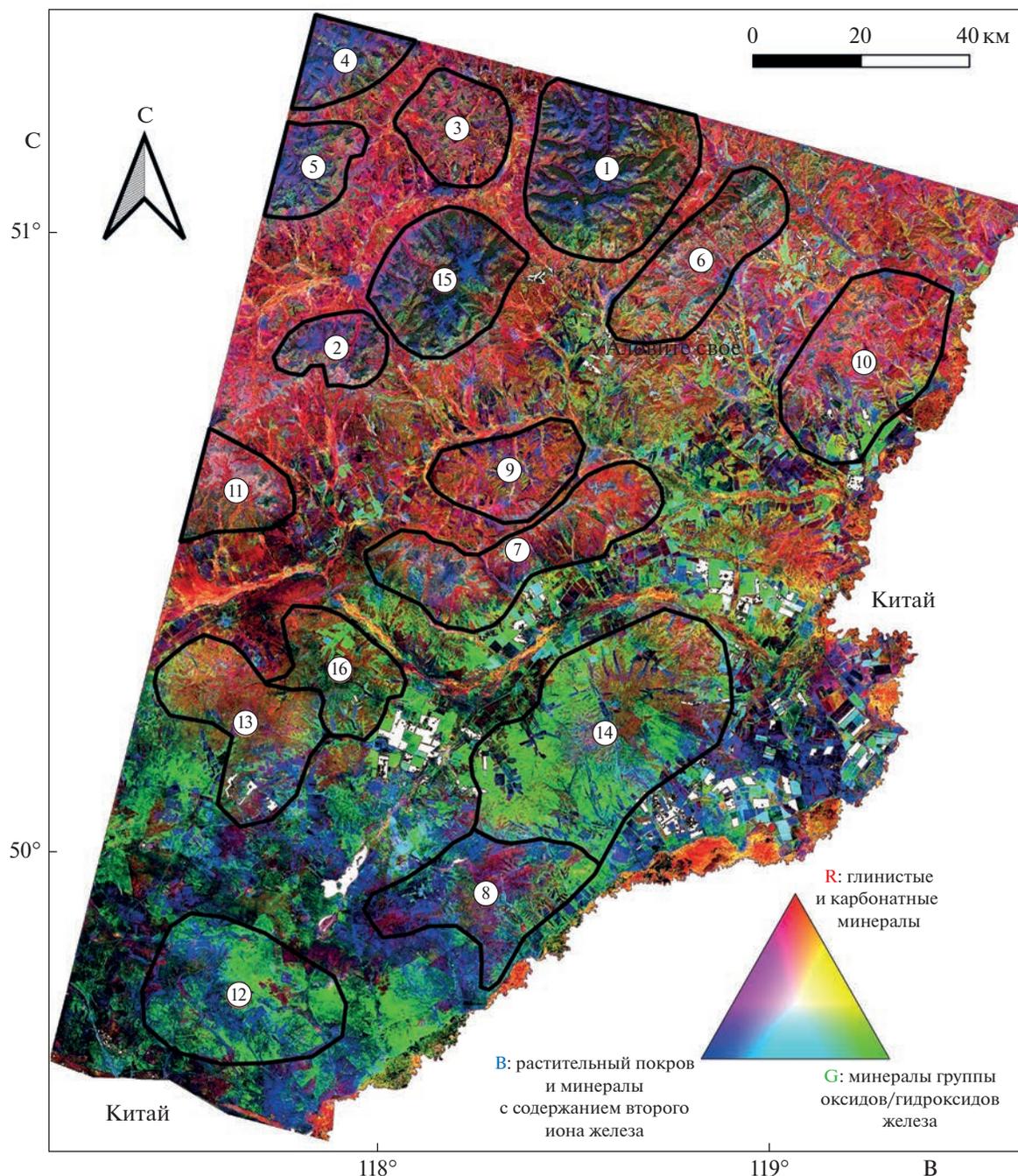


Рис. 8. ICA композит (R: IC2, G: IC3, B: IC5). 1–16 дешифрованные геолого-морфологические структуры.

пользованы статистически обоснованные методы обработки изображений, такие как PCA, MNF и ICA.

На первом этапе исследования был сгенерирован композит в ложных цветах из 2, 5 и 7 спектральных каналов Landsat-8 с целью оценки возможности проведения геологического картирования исследуемой территории. В результате было установлено, что из-за весьма сложного гео-

логического строения исследуемой территории, наличия растительного покрова, мощных четвертичных отложений, схожего вещественного состава основной массы горных пород и как следствие отсутствия их уникальных спектральных особенностей в пределах диапазонов сенсоров Landsat-8, невозможно произвести однозначной идентификации горных пород или их комплексов (формаций). Несмотря на это, на основе пространственного распределения выявленных групп

грузки в матрицах собственных векторов для выбранных тематических каналов имеют достаточно высокие значения (см. табл. 1 и 2), а двухмерные корреляционные графики отражают уверенный линейный тренд (см. рис. 5 и 7). По результатам каждой из трансформаций был сгенерирован RGB композит из тематических слоев групп гидротермально-измененных минералов.

В ходе третьего этапа исследования на основе модели нечеткой логики была построена интегральная схема перспективности на обнаружение полезных ископаемых, полученная из информативных тематических слоев, идентифицированных после PCA, MNF и ICA преобразований (см. табл. 3, рис. 9). Пространственное распределение благоприятных на выявление рудной минерализации областей интенсивностью от 0.6 до 1 хорошо согласуются с продуктивностью этапов рудогенеза, протекавших в интервале от протерозоя до голоцена включительно.

Наиболее продуктивные минерагенические события происходили в мезозойскую эру, когда в процессе внутриплитной тектономагматической активизации формировались субщелочные магматиты с Au-, Cu–Mo-, Pb–Zn–Ag-металлогенической специализацией, вулканоплутонические комплексы кальдер с Mo–U, Pb–Zn и флюоритовыми рудами, а затем редкометальные граниты с Sn–W–Li–Ta спектром минерализации (Петров и др., 2017). В связи с проявлением мезозойского магматизма происходили и процессы гидротермально-метасоматических изменений пород от магнезиальных и известковых скарнов, калишпатитов, грейзенов и березитов до гидрослюдитов и аргиллизитов (Андреева и др., 2020). На заключительных стадиях активизационных событий и в процессе пенепленизации территории формировались крупные месторождения угля, сидеритов и цеолитов (Шивохин и др., 2010). На протяжении всей истории развития рудогенетических процессов ключевую роль в теплопереносе играли разломные зоны разного ранга, которые служили проницаемыми каналами для магмы и рудоносных растворов, а также имели важное рудо локализирующее значение.

Высоко перспективные зоны с интенсивностью от 0.8 до 1 также наблюдаются в ореолах развития неоген-четвертичных отложений, сложенных преимущественно песчаниками, каолинит-гидрослюдистыми и аргиллитоподобными глинами, и представляют собой продукты переотложения палеогеновых кор выветривания, которые потенциально могут рассматриваться как строительное сырье (Шивохин и др., 2010).

Северная, более расчлененная часть территории характеризуется повышенным наличием почвенно-растительного покрова, который перекрывает коренные рудомещающие породы. Это

делает территорию практически не пригодной для минералогического картирования, хотя она и имеет высокие перспективы на выявление крупных золоторудных, медно-молибденовых и полиметаллических месторождений. С другой стороны, геоботанические аномалии в почвах можно рассматривать как индикатор наличия гидротермально измененных горных пород. Однако, такое предположение может способствовать ориентировке на ложные аномалии наряду с аномалиями, которые действительно связаны с рудной минерализацией. В связи с этим использование, например, мультиспектральных космических данных дистанционного зондирования земли с повышенным пространственным и спектральным разрешением, таких как Aster или WorldView-3, применение разнообразного набора методов обработки ДДЗ, их интеграция и более тщательный выбор даты съемки сцены смогут повысить качество результатов геолого-минералогического картирования на территориях с повышенной плотностью растительного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование демонстрирует применение статистических методов обработки данных дистанционного зондирования Земли на примере VNIR и SWIR диапазонов спектральных каналов Landsat-8 с целью оценки пригодности территории Юго-Восточного Забайкалья (Россия) для проведения более детального геолого-минералогического картирования в пределах рудных узлов, лицензионных площадей и известных месторождений. Анализ матриц собственных векторов и двухмерных корреляционных графиков позволил установить взаимосвязь между результатами статистической обработки данных Landsat-8 и спектральными характеристиками, связанными с оксидами/гидроксидами железа (Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}), глинистыми (Al–OH и Fe, Mg–OH) и карбонатными (CO_3^{2-}) группами минералов гидротермально-измененных пород, являющихся индикаторами процессов гидротермального рудообразования. На основе полученных тематических слоев с использованием модели нечеткой логики была сгенерирована схема перспективности на обнаружение полезных ископаемых. Интенсивность градиента (от синего – 0 к красному – 1) полученной схемы отражает предполагаемые, наиболее благоприятные участки локализации гидротермальной минерализации. На основе пространственного анализа геологической информации и результатов обработки ДДЗ установлена приуроченность предполагаемых аномалий преимущественно к мезозойским плутоническим и вулканогенно-осадочным комплексам, а также неоген-четвертичным отложе-

ниям, протяженным разломным зонам и контактам интрузивов. Опираясь на информацию о продуктивности этапов рудообразования, предложено повысить перспективность аномалий с интенсивностью от 0.7 до 1, пространственно связанных с тектоническими нарушениями разного порядка и развитых в пределах позднемезозойских вулcano-плутонических комплексов и платформенных неоген-четвертичных отложений. Также выявлена тесная пространственная взаимосвязь между аномалиями прогнозной схемы интенсивностью от 0.7 до 1 с рудными объектами, вмещающими U, Ag, Pb, Zn и флюоритовую минерализацию, которая контролируется тектоническими нарушениями и развита преимущественно в пределах рудных узлов и лицензионных площадей. На основе полученных результатов и геологических критериев локализации продуктивного оруденения можно наметить перспективные участки как в пределах известных рудных узлов, так и за их пределами.

В целом, результаты проведенного исследования позволяют сделать положительный вывод о пригодности использования дистанционных методов для проведения более детального геолого-минералогического картирования территории со сложными условиями континентального климата. При этом необходимо отметить, что данный вывод делается с учетом некоторых пространственных ограничений, снижающих достоверность картирования, а именно районы с повышенным растительным и почвенным покровом, водными объектами и затронутые антропогенной деятельностью.

В рамках дальнейших исследований планируется использовать данные спутников Aster, Sentinel-2 и коммерческого WorldView-3, так как они обеспечивают более благоприятные пространственные и спектральные характеристики VNIR, SWIR и TIR диапазонов для выявления геологических особенностей территории и проведения более детального геолого-минералогического картирования.

Результаты, продемонстрированные в исследовании, представляют значительный вклад в область разработки способов применения спутниковых мультиспектральных данных дистанционного зондирования для региональной разведки полезных ископаемых. Данная работа может быть полезна для ученых, исследователей, горнодобывающих и геологоразведочных компаний, применяющих мультиспектральные и гиперспектральные данные дистанционного зондирования на различных этапах разведки полезных ископаемых.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.В., Петров В.А., Полуэктов В.В.* Мезозойские кислые магматиты юго-восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 76–104.
<https://doi.org/10.31857/S0016777020010013>
- Ищукова Л.П., Игошин Ю.А., Авдеев Б.В., Губкин Г.Н., Филипенко Ю.А., Попова А.И., Рогова В.П., Макушин М.Ф., Хоментовский Б.Н., Спиринов Э.К.* Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля / Под ред. Ищуковой Л.П., Наумовой С.С. М.: ЗАО “Геоинформмарк”. 1998. 529 с.
- Кирсанов А.А., Липияйнен К.Л., Смирнов М.Ю.* Выявление площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе результатов обработки аэро- и космических гиперспектральных данных // Региональная геология и металлогения. 2019. № 78. С. 82–90.
- Новикова М.С.* Экономико-географические особенности освоения юго-восточных районов Забайкальского края / Под ред. В.Ф. Задорожного. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2014. 161 с.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В.* Тектономагматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445–469.
<https://doi.org/10.1134/S1075701517060034>
- Сахновский М.Л., Бороздин А.П., Виноградов Л.А.* Методические рекомендации по организации и проведению геолого-минералогического картирования масштабов 1 : 500 000 и 1 : 200 000. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 280 с.
- Смирнова И.О., Кирсанов А.А., Камышишникова Н.В.* Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 9–27.
- Шивохин Е.А., Озерский А.Ф., Артамонова Н.А., Духовский А.А., Карасев В.В., Куриленко А.В., Надеждина Т.Н., Павленко Ю.В., Раутина Н.И., Шор Г.М.* Объяснительная записка: Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист М–50 (Борзя). СПб.: Издательство картофабрика ВСЕГЕИ, 2010. 553 с.
- Acharya T., Yang I.* Exploring Landsat 8 // Int. J. Eng. Appl. Sci. 2015. № 4(4). P. 4–10.
- Adiri Z., Harti A.El., Jellouli A., Maacha L., Azmi, Zouhair M., Bachaoui M.* Mineralogical mapping using Landsat-8 OLI, Terra ASTER and Sentinel-2A multispectral data in Sidi Flah Bouskour inlier, Moroccan Anti-Atlas // J. Spat. Sci. 2019. № 65. P. 147–171.
<https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1490213>
- Amer R., Kusky T., Ghulam A.* Lithological mapping in the Central Eastern Desert of Egypt using ASTER data // J. Afr. Earth Sci. 2010. № 56(2). P. 75–82.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.06.004>

- Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C.* MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN. U.S.C. Geophys. Lab. tech. rep. 1989. № 89(122). P. 44.
- Bishta A.* Lithologic Discrimination Using Selective Image Processing Technique of Landsat 7 Data, Um Bogma Environs Westcentral Sinai, Egypt // J. King Abdulaziz Univ. Mar. Sci. 2009. № 20(1). P. 193–213.
<https://doi.org/10.4197/Ear.20-1.10>
- Bonham-Carter, G.F.* Geographic information systems for geoscientists. Modeling with GIS. Pergamon. Elsevier. 1994. P. 402.
- Carranza E.J.M.* Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Amsterdam. Elsevier. 2008. P. 347.
[https://doi.org/10.1016/s0168-6275\(08\)x0001-7](https://doi.org/10.1016/s0168-6275(08)x0001-7)
- Clark R.N., Swayze G.A.* Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: The USGS Tricorder Algorithm // Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. CO: U.S. Geological Survey. 1995. P. 39–40.
- Chukwu G.U., Ijeh B.I., Olunwa K.C.* Application of Landsat imagery for Landuse/Landcover analyses in the Afikpo sub-basin of Nigeria // Int. Res. J. Geol. Min. 2013. № 3(2). P. 67–81.
- Colby J.D.* Topographic normalization in rugged terrain // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. № 57(5). P. 531–537.
- Cooley T., Anderson G.P., Felde G.W., Hoke M.L., Ratkowski A.J., Chetwynd J.H., Gardner J.A., Adler-Golden S.M., Matthew M.W., Berk A., Bernstein L., Acharya P.K., Miller D., Lewis P.* FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation // Int. Geosci. Remote Sens. Symp. 2002. № 3. P. 1414–1418.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026134>
- Comon P.* Independent component analysis, A new concept // Signal Process. 1994. № 36(3). P. 287–314.
[https://doi.org/10.1016/0165-1684\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0165-1684(94)90029-9)
- Corumluoglu O., Vural A., Asri I.* Determination of Kula basalts (geosite) in Turkey using remote sensing techniques // Arab. J. Geosci. 2015. № 8(11). P. 10105–10117.
<https://doi.org/10.1007/s12517-015-1914-4>
- Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sens. Environ. 1996. № 58(3). P. 257–266.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gabr S., Ghulam A., Kusky T.* Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data // Ore Geol. Rev. 2010. № 38. P. 59–69.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.007>
- Ghanbari Y., Hezarkhani A., Ataei M., Pazand K.* Mineral potential mapping with fuzzy models in the Kerman-Kashmar Tectonic Zone, Central Iran // Appl. Geomat. 2012. № 4. P. 173–186.
<https://doi.org/10.1007/s12518-012-0090-4>
- Green A.A., Berman M., Craig M.D.* A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1988. № 26(1). p. 65–74.
<https://doi.org/10.1109/36.3001>
- Hunt G.R., Ashley R.P.* Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared // Econ Geol. 1979. № 74(7). P. 1613–1629.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.7.1613>
- Inzana J., Kusky T., Higgs G., Tucker R.* Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar // J. Afr. Earth Sci. 2003. № 37(1–2). P. 59–72.
[https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00071-X)
- Irons J.R., Dwyer J.L., Barsi J.A.* 2012. The next Landsat satellite; the Landsat Data Continuity Mission // Remote Sens. Environ. 2012. № 122. p. 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026>
- Kim Y.H., Choe K.U., Ri R.K.* Application of fuzzy logic and geometric average: A Cu sulfide deposits potential mapping case study from Kapsan Basin, DPR Korea // Ore Geol. Rev. 2019. № 107. P. 239–247.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.026>
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // In Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. 10–14 December 1973. Washington, USA, 1973. P. 309–317.
- Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T.; Barloon P.J., Goetz A.F.H.* The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data // Remote Sens. Environ. 1993. № 44. P. 145–163.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)
- Lawrence R.C., Mars J.C., Simpson C.J.* Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) // Remote Sens. Environ. 2005. № 99. P. 105–126.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.021>
- Loughlin W.P.* Principal component analysis for alteration mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. № 9. P. 1163–1169.
- Mars J.C., Rowan L.C.* ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Khanneshin carbonate volcano, Afghanistan // Geosphere. 2011. № 7. P. 276–289.
<https://doi.org/10.1130/GES00630.1>
- Mwaniki M.W., Matthias M.S.M., Schellmann G.* Application of remote sensing technologies to map the structural geology of central Region of Kenya // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2015. № 8(4). P. 1855–1867.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2395094>
- Novák V., Perfilieva I., Mockor J.* Mathematical Principles of Fuzzy Logic. New York. Kluwer Academic Publishers. 1999. P. 320.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5217-8>
- Ourhizif Z., Algouti A.* Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Aster multispectral data in Imini-Ounilla district South high Atlas of Marrakech. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2019. XLII-2/W13. P. 1255–1262.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1255-2019>
- Pour B.A., Hashim M.* Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining dis-

- trict, south-eastern Islamic Republic of Iran // *J. Taibah Univ. Sci.* 2015. № 9(2). P. 155–166.
<https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.11.008>
- Pour A.B., Hashim M., Park Y., Hong J.K.* Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data // *Geocarto Int.* 2018a. № 33(12). P. 1281–1306.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1347207>
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., Hong J.K., Hashim M., Woo J. Ayoobi I.* Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // *Polar Sci.* 2018b. № 16. P. 23–46.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004>
- Rajendran S., Nasir S.* ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman // *Ore Geol. Rev.* 2019. № 108. P. 33–53.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.014>
- Richards, J.A., Xiuping J.* Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Germany: Berlin. Springer. 2006. p. 440.
- Rockwell, B.W., Hofstra, A.H.* Identification of quartz and carbonate minerals across Northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data, implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas // *Geosphere.* 2008. № 4. P. 218–246.
<https://doi.org/10.1130/GES00126.1>
- Ruiz-Armenta J.R., Prol-Ledesma R.M.* Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico // *Int. J. Remote Sens.* 1998. № 19(10). P. 1981–2000.
<https://doi.org/10.1080/014311698215108>
- Sabins, F.F.* Remote Sensing: Principles and Applications. Long Grove. Waveland Press. 2007.
- Sekandari M., Masoumi I., Pour A.B.* Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 Spectral Imagery for Exploration of Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits in the Central Iranian Terrane (CIT) // *Remote Sens.* 2020. № 12(8). P. 1239.
<https://doi.org/10.3390/rs12081239>
- Wambo J.D.T., Pour A.B., Sylvestre Gannon S., Asimow, P.D., Zoheir, B., Rodrigo dos ReisSalles, Nzenti J.P., Pradhan B., Muslim A.M.* Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon // *Ore Geol. Rev.* 2020. № 122. P. 103530.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103530>
- Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Inf. Control.* 1965. № 8(3). P. 338–353.
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Territory Suitability Assessment for Conducting Detailed Geological and Mineralogical Mapping Based on Statistical Methods of Remote Sensing Data Processing Landsat-8: A Case Study in the Southeastern Transbaikalia, Russia

I. O. Nafigin¹, V. T. Ishmuhametova¹, S. A. Ustinov¹, V. A. Minaev¹, and V. A. Petrov¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, Moscow, Russia*

The work considers the suitability of using multispectral satellite remote sensing data Landsat-8 for conducting regional geological and mineralogical mapping of the territory of south-eastern Transbaikalia (Russia) in conditions of medium- low-mountain relief and continental climate. The territory was chosen as the object of study due to its diverse metallogenic specialization (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, fluorite). Diversity in composition and age of ore-bearing massifs of intrusive, volcanogenic and sedimentary rocks are also of interest. Statistical processing algorithms to increase spectral information content of satellite data Landsat-8 were used; they include: principal component analysis (PCA); minimum noise fraction (MNF) and independent component analysis (ICA). Eigenvector matrices analysed on the basis of statistical processing results and two-dimensional correlation graphs were built to compare thematic layers with geological material classes: oxide/hydroxide group minerals containing transition iron ions (Fe^{3+} and $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$); a group of clay minerals containing Al–OH and Fe, Mg–OH; minerals containing Fe^{2+} and vegetation cover. Pseudo-coloured RGB composites representing the distribution and multiplication of geological materials classes was generated and interpreted. Integration of informative thematic layers with using fuzzy logic model was carried out to construct a prospectivity map. Received map was compared with geological information, and positive conclusions about territory suitability for further remote mapping research of hydrothermally altered zones and hypergenesis products in order to localize areas promising for identifying hydrothermal-metasomatic mineralization were made.

Keywords: geological mapping, mineralogical mapping, principal component method (PCA), minimum noise content (MNF), independent component analysis (ICA), statistical methods, remote sensing, hydrothermal mineralization, altered rocks, prospectivity map

REFERENCES

- Andreeva O.V., Petrov V.A., Poluektov V.V.* Mezozoiskie kislye magmatity yugo-vostochnogo Zabaikal'ya: petrogeokhimiya, svyaz' s metasomatizmom i rudobrazovaniem [Mesozoic felsic magmatites of southeastern Transbaikalia: petrogeochemistry, connection with metasomatism and ore formation] // *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2020. T. 62. № 1. P. 76–104. (In Russian).
https://doi.org/10.31857/S0016777020010013.
- Ishchukova L.P., Igoshin Yu.A., Avdeev B.V., Gubkin G.N., Filipchenko Yu.A., Popova A.I., Rogova V.P., Makushin M.F., Khomentovskii B.N., Spirin E.K.* Geologiya Urulyunguevskogo rudnogo raiona i molibden-uranovykh mestorozhdenii Strel'tsovskogo rudnogo polya [Geology of the Urulyunguevsky ore region and molybdenum-uranium deposits of the Strel'tsovsky ore field] / Pod red. Ishchukovoi L.P., Naumovoi S.S. M.: ZAO "Geoinformmark". 1998. P. 529. (In Russian).
- Kirsanov A.A., Lipiyainen K.L., Smirnov M.Yu.* Vyyavlenie ploshchadei, perspektivnykh na zolotoe orudnenie, na osnove rezul'tatov obrabotki aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannyykh [Identification of areas perspective for gold mineralization based on results of airborne and satellite hyperspectral data processing] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2019. № 78. P. 82–90. (In Russian).
- Novikova M.S.* Ekonomiko-geograficheskie osobennosti osvoeniya yugo-vostochnykh raionov Zabaikal'skogo kraya [Economic and geographical features of the development of the south-eastern regions of the Trans-Baikal Territory] / Pod red. V.F. Zadorozhno. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo "Geo", 2014. P. 161. (In Russian)
- Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V.* Tektonomagmaticheskie tsikly i geodinamicheskie obstanovki formirovaniya rudonosnykh sistem Yuzhnogo Priargun'ya [Tectonomagmatic cycles and geodynamic settings for the formation of ore-bearing systems in the Southern Argun region] // *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2017. T. 59. № 6. P. 445–469. (In Russian).
https://doi.org/10.1134/S1075701517060034
- Sakhnovskii M.L., Borozdin A.P., Vinogradov L.A.* Metodicheskie rekomendatsii po organizatsii i provedeniyu geologo-mineragenicheskogo kartirovaniya masshtabov 1 : 500000; 1 : 200000 [Guidelines for organizing and evaluating geological and mineralogical mapping at scales of 1 : 500000 and 1 : 200000]. SPb.: Izd-vo VSEGEI, 2009. P. 280. (In Russian).
- Smirnova I.O., Kirsanov A.A., Kamyshnikova N.V.* Obzor zarubezhnykh dostizhenii za poslednie pyat' let v oblasti ispol'zovaniya mul'ti- i giperspektral'nykh sputnikovykh dannyykh i sovremennykh metodov ikh obrabotki v geologicheskikh issledovaniyakh [A review of the past 5 years of international advances in multi- and hyperspectral satellite data application and processing techniques in geological research] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. T. 17. № 1. P. 9–27. (In Russian).
- Shivokhin E.A., Ozerskii A.F., Artamonova N.A., Dukhovskii A.A., Karasev V.V., Kurilenko A.V., Nadezhkina T.N., Pavlenko Yu.V., Raitina N.I., Shor G.M.* Ob'yasnitel'naya zapiska: Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie) [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation)]. List M–50 (Borzya). SPb.: Izdatel'stvo kartofabrik VSEGEI, 2010. P. 553. (In Russian).
- Acharya T., Yang I.* Exploring Landsat 8 // *Int. J. Eng. Appl. Sci.* 2015. № 4(4). pp.4–10.
- Adiri Z., Harti A.El., Jellouli A., Maacha L., Azmi, Zouhair M., Bachaoui M.* Mineralogical mapping using Landsat-8 OLI, Terra ASTER and Sentinel-2A multispectral data in Sidi Flah Bouskour inlier, Moroccan Anti-Atlas // *J. Spat. Sci.* 2019. № 65. P. 147–171.
https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1490213
- Amer R., Kusky T., Ghulam, A.* Lithological mapping in the Central Eastern Desert of Egypt using ASTER data // *J. Afr. Earth Sci.* 2010. № 56(2). P. 75–82.
https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.06.004
- Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C.* MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN. U.S.C. Geophys. Lab. tech. rep. 1989. № 89(122). P. 44.
- Bishta A.* Lithologic Discrimination Using Selective Image Processing Technique of Landsat 7 Data, Um Bogma Environs Westcentral Sinai, Egypt // *J. King Abdulaziz Univ. Mar. Sci.* 2009. № 20(1). P. 193–213.
https://doi.org/10.4197/Ear.20-1.10
- Bonham-Carter G.F.* Geographic information systems for geoscientists. Modeling with GIS. Pergamon. Elsevier. 1994. P. 402.
- Carranza E.J.M.* Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Amsterdam. Elsevier. 2008. P. 347.
https://doi.org/10.1016/s0168-6275(08)x0001-7
- Clark R.N., Swayze G.A.* Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: The USGS Tricorder Algorithm // *Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*. CO: U.S. Geological Survey. 1995. P. 39–40.
- Chukwu G.U., Ijeh B.I., Olunwa K.C.* Application of Landsat imagery for Landuse/Landcover analyses in the Afikpo sub-basin of Nigeria // *Int. Res. J. Geol. Min.* 2013. № 3(2). P. 67–81.
- Colby J.D.* Topographic normalization in rugged terrain // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. № 57(5). P. 531–537.
- Cooley T., Anderson G.P., Felde G.W., Hoke M.L., Ratkowski A.J., Chetwynd J.H., Gardner J.A., Adler-Golden S.M., Matthew M.W., Berk A., Bernstein L., Acharya P.K., Miller D., Lewis P.* FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation // *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 2002. № 3. P. 1414–1418.
https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026134
- Comon P.* Independent component analysis, A new concept // *Signal Process.* 1994. № 36(3). P. 287–314.
https://doi.org/10.1016/0165-1684(94)90029-9
- Corumluoglu O., Vural A., Asri I.* Determination of Kula basalts (geosite) in Turkey using remote sensing techniques // *Arab. J. Geosci.* 2015. № 8(11). P. 10105–10117.
https://doi.org/10.1007/s12517-015-1914-4
- Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sens. Environ.* 1996. № 58(3). P. 257–266.
https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- Gabr S., Ghulam A., Kusky T.* Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data // *Ore Geol.*

- Rev. 2010. № 38. P. 59–69.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.007>
- Ghanbari Y., Hezarkhani A., Ataei M., Pazand K.* Mineral potential mapping with fuzzy models in the Kerman-Kashmar Tectonic Zone, Central Iran // *Appl. Geomat.* 2012. № 4. P. 173–186.
<https://doi.org/10.1007/s12518-012-0090-4>
- Green A.A., Berman M., Craig M.D.* A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1988. № 26(1). P. 65–74.
<https://doi.org/10.1109/36.3001>
- Hunt G.R., Ashley R.P.* Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared // *Econ Geol.* 1979. № 74(7). P. 1613–1629.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.7.1613>
- Inzana J., Kusky T., Higgs G., Tucker R.* Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar // *J. Afr. Earth Sci.* 2003. № 37(1–2). P. 59–72.
[https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00071-X)
- Irons J.R., Dwyer J.L., Barsi J.A.,* 2012. The next Landsat satellite; the Landsat Data Continuity Mission // *Remote Sens. Environ.* 2012. № 122. P. 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026>
- Kim Y.H., Choe K.U., Ri R.K.* Application of fuzzy logic and geometric average: A Cu sulfide deposits potential mapping case study from Kapsan Basin, DPR Korea // *Ore Geol. Rev.* 2019. № 107. P. 239–247.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.026>
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.* 10–14 December 1973. Washington, USA, 1973. P. 309–317.
- Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon P.J., Goetz A.F.H.* The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data // *Remote Sens. Environ.* 1993. № 44. P. 145–163.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)
- Lawrence R.C., Mars J.C., Simpson C.J.* Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) // *Remote Sens. Environ.* 2005. № 99. P. 105–126.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.021>
- Loughlin W.P.* Principal component analysis for alteration mapping // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. № 9. P. 1163–1169.
- Mars J.C., Rowan L.C.* ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Khanneshin carbonate volcano, Afghanistan // *Geosphere.* 2011. № 7. P. 276–289.
<https://doi.org/10.1130/GES00630.1>
- Mwaniki, M.W., Matthias, M.S.M., Schellmann, G.* Application of remote sensing technologies to map the structural geology of central Region of Kenya // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2015. № 8(4). P. 1855–1867.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2395094>
- Novák V., Perfilieva I., Mockor J.* *Mathematical Principles of Fuzzy Logic.* New York. Kluwer Academic Publishers. 1999. P. 320.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5217-8>
- Ourhizif Z., Algouti A.* Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Aster multispectral data in Imini-Ounilla district South high Atlas of Marrakech. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019. XLII-2/W13. P. 1255–1262.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1255-2019>
- Pour B.A., Hashim M.* Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran // *J. Taibah Univ. Sci.* 2015. № 9(2). P. 155–166.
<https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.11.008>
- Pour A.B., Hashim M., Park Y., Hong J.K.* Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data // *Geocarto Int.* 2018a. № 33(12). P. 1281–1306.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1347207>
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., Hong J.K., Hashim M., Woo J. Ayoobi I.* Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // *Polar Sci.* 2018b. № 16. P. 23–46.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004>
- Rajendran S., Nasir S.* ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman // *Ore Geol. Rev.* 2019. № 108. P. 33–53.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.014>
- Richards J.A., Xiuping J.* *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction.* Germany: Berlin. Springer. 2006. P. 440.
- Rockwell B.W., Hofstra A.H.* Identification of quartz and carbonate minerals across Northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data, implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas // *Geosphere.* 2008. № 4. P. 218–246.
<https://doi.org/10.1130/GES00126.1>
- Ruiz-Armenta J.R., Prol-Ledesma R.M.* Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico // *Int. J. Remote Sens.* 1998. № 19(10). P. 1981–2000.
<https://doi.org/10.1080/014311698215108>
- Sabins F.F.* *Remote Sensing: Principles and Applications.* Long Grove. Waveland Press. 2007.
- Sekandari M., Masoumi I., Pour A.B.* Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 Spectral Imagery for Exploration of Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits in the Central Iranian Terrane (CIT) // *Remote Sens.* 2020. № 12(8). P. 1239.
<https://doi.org/10.3390/rs12081239>
- Wambo J.D.T., Pour A.B., Sylvestre Gannon S., Asimow P.D., Zohair B., Rodrigo dos Reis Salles, Nzenti J.P., Pradhan B., Muslim A.M.* Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon // *Ore Geol. Rev.* 2020. № 122. P. 103530.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103530>
- Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Inf. Control.* 1965. № 8(3). P. 338–353.
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ПО УХОДЯЩЕМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ЗЕМЛИ

© 2023 г. С. А. Шишигин*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: ssa@iao.ru

Поступила в редакцию 05.07.2022 г.

Рассмотрена модель атмосферы в виде последовательности однородных слоев толщиной 100 метров от поверхности Земли до высоты 40 километров. Параметры слоев определены для стандартной атмосферы. Выбраны спектральные участки $1002\text{--}1003$ и $1020\text{--}1021\text{ см}^{-1}$ с противоположной зависимостью коэффициента поглощения озона от изменения его температуры. Данная модель трансформировалась в один эффективный однородный слой. Вклад в уходящее излучение атмосферы в выбранных спектральных участках полосы поглощения озона ($1002\text{--}1003$ и $1020\text{--}1021\text{ см}^{-1}$) равен вкладам в уходящее излучение Земли всеми неоднородными слоями, их составляющими. Показана возможность корректировки температуры подстилающей поверхности Земли. Рассмотрена методика расчета содержания озона в атмосфере по уходящему излучению Земли.

Ключевые слова: атмосфера, слой, озон, температура, ИК излучение, спектр, метод

DOI: 10.31857/S0205961423010104, EDN: MNMFZE

ВВЕДЕНИЕ

Озон в атмосфере полностью поглощает жесткое УФ излучение Солнца с длиной волны менее 280 нм, значительно ослабляя его действие на клетки живых организмов, и определяет ультрафиолетовый климат на планете. Мониторинг состояния озонового слоя, исследования возможного влияния на него антропогенного воздействия являются актуальными в настоящее время (Александров и др., 1992), (Крученицкий, Статников, 2020).

Основным методом измерения с земной поверхности общего содержания озона в атмосфере является квазимонохроматический метод в спектральном участке 290–370 нм. Погрешность спектрофотометра Добсона и озонметра М-83 может достигать 10% и более (Ромашкина, 1984).

В тропосфере содержание озона очень мало, изменчиво во времени и по высоте (Белан, 2010), (Звягинцев и др., 2016). Известно, что максимальная плотность озона наблюдается на высоте 18–26 км, которая уменьшается с ростом широты. Сезонные и широтные колебания содержания озона происходят в основном в слое атмосферы 0–25 км. Наблюдаются также заметные суточные колебания суммарного озона в атмосфере (Александров и др., 1982), (Седунов и др., 1991).

Информацию о содержании озона в атмосфере получают также на основе существующих методик восстановления атмосферного озона по данным измерений уходящего инфракрасного

излучения из атмосферы спутниковыми радиометрами.

Существующие методики восстановления атмосферного озона по данным измерений современных ИК-зондировщиков показывают, что при определении общего содержания озона достигается точность порядка 3–10% в зависимости от широты, сезона, состояния атмосферы (Тимофеев и др., 2021). Основные трудности и ограничения детектирования озона по результатам измерений спутниковых ИК-зондировщиков связаны с влиянием вариации температуры подстилающей поверхности и вертикального профиля атмосферы, наличием аэрозольных слоев в поле зрения радиометра и его спектральным разрешением регистрации уходящего излучения Земли (Успенский и др., 2005), (Кашкин и др., 2015).

Разрешение спутниковых приборов для наземного зондирования (AIRS, IASI, IMG, TANSO-FTS, ИКФС-2) лежат в пределах $\sim 0.2\text{--}0.6\text{ см}^{-1}$. Повышение точности контроля содержания озонового слоя требует развития и совершенствование физико-математических моделей атмосферы и алгоритмов обработки дистанционных измерений (Фалалеева, Фомин, 2016).

Корреляционный радиометр по сравнению с другими приборами газоанализа имеет сверхвысокое спектральное разрешение регистрируемого излучения из-за использования фильтра в виде кюветы с исследуемым газом (Шишигин, 2017). Устраняется в регистрируемом сигнале радио-

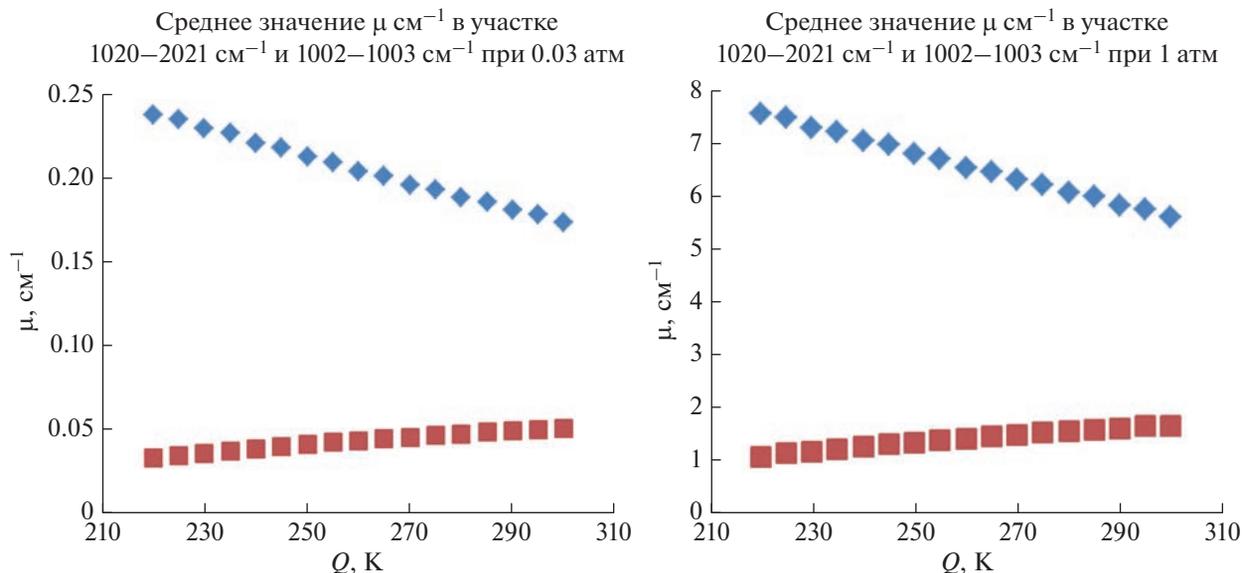


Рис. 1. Зависимость средних значений коэффициента поглощения озона от температуры.

метра неселективное взаимодействие излучения со средой. (Виролайнен, Поляков, 2004). Обработка сигналов регистрации уходящего излучения в единичных спектральных участках радиометрами осложняется неоднородностью атмосферы.

В статье рассмотрена методика корректировки температуры подстилающей поверхности Земли и состояния озонового слоя в безоблачной атмосфере. Проведены модельные расчеты содержания озона в воздухе с помощью варьирования эффективной температуры всей толщи атмосферы.

ВЫБОР СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОМЕТРОМ

В участке спектра 990–1025 см^{-1} полосы поглощения O_3 наблюдается минимальное присутствие линий поглощения только молекул H_2O и CO_2 , слабо влияющих на ослабление уходящего излучения Земли. Рассматривается возможность определения общего содержания озона по уходящему излучению атмосферы одновременно в двух спектральных участках с противоположной зависимостью коэффициента поглощения излучения исследуемого газа от изменения его температуры.

На рис. 1 приведены зависимости средних значений молекулярных коэффициентов поглощения озона в спектральных участках 1020–1021 см^{-1} (верхняя линия) и 1002–1003 см^{-1} (нижняя линия) при давлениях 1 и 0.03 атм от температуры. Изменение среднего значения молекулярного коэффициента поглощения озона пропорционально изменению температуры:

$$\Delta\mu \approx \mu(Q_2 - Q_1) = \mu\Delta Q. \quad (1)$$

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

Уходящее излучение атмосферы S в дальнем инфракрасном участке $\Delta\nu$ для неоднородной атмосферы представим в виде суммы светимостей поверхности Земли и усредненных по спектру (треугольные скобки) горизонтальных однородных слоев:

$$\langle S \rangle \approx \Delta\nu \left(P_3 \left\langle \prod_{k=1}^n T_k \right\rangle + \sum_{k=1}^n B_k \left\langle (1 - T_k) \prod_{i=k+1}^n T_i \right\rangle \right), \quad (2)$$

где P_3 – светимость поверхности земли, B – среднее значение светимости абсолютно черного тела в спектральном участке $\Delta\nu$. T_k – спектральная плотность пропускания излучения k элементарным слоем атмосферы в участке $\Delta\nu$. Солнечной радиацией в дальней инфракрасной области спектра пренебрегаем. Аэрозольное ослабление излучения в дальней ИК области спектра для слабо замутненной атмосферы незначительно и его не учитываем (Зуев, 1970).

Количество однородных слоев можно значительно уменьшить последовательным объединением двух соседних слоев в один при условии, что вклад в мощность уходящего излучения атмосферы в исследуемом спектральном участке равен вкладам в мощность уходящего излучения Земли неоднородными слоями, их составляющими (Шишигин, 2017).

Рассмотрена модель атмосферы в виде последовательности однородных 100 метровых слоев до

Таблица 1. Параметры модели атмосферы

H , км	T , К	P , атм	O_2 , %	N_2 , %	CH_4 , $10^{-4}\%$	CO_2 , $10^{-4}\%$	CO , $10^{-4}\%$	N_2O , $10^{-4}\%$	O_3 , $10^{-4}\%$	H_2O , $10^{-4}\%$	N , cm^{-3} 10^{-19}
0	288	1	21	78	1.6	370	0.250	0.420	0.027	7730	2.550
1	282	0.891	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.026	6800	2.300
2	275	0.787	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.024	5000	2.100
3	269	0.694	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.024	3700	1.900
4	263	0.611	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.027	2600	1.700
5	256	0.535	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.027	1800	1.530
6	249	0.467	21	78	1.6	370	0.200	0.400	0.029	1000	1.370
7	243	0.407	21	78	1.6	370	0.180	0.400	0.033	500	1.230
8	236	0.353	21	78	1.6	370	0.150	0.400	0.041	240	1.100
9	230	0.305	21	78	1.6	370	0.120	0.400	0.052	50	0.970
10	223	0.262	21	78	1.5	370	0.100	0.400	0.070	10	0.860
12	217	0.192	21	78	1.45	370	0.080	0.400	0.123	8	0.650
14	217	0.141	21	78	1.40	370	0.060	0.400	0.213	7	0.470
16	217	0.103	21	78	1.32	370	0.050	0.400	0.857	6	0.350
18	217	0.075	21	78	1.25	370	0.008	0.400	2	4.50	0.250
20	217	0.055	21	78	1.20	370	0.005	0.400	3.333	4.00	0.180
22	219	0.040	21	78	1.10	370	0.005	0.350	4.286	4.20	0.140
24	221	0.029	21	78	1.00	370	0.005	0.300	5	4.40	0.100
26	223	0.022	21	78	0.90	370	0.005	0.200	5.714	4.50	0.070
28	225	0.016	21	78	0.80	370	0.005	0.150	6	4.60	0.050
30	227	0.012	21	78	0.70	370	0.005	0.100	4.444	4.70	0.045
32	229	0.009	21	78	0.65	370	0.007	0.080	3.750	4.80	0.040
34	235	0.008	21	78	0.60	370	0.008	0.070	3.714	5.00	0.035
36	245	0.007	21	78	0.58	370	0.010	0.060	3.333	6.00	0.030
38	255	0.006	21	78	0.53	370	0.020	0.050	2.917	6.50	0.024
40	265	0.003	21	78	0.50	370	0.030	0.040	3.333	7.00	0.012

высоты 40 километров. Параметры слоев определены для стандартной атмосферы (табл. 1).

При расчетах коэффициентов поглощения, спектров ослабления ИК излучения атмосферными газами использовалась информационная система "СПЕКТРА" ИОА СО РАН (Михайленко и др. 2005). Спектральное разрешение составляло 0.001 см^{-1} .

Используемая модель атмосферы преобразована в виде одного эффективного однородного слоя 1–40 км, и последовательности эффективных однородных слоев 1–15, 16–17, 18–19, 20–21, 22–23, 24–25, 26–27, 28–29, 30–31, 32–33, 34–35, 36–40 км, без изменения мощности уходящего излучения атмосферы спектрального участка ($1002\text{--}1003 \text{ см}^{-1}$) и ($1020\text{--}1021 \text{ см}^{-1}$).

Погрешность задания профиля температуры атмосферы искажает истинное значение функции пропускания эффективного слоя атмосферы. Это приводит к значительной ошибке определения содержания исследуемого газа в атмосфере по уходящему излучению Земли.

Мощности уходящего излучения в узких спектральных участках $\Delta\nu_1$, $\Delta\nu_2$ для их соответствующих эффективных температур Q_{v1} и Q_{v2} однородного слоя атмосферы представим в виде:

$$\begin{cases} S_{1M} = \Delta\nu_1 (P_{31}(Q_3)T_1(Q_{v1}) + (1 - T_1(Q_{v1}))B_1(Q_{v1})) \\ S_{2M} = \Delta\nu_2 (P_{32}(Q_3)T_2(Q_{v2}) + (1 - T_2(Q_{v2}))B_2(Q_{v2})) \end{cases} \quad (3)$$

Средние значения функции пропускания T_1 , T_2 однородного слоя с концентрацией озона n и толщиной L в спектральных участках частот $\Delta\nu_1$, $\Delta\nu_2$, от изменения эффективных температур данного слоя равны:

$$\begin{cases} T_1 = \exp((-\mu_1 - \Delta\mu_1)nL) = T_1 \exp(-\tau_1\Delta Q_1) \\ T_2 = \exp((-\mu_2 - \Delta\mu_2)nL) = T_2 \exp(-\tau_2\Delta Q_2) \end{cases} \quad (4)$$

Зависимость мощности уходящего излучения от температуры воздуха и температуры поверхности Земли в рассматриваемой модели атмосферы можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{M1} = \Delta v_1 (P_{31}(Q_3) T_1 \exp(-\tau_1 K_1 \Delta Q_1) + \\ + (1 - T_1 \exp(-\tau_1 K_1 \Delta Q_1)) B_1(Q_1 + K_1 \Delta Q_1)) \\ S_{M2} = \Delta v_2 (P_{32}(Q_3) T_2 \exp(-\tau_2 K_1 \Delta Q_2) + \\ + (1 - T_2 \exp(-\tau_2 K_1 \Delta Q_2)) B_2(Q_2 + K_1 \Delta Q_2)) \end{array} \right. , \quad (5)$$

где

$$\tau_1 = \frac{1}{\Delta Q_1} \ln \left[\frac{\frac{1}{\Delta v_1} S_{M1} - B_1(Q_1 + \Delta Q_1)}{T_1 (P_{31}(Q_3) - B_1(Q_1 + \Delta Q_1))} \right], \quad (6)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{\Delta Q_2} \ln \left[\frac{\frac{1}{\Delta v_2} S_{M2} - B_2(Q_2 + \Delta Q_2)}{T_2 (P_{32}(Q_3) - B_2(Q_2 + \Delta Q_2))} \right],$$

K_1 дополнительный коэффициент, позволяющий варьировать эффективные температуры слоя для рассматриваемых спектральных участков. $K_1 = 1$ при определении ΔQ_1 , ΔQ_2 из расчетов уходящего излучения в каждом выбранном спектральном участке со стандартным вертикальным профилем температуры атмосферы (табл. 1) и с профилем уменьшенном на 2 градуса в каждом 100 метровом слое.

Изменение концентрации озона n в слое атмосферы на $\Delta n \ll n$ приводит к изменению пропускания слоя в δT раз и может быть записано в виде $\delta T = e^{-\mu \Delta n L} \approx 1 - \mu \Delta n L = 1 - \mu \Delta N$.

Изменение мощности уходящего излучения в спектральных участках Δv_1 , Δv_2 равно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta S_{M1} = \langle S_{M1} \rangle - \langle S_{v1\Delta n} \rangle \approx (P_{31} - B_1) T_1 \mu_1 \Delta N \Delta v_1 \\ \Delta S_{M2} = \langle S_{M2} \rangle - \langle S_{v2\Delta n} \rangle \approx (P_{32} - B_2) T_2 \mu_2 \Delta N \Delta v_2 \end{array} \right. . \quad (7)$$

Где $\langle S_{v1\Delta n} \rangle$, $\langle S_{v2\Delta n} \rangle$ усредненная по спектру светимость атмосферы в участке Δv_1 , Δv_2 при изменении концентрации газа в слое атмосферы на Δn .

Чувствительность величины мощности уходящего излучения к содержанию исследуемого газа в слое равна соответственно;

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = \Delta S_{M1} / \Delta N \\ C_2 = \Delta S_{M2} / \Delta N \end{array} \right. . \quad (8)$$

ΔS_{1M} , ΔS_{2M} изменение мощности уходящего излучения в исследуемых участках спектра полосы поглощения озона при увеличении содержания озона в эффективном модельном слое атмосферы на ΔN . Отличие содержания исследуемого газа в слое от модельного при мощности прошедшего слой излучения S_1 (1002–1003 см⁻¹), S_2 (1020–1021 см⁻¹), определяется из соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta N_1 = \Delta S_1 / C_1 = (S_{M1} - S_1) / C_1 \\ \Delta N_2 = \Delta S_2 / C_2 = (S_{M2} - S_2) / C_2 \end{array} \right. . \quad (9)$$

При решении обратной задачи излучательную способность подстилающей поверхности используют результаты моделирования поверхности (Успенский и др. 2021).

В дополнение к существующим физическим или статистическим алгоритмам “обращения” данных атмосферных зондировщиков (Тимофеев и др., 2021) рассматривается возможность определения эффективной температуры подстилающей поверхности Земли и уменьшения влияния неточности задания вертикального профиля температуры атмосферы при определении общего содержания озона.

Последовательность шагов при реализации предложенной методики оценки содержания озона в атмосфере состоит в выборе двух спектральных участков полосы поглощения озона с противоположной зависимостью коэффициентов поглощения излучения.

Представление выбранной модели атмосферы в виде однородного эффективного слоя для каждого спектрального участка с соответствующими параметрами среднего коэффициента пропускания, эффективной температуры данного слоя.

Рассчитываются мощности уходящего излучения Земли для рассматриваемой модели атмосферы при двух значениях содержания озона в воздухе и двух близких профилях температуры атмосферы и определяются коэффициенты C_1 , C_2 (8), а также τ_1 , τ_2 (6).

Используя экспериментально регистрируемые мощности уходящего излучения Земли в выбранных спектральных участках в безоблачной атмосфере, рассчитываются массивы возможных отличий содержания озона в воздухе от используемой модели ΔN_1 , ΔN_2 (9) при изменении эффективной температуры слоя атмосферы с помощью коэффициента K_1 (5) и вариаций температуры подстилающей поверхности, из которых определяется минимальная разность $|\Delta N_1 - \Delta N_2|$. Температуры подстилающей поверхности и однородного слоя атмосферы при данном условии соответствуют эффективной температуре Земли, температуре эффективного слоя.

Определяется взаимосвязь коэффициентов калибровки C_1 , C_2 в зависимости от возможных сценариев отклонения от модели содержания озона только в нижних или верхних слоях атмосферы.

Используя значения эффективных температур слоя всей атмосферы и поверхности Земли, полученных ранее, рассчитываются массивы возможных отличий содержания озона в воздухе от используемой модели ΔN_1 , ΔN_2 (9) во всем диапазоне изменений C_1 , C_2 .

Общее содержание озона в атмосфере N_a определяется из соотношения $N_a = N_m + (\Delta N_1 + \Delta N_2) / 2$ при минимальная разность $|\Delta N_1 - \Delta N_2|$, наблюдаемой при всех изменениях C_1 , C_2 . N_m - количество молекул озона в столбе воздуха модели атмосферы.

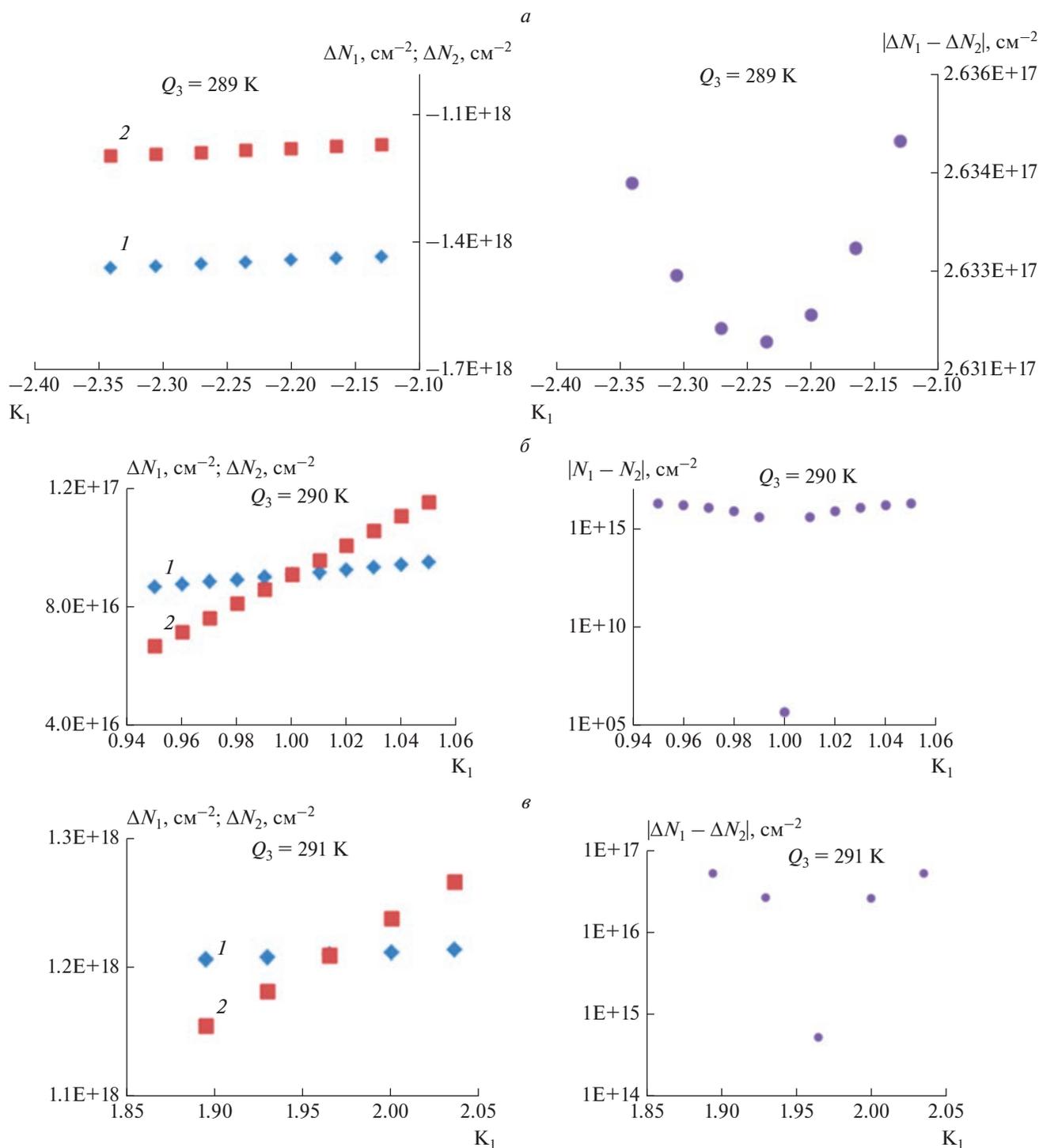


Рис. 2. Зависимость рассчитанных отклонений содержания озона по уходящему излучению в спектральных участках $1002\text{--}1003\text{ см}^{-1}$ (1), $1020\text{--}1021\text{ см}^{-1}$ (2) в атмосфере от модельного при их минимальной разницы и температурах поверхности Земли в алгоритме расчета 289 (а), 290 (б), 291 К (в).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Контроль количества озона в сложном эффективном слое атмосферы рассматривается в двух

спектральных участках с коэффициентами калибровки (8), при $\Delta N = \Delta N_0$, см^{-2} равной добавкам 1% озона в каждом 100 метровом слое атмосферы. $N_0 = 9.09 \times 10^{18}\text{ см}^{-2}$ — количество молекул

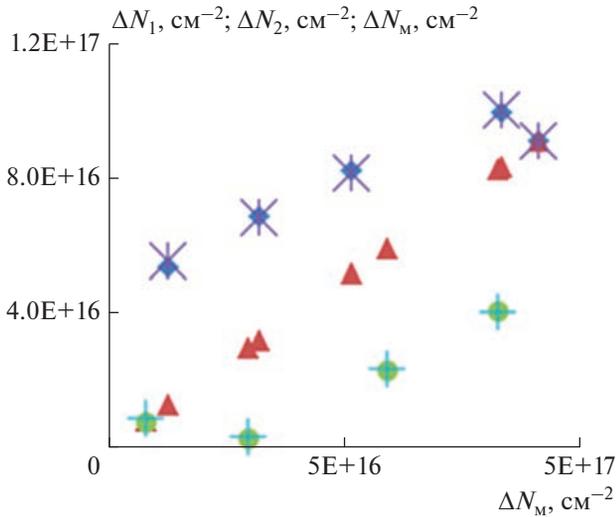


Рис. 3. Сравнение рассчитанных по уходящему излучению изменений содержания озона в атмосфере при увеличении его в нижних ΔN_1 (\blacklozenge), ΔN_2 (\times) и в верхних слоях ΔN_1 (\bullet), ΔN_2 ($+$) при $Q_3 = 290$ К с модельными ΔN_M (\blacktriangle).

озона в столбе воздуха до высоты 40 км в модели атмосферы.

Рассчитаны эталонные мощности уходящего излучения $S_{\text{Э}1}$ (1002–1003 см^{-1}), $S_{\text{Э}2}$ (1020–1021 см^{-1}) от поверхности Земли при температуре 290 К и суммарного излучения всех 100 метровых слоев модели атмосферы с 1% добавками. Для эталонных мощностей уходящего излучения $S_{\text{Э}1}$, $S_{\text{Э}2}$ получены зависимости отклонения содержания озона от содержания его в используемой модели атмосферы ΔN_1 , ΔN_2 , разницы $|\Delta N_1 - \Delta N_2|$ при изменении

ее эффективной температуры коэффициентом K_1 (с шагом 0.001) и температуры поверхности Земли Q_3 используя соотношение (9).

На рис. 2 приведены результаты модельных расчетов отклонения содержания озона в воздухе от используемой модели по уходящему излучению $S_{\text{Э}1} = 7.27 \times 10^{-6}$ Вт/см ср, $S_{\text{Э}2} = 4.97 \times 10^{-6}$ Вт/см ср. Кривые 1, 2 соответствуют зависимостям ΔN_1 , ΔN_2 , ($|\Delta N_1 - \Delta N_2|$) (справа) от изменения модельной температуры атмосферы.

Расчеты проведены также с парами эталонных мощностей $S_{\text{Э}H}$ (1002–1003 см^{-1}), $S_{\text{Э}B}$ (1020–1021 см^{-1}), полученных суммированием уходящего излучения Земли при температуре 290 К и излучения всех 100 метровых слоев модели атмосферы, но с добавками 1% озона поочередно только в нижних или верхних слоях. Нижние слои от поверхности Земли до 17, 21, 25, 33, 40 км, а верхние слои 34–40, 28–40, 22–40, 16–40 км. Слои выбраны в порядке увеличения добавки молекул озона.

Анализ зависимости аналогичных расчетов добавки содержания озона ΔN_1 , ΔN_2 от изменения озона только в некоторых выше приведенных слоях модели атмосферы ΔN_M с неизменными калибровочными коэффициентами C_1 , C_2 показал, что разность $\Delta N_1 - \Delta N_2$ в этих случаях минимальна также при совпадении температуры подстилающей поверхности в модельном и эталонном уходящем излучении, но значения ΔN_1 , ΔN_2 значительно отличаются от ΔN_M .

На рис. 3 показано сравнение рассчитанных по уходящему излучению ΔN_1 , ΔN_2 при увеличении озона в нижних или в верхних слоях модели на ΔN_M при $Q_3 = 290$ К. При отклонении содержания озона менее одного процента в рассматрива-

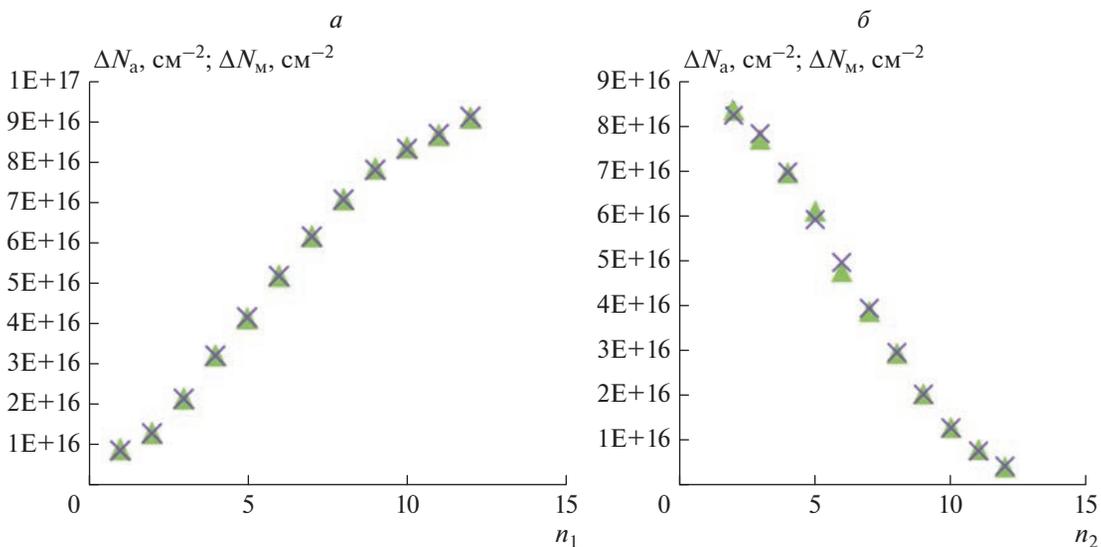


Рис. 4. Модельные и расчетные изменения содержания озона в воздухе при его увеличении в нижних (а) и в верхних (б) слоях атмосферы.

Таблица 2. Калибровка уходящего излучения Земли

n	$\Delta N_M \text{ см}^{-2}$ 1% в слое	$S_{M1} \text{ Вт/см ср}$ 1002–1003 см^{-2}	$S_{M2} \text{ Вт/см ср}$ 1020–1021 см^{-2}	$C_1 (\text{Вт/см ср})/\text{см}^{-2}$ 1002–1003 см^{-2}	$C_2 (\text{Вт/см ср})/\text{см}^{-2}$ 1020–1021 см^{-2}
	0	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}		
$n_2 = 1$	4.25×10^{15}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	-2.58×10^{-24}	-4.73×10^{-24}
$n_2 = 2$	7.84×10^{15}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	-1.19×10^{-24}	-2.47×10^{-24}
$n_2 = 3$	1.3×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	-5.16×10^{-25}	-1.35×10^{-24}
$n_2 = 4$	2.03×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	-1.74×10^{-25}	-6.76×10^{-25}
$n_2 = 5$	2.96×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	6.98×10^{-26}	-2.68×10^{-26}
$n_2 = 6$	3.94×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	2.20×10^{-25}	2.15×10^{-25}
$n_2 = 7$	4.96×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	3.34×10^{-25}	2.52×10^{-25}
$n_2 = 8$	5.89×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	4.09×10^{-25}	4.55×10^{-25}
$n_2 = 9$	6.97×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.91×10^{-6}	4.85×10^{-25}	6.44×10^{-25}
$n_2 = 10$	7.82×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.90×10^{-6}	5.46×10^{-25}	8.40×10^{-25}
$n_2 = 11$	8.24×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.90×10^{-6}	5.67×10^{-25}	9.49×10^{-25}
$n_1 = 1$	8.48×10^{15}	7.27×10^{-6}	4.90×10^{-6}	6.13×10^{-24}	6.26×10^{-24}
$n_1 = 2$	1.27×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.90×10^{-6}	4.41×10^{-24}	5.17×10^{-24}
$n_1 = 3$	2.12×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.90×10^{-6}	3.08×10^{-24}	4.09×10^{-24}
$n_1 = 4$	3.19×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.90×10^{-6}	2.34×10^{-24}	3.28×10^{-24}
$n_1 = 5$	4.13×10^{16}	7.27×10^{-6}	4.90×10^{-6}	2.00×10^{-24}	2.87×10^{-24}
$n_1 = 6$	5.15×10^{16}	7.26×10^{-6}	4.90×10^{-6}	1.75×10^{-24}	2.54×10^{-24}
$n_1 = 7$	6.13×10^{16}	7.26×10^{-6}	4.90×10^{-6}	1.45×10^{-24}	2.27×10^{-24}
$n_1 = 8$	7.06×10^{16}	7.26×10^{-6}	4.90×10^{-6}	1.45×10^{-24}	2.06×10^{-24}
$n_1 = 9$	7.79×10^{16}	7.26×10^{-6}	4.89×10^{-6}	1.36×10^{-24}	1.91×10^{-24}
$n_1 = 10$	8.31×10^{16}	7.26×10^{-6}	4.89×10^{-6}	1.30×10^{-24}	1.91×10^{-24}
$n_1 = 11$	8.66×10^{16}	7.26×10^{-6}	4.89×10^{-6}	1.27×10^{-24}	1.74×10^{-24}
$n_1 = 12$	9.09×10^{16}	7.26×10^{-6}	4.90×10^{-6}	1.08×10^{-24}	1.44×10^{-24}

емой модели атмосферы относительная ошибка определение общего содержания озона может достигать 0.5%.

Эффективная температура подстилающей поверхности Земли, соответствующая исследуемому уходящему излучению Земли, наблюдается при минимальной разности расчетных значений изменений содержания озона в атмосфере по уходящему излучению одновременно в двух спектральных участках с противоположной зависимостью коэффициента поглощения излучения исследуемого газа от изменения его температуры.

КОРРЕКТИРОВКА СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

Перераспределение озона внутри атмосферы приводит к изменению мощности уходящего излучения, соответственно, меняются калибровочные коэффициенты. Это приводит к значительной погрешности рассчитанного содержания озона в атмосфере даже при известной эффективной тем-

пературы подстилающей поверхности Земли (рис. 3).

Рассмотрены сценарии изменения коэффициентов калибровки при изменении содержания озона последовательно в нижних слоях атмосферы и соответственно в верхних слоях. В табл. 2 приведены значения добавок молекул озона в слой модельной атмосферы, мощности уходящего излучения Земли в спектральных участках 1002–1003, 1020–1021 и калибровочные коэффициенты C_1 , C_2 . n_1 – номера нижних слоев, в которые внесены добавки озона 1 – (1–15 км), 2 – (1–17 км.), 3 – (1–19 км), 4 – (1–21 км), 5 – (1–23 км), 6 – (1–25 км), 7 – (1–27 км), 8 – (1–29 км), 9 – (1–31 км), 10 – (1–33 км), 11 – (1–35 км), 12 – (1–40 км). n_2 – номера верхних слоев, в которые внесены добавки озона 12 – (36–40 км), 11 – (34–40 км), 10 – (32–40 км), 9 – (30–40 км), 8 – (28–40 км), 7 – (26–40 км), 6 – (24–40 км), 5 – (22–40 км), 4 – (20–40 км), 3 – (18–40 км), 2 – (16–40 км).

Взаимосвязь калибровочных коэффициентов в рассматриваемых спектральных диапазонах при из-

менении содержания озона последовательно в нижних слоях атмосферы более надежно описываются полиномом 6 степени с 4 знаками после запятой со средней ошибкой аппроксимации $\sim 0.0305\%$:

$$(C_2)_h = -a_1 C_1^6 + a_2 C_1^5 - a_3 C_1^4 + a_4 C_1^3 - a_5 C_1^2 + a_6 C_1 + a_7.$$

Изменения озона в верхних слоях описываются полиномом 6 степени с 4 знаками после запятой со средней ошибкой аппроксимации $\sim 0.0455\%$: $(C_2)_v = a_1 C_1^6 - a_2 C_1^5 + a_3 C_1^4 - a_4 C_1^3 + a_5 C_1^2 - a_6 C_1 + a_7$ (URL: planetcalc.ru, 2022).

Проведен расчет изменения содержания озона в атмосфере ΔN_a см⁻² от модельного при минимуме разности отклонения расчетных значений изменения содержания озона в атмосфере по уходящему излучению Земли S_{M1} , S_{M2} в спектральных участках 1002–1003 и 1020–1021 см⁻¹ с использованием аппроксимационной взаимосвязи калибровочных коэффициентов. Модельные ΔN_m и расчетные ΔN_a изменения содержания озона в атмосфере при его увеличении в нижних и верхних слоях атмосферы приведены на рис. 4.

Использование взаимосвязи калибровочных коэффициентов в рассматриваемых спектральных диапазонах приводит к повышению точности контроля состояния озонового слоя в атмосфере. Относительная погрешность определения общего содержания озона в модельных расчетах не превышает 0.025%

Проведенные исследования показывают возможность контролировать изменения озонового слоя атмосферы по данным измерений уходящего инфракрасного излучения из атмосферы спутниковыми радиометрами с уточнением эффективной температуры подстилающей поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбраны участки спектра 1002–1003, 1020–1021 см⁻¹ с противоположной зависимостью коэффициента поглощения излучения от изменения температуры газа для контроля озонового слоя Земли по уходящему излучению атмосферы. В спектральном интервале 990–1025 см⁻¹ наблюдается минимальное присутствие линий поглощения не измеряемых атмосферных газов.

Минимальное значение разности изменения содержания озона в атмосфере, рассчитанное по уходящему излучению Земли в каждом из двух спектральных участков при вариации температуры подстилающей поверхности и температуры эффективного слоя атмосферы, соответствует параметрам исследуемой атмосферы.

Результаты исследования могут быть использованы в качестве методики для обработки спектров уходящего излучения в полосах поглощения других парниковых газов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров Э.Л., Кароль И.Л., Ракитова Л.Р., Седунов Ю.С., Хргиан А.Х.* Атмосферный озон и изменения глобального климата. Л.: Гидрометеоздат. 1982. 167 с.
- Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х.* Озоновый щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеоздат. 1992. 288 с.
- Белан Б.Н.* Озон в атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2010. 488 с.
- Виролойнен Я.А., Поляков А.В.* Учет рассеяния излучения в наземных газо-корреляционных измерениях общего содержания метана. // Исследование Земли из космоса. 2004. № 4. С. 1–7.
- Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Никифорова М.П., Кузнецова И.Н., Варгин П.Н.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2016 г. // Метеорол. и гидролог. 2016. № 5. С. 124–130.
- Зуев В.Е.* Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М: Сов. радио. 1970. 496 с.
- Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Т.* Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: СФУ, 2015. 218 с
- Крученицкий Г.М., Статников К.А.* Сезонная и долговременная изменчивость зонально осредненных полей ОСО. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 01. С. 56–61.
- Михайленко С.Н., Бабиков Ю.Л., Головкин В.Ф.* Информационно-вычислительная система “Спектроскопия атмосферных газов”. Структура и основные функции. // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 09. С. 765–776.
- Ромашкина К.И.* Усовершенствованная методика градуировки озонметра М-83 по свету от зенита неба // Тр.ГГО. 1984. Вып. 472. С. 74–82.
- Седунов Ю.С., Авдюшин С.И., Борисенков Е.П., Волковицкий Н.Н., Петров Н.Н., Рейтенбах Р.Г., Смирнов В.И., Черников А.А.* Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеоздат, 1991. 509 с.
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поляков А.В., Виролойнен Я.А.* Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 71–79.
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н.* Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения. // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 18–33.
- Фалалеева В.А., Фомин Б.А.* Спектроскопические проблемы в прямых задачах спутникового зондирования атмосферы и пути их преодоления // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 733–738.
- Шишигин С.А.* Метод корреляционной спектроскопии для анализа спектра уходящего излучения атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 2. С. 134–138.
- Шишигин С.А.* Погрешность определения эффективной температуры слоев воздуха и подстилающей поверхности Земли в используемой модели атмосферы при расчетах содержания метана. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 09. С. 711–715.
- URL: planetcalc.ru/8731 (дата обращения: 20. 03.2022)

Model Calculations of Ozone Content in the Atmosphere by Earth's Outgoing Radiation

S. A. Shishigin

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

The model of the atmosphere in the form of a sequence of homogeneous layers 100 meters thick from the surface of the Earth to a height of 40 kilometers is considered. Layer parameters are defined for the standard atmosphere. Spectral sections 1002–1003 and 1020–1021 cm^{-1} with opposite dependence of ozone absorption coefficient on its temperature change are selected. This model was transformed into one efficient homogeneous layer. The contribution to the outgoing radiation of the atmosphere in the selected spectral regions of the ozone absorption band (1002–1003 and 1020–1021 cm^{-1}) is equal to the contributions to the outgoing radiation of the Earth by all non-uniform layers constituting them. The possibility of adjusting the temperature of the Earth's underlying surface is shown. The method of calculating the ozone content in the atmosphere by the outgoing radiation of the Earth is considered.

Keywords: atmosphere, layer, ozone, temperature, IR radiation, spectrum, method

REFERENCES

- Alexandrov E.L., Karol I.L., Rakipova L.R., Sedunov J.S., Hrgian A.H.* Atmosferniy ozon i izmeneniya global'nogo klimata [Atmospheric ozone and changes in the global climate]. L.: Hydrometeoizdat. 1982. 167 p. (In Russian).
- Alexandrov E.L., Israel J.A., Karol I.L., Hrgian A.H.* Ozonoviy schit Zemli i ego izmeneniya [Ozone shield of the Earth and its changes]. St. Petersburg: Hydrometeoizdat. 1992. 288 p. (In Russian).
- Belan B.N.* Ozon v atmosfere [Ozone in the atmosphere]. Tomsk: Publishing House of IOA SB RAS. 2010. 488 p. (In Russian).
- Virolainen Ya.A., Polyakov A.V.* Utset rasseyaniya izlutseniya v nazemnikh gazo-korrelyakhionnikh izmereniyah obschego soderzhaniya metana [Accounting for radiation scattering in terrestrial gas-correlation measurements of the total methane content // Earth exploration from space]. 2004. № 4. P. 1–7. (In Russian).
- Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Nikiforova M.P., Kuznetsova I.N., Vargin P.N.* Soderzhanie ozona nad territoriy Rossiyskoy Federakhii v pervom kvartale 2015 g. [Ozone content over the territory of the Russian Federation in the first quarter of 2016] // Meteorol. and hydrologist. 2016. № 5. P. 124–130. (In Russian).
- Zuev V.E.* Rasprostranenie vidimikh i infrakrasnikh voln v atmosfere [Propagation of visible and infrared waves in the atmosphere]. M: Soviet radio. 1970. 496 p. (In Russian).
- Kashkin V.B., Rubleva T.V., Khlebopros R.T.* Stratosferniy ozon: vid s kosmitseskoj orbitik [Stratospheric ozone: a view from space orbit]. Krasnoyarsk: SFU, 2015. 218 p. (In Russian).
- Kruchenitsky G.M., Statnikov K.A.* Sezonnaya i dolgovremennaya izmensivost' zonal'no osrednennikh poley OSO [Seasonal and long-term variability of zonal averaged fields of OCO] // Optics of the atmosphere and ocean. 2020. V. 33. № 01. P. 56–61. (In Russian).
- Mikhailenko S.N., Babikov Yu.L., Golovko V.F.* Informakhionno-viktsislitel'naya sistema "Spektroskopiya atmosfernih gazov." Struktura i osnovnie funkckhii. [Information and computer system "Spectroscopy of atmospheric gases." Structure and basic functions] // Optics of the atmosphere and ocean. 2005. V. 18. № 09. P. 765–776. (In Russian).
- Romashkina K.I.* Usovershenstvannaya metodika graduirovki ozonometra M-83 po svetu ot zenita neba [Improved method of calibrating the ozone meter M-83 by light from the zenith of the sky] // Tr. GGO. 1984. Iss. 472. P. 74–82. (In Russian).
- Sedunov Y.S., Avdyushin S.I., Borisenkov E.P., Volkovitsky N.N., Petrov N.N., Reitenbach R.G., Smirnov V.I., Chernikov A.A.* Atmosfera. Spravotsnik (spravotsnie dannie, modeli) [Atmosphere. Reference book (reference data, models)]. L.: Hydrometeoizdat, 1991. 509 p. (In Russian).
- Timofeev Yu.M., Nerobelov G.M., Polyakov A.V., Virolainen Ya.A.* Sputnikoviky monitoring ozonosferik [Satellite monitoring of the ozonosphere] // Meteorology and hydrology. 2021. № 12. P. 71–79. (In Russian).
- Uspensky A.B., Trotsenko A.N., Rublev A.N.* Problemi i perspektivi analiza i ispol'zovaniya dannikh sputnikovikh IK-zondirovshchikov viksokogo spektral'nogo razresheniya [Problems and prospects for analyzing and using data from satellite infrared probes of high spectral resolution] // Earth exploration from space. 2005. № 5. P. 18–33. (In Russian).
- Falaleeva V.A., Fomin B.A.* Spektroskopitseskie problemi v pryamikh zadatsah sputnikovogo zondirovaniya atmosferi i puti ih preodoleniya [Spectroscopic problems in direct problems of satellite sensing of the atmosphere and ways to overcome them] // Optics of the atmosphere and ocean. 2016. V. 29. № 9. P. 733–738. (In Russian).
- Shishigin S.A.* Metod korrelyakhionnoy spektroskopii dlya analiza spectra uhodyaschego izlutseniya atmosferik [Correlation spectroscopy method for analyzing the spectrum of the outgoing radiation of the atmosphere] // Optics of the atmosphere and ocean. 2017. V. 30. № 2. P. 134–138. (In Russian).
- Shishigin S.A.* Pogreshnost' opredeleniya effektivnoy temperaturi sloev vozduha i podstilayushey poverhnosti Zemli v ispol'suemoy modeli atmosferi pri rastsetah soderzhaniya metana [Error in determining the effective temperature of air layers and the underlying surface of the Earth in the used atmospheric model when calculating methane content] // Optics of the atmosphere and ocean. 2021. V. 34. № 09. P. 711–715. (In Russian).

URL: planetcalc.ru/8731 (accessed date: 20. 03.2022).

**КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ,
СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК**

*Статья посвящается крупному российскому ученому
в области авиационных и космических систем управления,
председателю Совета “Интеркосмос” АН СССР (1966–1980 гг.)
академику Б.Н. Петрову*

**МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ИССЛЕДОВАНИИ
И ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА В МИРНЫХ
ЦЕЛЯХ (К 55-ЛЕТИЮ ПРОГРАММЫ “ИНТЕРКОСМОС”)**

© 2023 г. Л. А. Ведешин*

ФГБУН Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

**E-mail: vedeshin40@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.

DOI: 10.31857/S0205961423020057, EDN: TDEJMU

Исследования крупномасштабных космических процессов и явлений, требуют привлечения научных сил многих стран, использования дорогостоящих технических средств, для разработки и изготовления которых необходима межгосударственная кооперация, — это лишь некоторые причины, приводящие к необходимости сотрудничества в освоении и использовании космического пространства. Советский Союз с самого начала космической эры предложил международному сообществу все виды такого сотрудничества. После распада СССР в 1991 г. Россия, как правопреемник Советского Союза взяла на себя обязательства по реализации ранее запланированных международных проектов по программе “Интеркосмос”, а также продолжила сотрудничество с национальными космическими организациями США, Европы, Индии, Китая, Японии и др. на основе двухсторонних межправительственных соглашений.

4 октября 1957 г. в СССР был запущен первый искусственный спутник Земли (ИСЗ). Для контроля за полетом спутника на нем был установлен небольшой радиопередатчик — “Маяк”, работавший в диапазоне частоты 27 МГц, сигналы которого стали принимать ученые многих стран. Его запуск имел не только большое политическое, но и научное значение для исследования и использования космического пространства в мирных целях, в том числе для международного сотрудничества. На первых отечественных и зарубежных спутниках стали устанавливаться когерентные радиопередатчики типа “Маяк” различной модификации и другие научные приборы. Полеты этих спутников совпали с проведением в 1957–1958 гг. Международного геофизического года,

когда многие страны объединили свои усилия в проведении наземных радиофизических и ионосферных наблюдений и запусков исследовательских геофизических и метеорологических ракет. Эти исследования позволили ученым многих стран обмениваться научной информацией, необходимой для изучения процессов в околоземном космическом пространстве, в т.ч. для решения вопросов распространения радиоволн, важных для создания спутников связи и навигации.

Существенным вкладом в развитие международного сотрудничества стал полет в космос первого в мире космонавта Ю.А. Гагарина в апреле 1961 г. и обращение руководства Советского Союза к мировому сообществу: “Победы в освоении космоса мы считаем не только достижением нашего народа, но и всего человечества. Мы с радостью ставим их на службу всем народам, во имя прогресса, счастья и блага всех людей на Земле”. (Правда, 13.04.1961).

В апреле 1965 г. СССР направил правительствам Албании, НРБ, ВНР, ГДР, ДРВ, КНР, КНДР, Кубы, МНР, ПНР, СРР, ЧССР и СФРЮ предложение о проведении совещания по объединению усилий социалистических стран в изучении и освоении космоса. В результате достигнутых договоренностей в ноябре 1965 г. и апреле 1967 г. в Москве состоялись встречи представителей НРБ, ВНР, ГДР, Кубы, МНР, ПНР, СРР, СССР и ЧССР по обсуждению и принятию совместной научной программы работ по исследованию и использованию космического пространства в мирных целях, которая в дальнейшем получила название “Интеркосмос”. В каждой из стран-участниц программы был создан национальный координационный орган, отвечающий

за выполнение работ и соглашений по отдельным проектам и темам, осуществляемым в рамках согласованной совместной программы. В СССР таким органом стал Совет “Интеркосмос” при Академии наук СССР. В других странах, участвовавших в программе, координационные органы, именовались комитетами, советами или комиссиями “Интеркосмос”. Первым председателем Совета “Интеркосмос” при АН СССР в 1966 г. был назначен академик Б. Н. Петров, который внес огромный вклад в организацию и развитие международного сотрудничества в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях. Сотрудничество по программе “Интеркосмос” предусматривало совместную подготовку космических экспериментов и разработку научной аппаратуры, проведение, обработку и получение результатов исследований. Советский Союз предоставлял всем участникам программы возможность безвозмездной установки на советской космической технике научной аппаратуры и технических средств. В научную программу был включен широкий круг научных и прикладных исследований в области космической физики и метеорологии, космической связи, космической биологии и медицины, а с 1975 г. по изучению Земли из космоса. Среди научных направлений по космической физике в 1969–1991 гг. учеными и специалистами стран-участниц программы “Интеркосмос” были реализованы десятки совместных проектов в области изучения Солнца и солнечно-земных связей, верхней атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли, Луны, планет, межпланетного пространства, внеатмосферной астрономии, наблюдения ИСЗ и изучения Земли из космоса. Для реализации этой программы в СССР были запущены десятки спутников “Интеркосмос”, высотных геофизических ракет “Вертикаль” и метеорологических ракет М-100 и МР-12 с аппаратурой, созданной учеными социалистических стран, в т.ч. для установки на советские автоматические межпланетные станции (АМС) к Луне, Марсу и Венере, запускаемые по национальной программе (Верешетин, 1983).

Первые исследования коротковолнового излучения Солнца и его влияния на верхнюю атмосферу Земли были выполнены на спутнике “Интеркосмос-1” (серии ДС-УЗ ИК), запущенном 14 октября 1969 г. с космодрома Капустин Яр (масса аппарата 260 кг, из них масса научной аппаратуры 20.5 кг). Спутник был выведен на орбиту с параметрами: минимальное расстояние от поверхности Земли (в перигее) – 260 км, максимальное расстояние от поверхности Земли (в апогее) – 640 км, начальный период обращения – 93.3 мин, наклонение орбиты – 48.4°. В октябре 1967 г. участники экспериментов из ГДР, СССР и ЧССР встретились в Москве: определили состав научной аппаратуры спутника и сроки ее изготовления. В течение 1968 г. и первого полугодия 1969 г. советскими учеными был создан поляри-

метр для поиска возможной поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек (диапазон измерения 0.6–0.8 А) и рентгеновский спектрогелиограф для определения структуры и размеров области вспышек и долгоживущих активных областей короны методом сканирования диска Солнца в диапазоне длин волн 1.7–15 А, как в условиях спокойного светила, так и при вспышках на нем. Чехословацкие специалисты изготовили: оптический фотометр для исследования излучения Солнца в двух спектральных диапазонах длин волн 4500 и 6100 А и оптических эффектов, вызываемых слоем высотного аэрозоля в земной атмосфере, а также рентгеновский фотометр для измерений мягкого и жесткого рентгеновского излучения Солнца на нескольких участках спектра. Ученые ГДР разработали Лайман-альфа фотометр для измерения излучения Солнца в линии лайман-альфа (1215.6 А) при различных условиях солнечной активности, особенно для измерения быстрых вариаций этого излучения, с разрешающей способностью по времени 0.5 с, а также аппаратуру для передачи научной информации. Для приема сигналов со спутника в ГДР был создан универсальный трехканальный телеметрический УКВ-приемник с полосой частот 135–138 МГц, спиральная антенна и антенный усилитель. Телеметрическими приемниками были оборудованы обсерватории в Нойштрелице (ГДР), Красной Пахре (СССР), Ондржейове и Панска Весце (ЧССР). Одновременно с экспериментами на ИСЗ “Интеркосмос-1” обсерватории НРБ, ВНР, ГДР, ПНР, СРР, СССР и ЧССР проводили радиоастрономические, ионосферные и оптические наблюдения по согласованной программе. В результате было установлено, что степень поляризации при мощных вспышках на Солнце достигает 10–20%, получены рентгеновские спектрограммы многозарядных ионов в солнечных вспышках с высокой степенью разряднения, данные о динамике развития в рентгеновском спектре мощных протонных вспышек на Солнце, а также о распределении содержания озона и кислорода в атмосфере Земли. Для продолжения исследований процессов, происходящих на Солнце в период 11-летних циклов по программе социалистических стран в 1969–1991 г. были запущены спутники: “Интеркосмос-1, -4, -7, -11, -16 – “Коперник-500” (в честь 500-летия известного в мире польского астронома). Большой вклад в реализацию этих проектов внес крупный советский ученый, заведующий лабораторией ФИАН профессор С.Л. Мандельштам (Ведешин, 2019).

Аналогичные эксперименты по программе “Интеркосмос” проводились на геофизических ракетах “Вертикаль-1” (1970) и “Вертикаль-2” (1971), запускаемых с космодрома Капустин Яр на высоту 500 км с научной аппаратурой для исследования ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца, ионосферы, метеорного вещества, изготовленной учеными и специалистами Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши и Советского Союза. На высоте 62 км спус-

каемый аппарат (СА) отделялся от основной части ракеты и доставлял аппаратуру и материалы эксперимента на Землю. Эксперименты позволили получить материалы для анализа цикла солнечной активности, излучений внешней ионосферы, изменений, возникающих на границе радиационного пояса, влияния излучений на структуру верхних слоев атмосферы Земли, сведений о процессах, происходящих на Солнце и особенностях солнечно-земных связей. В 1975 г. была создана новая модификация геофизической ракеты "Вертикаль", которая имела три основные модификации: высотный зонд атмосферный (ВЗА) до 1500 км, высотный зонд астрофизический, спасаемый (ВЗАФ-С) и неспасаемый (ВЗАФ-Н) до 500 км. В зависимости от постановки задачи, на них проводились астрофизические и атмосферные исследования на высотах от 500 до 1500 км. В СА и приборном отсеке размещалось более десятка сложных и разнообразных приборов, разработанных и изготовленных в Болгарии, Венгрии, ГДР, Польше, Советском Союзе и Чехословакии. Эксперименты с помощью вертикальных зондов продолжались до 1983 г. и дополняли исследования, проводимые на спутниках серии "Интеркосмос" (Ведешин, 1991).

Изучение процессов, происходящих в верхней атмосфере и ионосфере Земли, были начаты на спутнике "Интеркосмос-2" (серии ДС-У1-ИК), запущенном 25 декабря 1969 г. с космодрома Капустин Яр (масса аппарата — 260 кг, полезной нагрузки — 12.5 кг) на эллиптическую орбиту с параметрами: в перигее — 206 км, в апогее — 1200 км, наклонение — 48.4 град., период — 98.5 мин, которая позволяла измерять ионосферную плазму на различных высотах в пределах от 200 до 1200 км в области средних геомагнитных широт и экваториальной области. Научная программа спутника была разработана совместно учеными Болгарии, ГДР, Советского Союза и Чехословакии и включала следующие приборы: сферическая ловушка для исследования концентрации положительных ионов, датчик температуры и плавающего потенциала для исследования распределения температуры электронов, цилиндрический зонд Ленгмюра для исследования концентрации и температуры электронов ионосферной плазмы, двухчастотный когерентный передатчик типа "Маяк" для измерения интегральной электронной концентрации между спутником и наземными радиоприемными пунктами. Одновременно со спутниковыми измерениями параметров ионосферы проводилась обширная программа измерений сетью ионосферных станций стран-участниц проекта. Комплексная программа одновременных измерений позволила получить объемное представление о процессах, происходящих в ионосфере, чтобы в дальнейшем построить динамическую модель ионосферы (Ведешин, 1971).

Эти исследования и эксперименты были продолжены с участием ученых Болгарии, ГДР, Вен-

грии, Кубы, Польши, Румынии, Чехословакии, Австрии, Индии, Франции, Швеции и др. на спутниках "Интеркосмос-2" (1969), "Интеркосмос-4" (1970), на советских ИСЗ "Космос-321", 348 и 371" (1970), "Интеркосмос-8" (1972), "Интеркосмос-12" (1974), "Интеркосмос-14" (1975), "Интеркосмос-19" (1979), "Интеркосмос-22" (1981) ("Интеркосмос-Болгария-1300", посвященный 1300-летию Болгарского государства). Основной задачей спутника "Интеркосмос-Болгария-1300" являлось продолжение комплексных исследований физических процессов, происходящих в ионосфере и магнитосфере Земли. Спутник был запущен 7 августа 1981 г. ракетой-носителем "Восток-2М" с космодрома Плесецк на околополярную орбиту с апогеем ~900 км, перигеем ~825 км и с наклонением 81.2°. Космический аппарат весом в 1500 кг был сконструирован на базе ИСЗ "Метеор-2" и располагал комплексом из 11 научных инструментов. Советские специалисты совместно с учеными Болгарской академии наук принимали участие в создании аппаратуры и обработке данных научного комплекса. Результаты измерений спутника позволили: построить эмпирические модели электрического поля магнитосферной конвекции в высокоширотной ионосфере в зависимости от ориентации межпланетного магнитного поля (ММП); обнаружить проникновение аврорального электрического поля на широты главного ионосферного провала; исследовать структуру продольных токов в авроральном овале; выяснить поляризационные и спектральные характеристики э/м скачков (ЭМС) над различными областями полярных сияний, их взаимосвязь с потоками энергичных частиц, предложить самосогласованную модель ЭМС и др. (Ведешин, 2021).

Магнитосферные исследования были начаты на советско-чехословацком спутнике "Интеркосмос-3" (серии "ДС-У2-ИК-1"), запущенном с космодрома Капустин Яр 7 августа 1970 г., на эллиптическую орбиту с параметрами: в апогее 1328 км, в перигее 207 км, наклонение 49 град., период обращения 99.8 мин. На борту спутника для изучения радиационной обстановки в околоземном пространстве была установлена следующая аппаратура: анализатор низких частот, комплекс аппаратуры для изучения потоков заряженных частиц, УКВ-передатчик для трансляции нестационарных электрических сигналов, разработанный специалистами СССР и ЧССР. Приборами на борту космического аппарата "Интеркосмос-3" были зарегистрированы значительные изменения в потоках излучений на нижней границе радиационного пояса. Эти изменения наблюдались вслед за серией хромосферных вспышек на Солнце. В ходе эксперимента отмечено "высыпание" в плотные слои атмосферы Земли электронов высоких энергий, а также был зарегистри-

стрирован практически полный набор известных ОНЧ сигналов (Ведешин, 1970).

Для изучения космических лучей сверхвысоких энергий и метеорного вещества в околоземном пространстве на спутнике “Интеркосмос-6”, запущенном с космодрома Байконур 11 апреля 1972 г. ракетой “Восток” (апогей 203 км и перигей 256 км, наклонение 51.8), был установлен спускаемый аппарат (СА) с фото-эмульсионным блоком, который фиксировал попадания атомных ядер различного веса и энергий. После вскрытия СА из него был извлечен герметичный контейнер с ядерной фотоэмульсией, с запечатленными на ней следами частиц высокой энергии (10^{12} – 10^{13} эВ), рентгеновскими фотопленками, др. фотоматериалами, которые были переданы участникам эксперимента ВНР, ПНР, СССР и ЧССР.

Магнитосферные исследования были продолжены на спутниках “Интеркосмос-5” (1971), “Интеркосмос-10” (1973), “Интеркосмос-13” (1975), “Интеркосмос-14” (1975), “Интеркосмос-18” (1978), “Интеркосмос-19” (1979), “Интеркосмос-24” (1989), “Интеркосмос-25” (1991) с участием специалистов Болгарии, Венгрии, ГДР, Румынии, Советского Союза и Чехословакии. В наземных наблюдениях участвовали Бразилия, Канада, Финляндия, Япония, Новая Зеландия, Франция, США, Индия и др. Наиболее интересным из них стал международный проект “АПЭКС” (активный плазменный эксперимент) по изучению магнитосферы и ионосферы Земли и активному воздействию на околоземное пространство с помощью модулированных электронных и ионных пучков, с регистрацией возникающих эффектов на отделяемом субспутнике “Магион-3”. Спутники “Интеркосмос-25” (серии АУОС-3-АП-ИК, массой 800 кг) и “Магион-3” (массой 52 кг, из них 10 кг – масса научной аппаратуры) были запущены 18 декабря 1991 г. ракетой-носителем “Циклон-3” с космодрома “Плесецк” на эллиптическую орбиту с апогеем 3080 км, перигеем 440 км, наклонением 82.5°. Субспутник “Магион-3” отделился от него через 10 дней после выведения на орбиту. В ходе полета “Магион-3” совершал орбитальные маневры, меняя расстояние до основного спутника от сотен метров до сотен километров и оказываясь впереди или позади него по ходу полета. Использование двух аппаратов, имеющих аналогичные наборы научных приборов и проводящих измерения одновременно, позволило различать развитие наблюдаемых эффектов в пространстве и времени. Управление полетом спутника “Магион-3” и прием научной информации осуществлялись чешской обсерваторией Паньска Вес. На борту спутников были установлены: чешские приборы для измерения параметров плазмы и заряженных частиц и волновой комплекс анализа низкочастотных электрических и магнитных полей, румынский трехкомпонентный магнитометр, польский и болгарский ИК-радиометры. В экспе-

рименте “АПЭКС” впервые исследовалась возможность применения модулирования пучков заряженных частиц в качестве безконструкционных излучающих антенн. Низкочастотное излучение на основной частоте модуляции электронного пучка было зафиксировано на борту субспутника, находившегося на расстоянии нескольких десятков километров от основного космического аппарата. Проведены эксперименты по изучению критической ионизации при инъекции нейтрального газа в околоземную плазму. Экспериментально исследована возможность инъекции со спутника электронных пучков на высотах 500–1000 км в условиях не скомпенсированного заряда аппарата и компенсации заряда эмиссией ксеноновой плазмы. На субспутнике “Магион-3” впервые проводились натурные наблюдения в околоземном пространстве электронных пучков, инжектируемых основным аппаратом, обнаружено ускорение электронных всплесков до энергий в несколько сот кило-электронвольт (Михайлов, 2015).

Для изучения Земли из космоса специалистами ИКИ АН СССР и предприятия “Карл Цейс Йена” ГДР в 1975 г. были начаты совместные работы по созданию стационарной многозональной космической фотокамеры с шестью объективами (МКФ-6). Аппаратура позволяла регистрировать электромагнитное поле Земли одновременно в разных спектральных каналах в видимой, инфракрасной и микроволновой областях спектра. Для обработки космической информации учеными и была создана специальная установка для синтеза 4 снимков в разных зонах спектра (КТС-4). Успешные испытания образцов аппаратуры МКФ-6 вначале были проведены на самолетах-лабораториях АН-30 в СССР и ГДР, а затем выполнены космонавтами В.В. Аксеновым и В.Ф. Быковским на пилотируемых космических кораблях (ПКК) “Союз-22” (16–18.09.1976). В эксперименте были получены многозональные снимки в 6 спектральных диапазонах (0.46–0.50, 0.52–0.56, 0.58–0.62, 0.64–0.68, 0.68–0.78, 0.78–0.88) с разрешением в видимой зоне спектра 20–40 м и в ближней инфракрасной области 80–100 м. После проведения испытаний на ПКК “Союз-22” были изготовлены летные образцы фотокамеры МКФ-6М, которые успешно использовались в экспериментах по съемке земной поверхности с пилотируемых космических станций (ПКС) “Салют-6”, “Салют-7” и “Мир” с участием космонавтов социалистических стран по программе “Интеркосмос”. Полученные материалы съемок передавались специалистам этих стран для обработки и практического использования для решения научных и хозяйственных задач. Другой международный проект по изучению Земли из космоса был реализован на спутнике “Ресурс-ОЭ” (1980–1984) с цифровой сканирующей аппаратурой “Фрагмент”, созданной совместно специалистами ИКИ АН СССР, ВНИИ-ЭМ и предприятия “Карл Цейс Йена” для изучения различных природных образований в 8 спектраль-

ных диапазонах спектра. Космической системой “Фрагмент” было получено большое количество многозональных изображений различных районов земной поверхности в разные сезоны, которые использовались отраслевыми специалистами социалистических стран для создания программного обеспечения для цифровой обработки изображений, методов космической съемки и решения многих научных и хозяйственных задач. Для проведения международных океанографических исследований в СССР были разработаны и запущены спутники “Интеркосмос-20” (1979) и “Интеркосмос-21” (1981) с научной аппаратурой в составе: двухканальный спектрометр для одновременного измерения яркости океана и параметров атмосферы (ГДР и СССР); двух-поляризационный СВЧ-радиометр (СССР); бортовая система сбора и передачи информации с морских и наземных платформ и буев (Болгария, Венгрия, ГДР, Чехословакия, СССР). В эксперименте также принимали участие ученые и специалисты ПНР, СРР, Кубы. Впервые в мире одновременно проводилась отработка уникальной методики морских и атмосферных исследований с помощью аналогичной аппаратуры, установленной на спутниках “Интеркосмос-20 и -21” и ПКС “Салют-6” (1980) и “Салют-7” (1982), “Космос-1076” (1979), самолете-лаборатории АН-30, морских судах и океанографической платформе в акватории Черного моря. Дополняя друг друга, космические аппараты давали возможность вести наблюдения океана с разных высот и сравнивать полученные данные. В результате серии проведенных экспериментов удалось разработать научно-методическую основу создания глобальной системы наблюдений и контроля состояния океана в интересах службы погоды, промыслового и морского флота страны. Еще один проект по исследованию океана и атмосферы, посвященный 1300-летию Болгарии, в 1981 г. осуществили ученые Болгарии и СССР на спутнике “Метеор-Природа”. На его борту была размещена многоканальная спектрометрическая болгарская аппаратура СМП-32, работавшая в видимой и ближней ИК-области спектра, и советские СВЧ-радиометры РМ-1 и РМ-2. Разработанные специалистами принципы привязки трассовых измерений к координатам изображений СМП-32 позволяли осуществлять анализ спектров отражения от облаков, суши и моря и создать методику получения информации о природных ресурсах Болгарии и Черноморского бассейна. В результате обработки полученной информации болгарским ученым удалось получить информацию о районах выхода пресных вод в Черном море и выброса газов из донных отложений (Ведшин, 2010).

В связи с началом в СССР регулярных космических исследований на ПКС и ПКС советское правительство в 1976 г. предложило социалистическим странам в целях дальнейшего развития исследований по программе “Интеркосмос” ор-

ганизовать совместные полеты космонавтов этих стран на советских ПКС и ПКС с целью проведения космических экспериментов. Всего в рамках пилотируемой программы полетов на ПКС “Салют-6” и “Салют-7” с 1978 по 1981 г. были выполнены десятки научно-технических и медико-биологических экспериментов с участием 18 космонавтов из 9 социалистических стран. После завершения пилотируемой программы “Интеркосмос” на основе двухсторонних коммерческих контрактов в СССР в 1982–1988 гг. были подготовлены кандидаты в космонавты от Афганистана, Болгарии, Индии, Сирии и Франции. Космонавты Индии (1984), Сирии (1987), Болгарии (1988) и Афганистана (1988) выполнили по одному космическому полету. Космонавт из Франции Жан-Лу Кретьен выполнил два космических полета (1979 и 1982), а в 1988 г. вторым болгарским космонавтом стал Александр Александров (Козырев, 1980).

30 июня 1966 г. в Москве между СССР и Францией было подписано Межправительственное соглашение о сотрудничестве в освоении и изучении космоса в мирных целях, которое предусматривало запуск Советским Союзом французского спутника; сотрудничество по космической метеорологии; космической связи; обмену научной информацией, стажерами и делегациями, проведению конференций и симпозиумов. Организация работ по Соглашению была возложена на Совет “Интеркосмос” при Академии наук СССР и французский Национальный центр космических исследований (КНЕС). В рамках советско-французского сотрудничества в период с 1967 г. по 1991 г. было осуществлено свыше 30 экспериментов с использованием 10 советских спутников: “Прогноз-2, 6 и 7”, “Ореол”, “Ореол-2”, “Ореол-3”, “Метеор”, “Космос-936”, “Космос-782”, “Космос-1129”, и 3 французских: “МАС, МАС-2”, “Снег-3”, 12 АМС (“Марс-3, 5, 6, 7”, “Луна-17”, “Луна-21”, “Венера-9, 10, 11, 12, 13, 14”) и 2 ПКС “Салют-6 и 7”, с помощью которых были выполнены совместные советско-французские эксперименты в области радиоастрономии, внеатмосферной астрономии (в ультрафиолетовом, гамма- и рентгеновском диапазонах), геофизики и космических лучей, исследования Луны, планет и межпланетного пространства, наблюдения искусственных спутников Земли в целях геодезии, исследования по отработке космической техники, космическому материаловедению. В период 1967–1982 гг. специалистами СССР и Франции были проведены десятки запусков советских и французских метеоракет: МР-12 (о. Хейса), “Драгон-11В” и “М-100” во Франции, “М-100Б” и “Вероника” (Фр. Гвиана), “М-100, М-100Б” и “Аракс” (о. Кергелен), а также запуски высотных аэростатов по проектам “Омега” (одновременно в Северном и Южном полушариях) и “Самбо” (Кируна, Швеция) для измерения параметров

верхней атмосферы и электромагнитных явлений в магнитно-сопряженных точках Земли (Петрунин, 1978).

В соответствии советско-индийским соглашением на международном полигоне ТЕРЛС (Индия) в 1970–1982 гг. на советских ракетах М-100 и аэростатах проводились совместные эксперименты по изучению параметров верхней атмосферы Земли и галактических источников, а в 1975 г. советской ракетой-носителем был запущен индийский спутник “Ариабата” для исследования ионосферы и рентгеновского галактического излучения Солнца. Затем в 1979 г. в СССР был запущен еще один индийский спутник “Бхаскара” для дистанционного зондирования Земли.

В связи с кончиной в 1980 г. академика Б.Н. Петрова совет “Интеркосмос” возглавил вице-президент АН СССР академик В.А. Котельников, под руководством которого были выполнены многие крупные космические проекты. На основе двухстороннего сотрудничества по программе “Интеркосмос” в совместных космических исследованиях и наземных наблюдениях стали принимать участие многие ученые и специалисты из США, Австрии, Швеции, Финляндии, Бразилии, Канады, Японии, Новой Зеландии, Сирии, Афганистана, Ирака и других стран.

В СССР в период с 1967 по 1991 г. по программе “Интеркосмос” были реализованы многочисленные космические проекты и эксперименты, в которых участвовало более 20 стран. В результате сотрудничества с зарубежными странами на совместной основе было разработано более 100 научных приборов и систем для проведения исследований на советских космических аппаратах (КА), которые Советский Союз предоставлял безвозмездно странам-участницам. С помощью советских КА, АМС, ПКК, ПКС, геофизических, метеорологических ракет и аэростатов учеными были получены важные научные и практические результаты в области космической физики, метеорологии, наук о Земле, медико-биологических проблем в космосе, исследования Луны и планет Солнечной системы и др., которые стали достоянием всех стран-участниц сотрудничества. Формальным завершением международной программы “Интеркосмос” (1967–1991 гг.) считается, проведенная в апреле 2001 г. в Москве научная конференция “Интеркосмос-30”, посвященная 30-летию запуска спутника “Интеркосмос-1”, в которой приняли участие более 100 российских и зарубежных ученых и специалистов. После завершения конференции был издан сборник научных докладов и выступлений.

На этом международное сотрудничество ученых, начатое по программе “Интеркосмос”, не прекратилось. Россия как правопреемник Советского Союза взяла на себя обязательства по реализации, ранее запланированных (до 1991 г.) международных проектов. В результате в после-

дующие годы были реализованы следующие научные программы: АПЭКС “Интеркосмос-25” (1991), “Метеор-3/ТОМС” (1991), Модуль “Природа” станции “Мир” (1996–2001), ИНТЕРБОЛ: “Прогноз-11” (1995), “Прогноз-12” (1996), эксперименты на МКС (1998), “Метеор-3М/SAGE” (2001), КОРОНАС: “Коронас И” (1994), “Коронас-Фотон” (2001), “Коронас-Ф” (2009), “Университетский-Татьяна-2” (2009), “Спектр-Р” (“Радиоастрон”) (2011), “Ломоносов” (2016), “Спектр-Рентген-Гамма” (2019.) и “Спектр-УФ” (планируется в 2024 г.) Приемником Совета “Интеркосмос” в 1992 г. стал Совет по космосу РАН, в составе которого под руководством академика В.А. Котельникова была создана секция “Международное сотрудничество”. В рамках этой секции сотрудничество осуществляется на основе двухсторонних соглашений между институтами РАН и зарубежными организациями (Зеленый, 2018).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема “Мониторинг”, госрегистрация № 122042500031-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ведешин Л.А.* К 50-летию полета спутника “Интеркосмос-1” // Исслед. Земли из космоса, М. 2019. № 4. С. 87–93.
- Ведешин Л.А.* Международное сотрудничество в области исследования Земли из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 37–53.
- Ведешин Л.А.* Первый советский метеорологический спутник (к 60-летию начала разработки спутников серии “Метеор”) // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 2. С. 94–95.
- Ведешин Л.А.* Развитие в СССР ракетных исследований околоземного пространства // Проблемы космических исследований. Международный центр научной и технической информации, 1991. С. 84–99.
- Ведешин Л.А., Крошкин М.Г.* Ионосферный эксперимент на спутнике “Интеркосмос-2”. Вестник Академии наук СССР. 1971. № 3. С. 37–42.
- Ведешин Л.А., Писаренко Н.Ф.* Наблюдения радиационных поясов и ионосферы Земли на спутнике “Интеркосмос-3” // Вестник Академии наук СССР. 1970. № 10. С. 31–36.
- Верещетин В.С., Ведешин Л.А., Воронин В.В., Денисенко В.А. и др.* // Орбиты сотрудничества / Под ред. Б.Н. Петрова, В.С. Верещетина. М.: Машиностроение. 1983. 178 с.
- Зеленый Л.М.* Космос – возможности научной дипломатии. Доклад на Президиуме РАН, 25.01.2018. С. 21.
- Козырев В.И., Никитин С.А.* Полеты по программе “Интеркосмос”. М.: Знание”, 1980. 64 с.
- Михайлов Ю.М.* Экспериментальные исследования генерации и распространения ультра-крайне-очень низкочастотных электромагнитных волн в околоземном космическом пространстве // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли: сборник / под ред. В.Д. Кузнецова, ИЗМИРАН, 2015. С. 185–200.
- Петрунин С.В.* Советско-французское сотрудничество в космосе. М.: “Знание”, 1978. 64 с.