

ISSN 0205-9614

Номер 1

Январь–Февраль 2024



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2024

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

Картографирование и оценка риска лесных пожаров с использованием методов дистанционного зондирования и ГИС: тематическое исследование в провинции Нгеан, Вьетнам

*Т. Н. Ф. Доан, Л. Х. Чинь, В. Р. Заблоцкий, В. Ч. Нгуен, С. Ч. Чан,
Т. Т. Х. Фам, Т. Т. Х. Ле, В. Ф. Ле*

3

Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрирования луговой и степной растительности Хакасии по наземным и спутниковым данным

*А. П. Шевырногов, И. Ю. Ботвич, Т. И. Письман, А. И. Волкова,
Н. А. Кононова, С. А. Иванов*

16

Использование космической информации о Земле

Сравнительный анализ индикаторов формирования древесной растительности на залежных землях Среднерусской лесостепи на основе данных дистанционного зондирования Земли

Э. А. Терехин

29

Применение материалов дистанционного зондирования Земли для уточнения локализации месторождений золота в пределах Новогодненского рудного поля на Полярном Урале

Г. А. Миловский, А. Д. Апарин, А. Р. Ибрагимов, Е. Э. Тюкова

40

Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Берингова моря по данным реанализа ERA5, основанных на спутниковой информации

Г. В. Шевченко, Ж. Р. Цхай, Д. М. Ложкин

52

Связь изменений концентрации CO₂ над крупными акваториями бореальной и субарктической зоны Северного полушария с их фенологическими фазами, определяемыми по данным спутника SMOS

В. В. Тихонов, Е. В. Пашинов, Д. М. Ермаков, И. В. Хвостов, А. Н. Романов

65

Физические основы исследования Земли из космоса

Предварительные результаты поисков длительного микроволнового излучения грозовой атмосферы на волне 1.35 см

Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, А. О. Орлов

78

Обзоры

Первые российские научные эксперименты по изучению природной среды с помощью беспилотных летательных аппаратов

Л. А. Ведешин, Д. А. Шаповалов, Л. Г. Евстратова

85

Правила для авторов

92

Contents

No. 1, 2024

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

Forest Fire Risk Assessment and Mapping Using Remote Sensing and GIS Techniques: A Case Study in Nghe An Province, Vietnam

Thi Nam Phuong Doan, Le Hung Trinh, V. R. Zablotskii, Van Trung Nguyen, Xuan Truong Tran, Thi Thanh Hoa Pham, Thi Thu Ha Le, Van Phu Le

3

Informative Value of Spectral Vegetation Indices for the Meadow and Steppe Vegetation Monitoring of Khakassia by Ground and Satellite Data

A. P. Shevyrnogov, I. Yu. Botvich, T. I. Pisman, A. I. Volkova, N. A. Kononova, S. A. Ivanov

16

Utilization of the Earth Space Data

Comparative Analysis of Reforestation Indicators on Abandoned Agricultural Lands in the Central Russian Forest-Steppe Based on Remote Sensing Data

E. A. Terekhin

29

Application of Earth Remote Sensing Materials to Refine the Localization of Gold Deposits within the Novogodnenskoye Ore Field in the Polar Urals

G. A. Milovsky, A. D. Aparin, A. P. Ibragimov, E. E. Tyukova

40

The Spatio-Temporal Variability of Sea Surface Temperature of Bering Sea from ERA5 Reanalysis Data Based on Satellite Information

G. V. Shevchenko, Zh. R. Tshay, D. M. Lozhkin

52

Relation of Changes in CO₂ Concentration over Large Water Areas of the Boreal and Subarctic Zones of the Northern Hemisphere with Their Phenological Phases Determined from SMOS Satellite Data

V. V. Tikhonov, E. V. Pashinov, D. M. Ermakov, I. V. Khvostov, A. N. Romanov

65

Earth Research from Space Physical Ground

Preliminary Results of Searches for Long-Term Microwave Radiation of a Thunderstorm Atmosphere at a Wavelength of 1.35 cm

G. S. Bordonskiy, A. A. Gurulev, A. O. Orlov

78

Reviews

First Russian Scientific Experiments on the Natural Environment Study Using Unmanned Aerial Vehicles

L. A. Vedeshin, D. A. Shapovalov, L. G. Evstratova

85

Notes to the Authors

92

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА РИСКА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ГИС: ТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В ПРОВИНЦИИ НГЕАН, ВЬЕТНАМ

© 2024 г. Т. Н. Ф. Доан¹, Л. Х. Чинь^{2, *}, В. Р. Заблоцкий³, В. Ч. Нгуен¹,
С. Ч. Чан¹, Т. Т. Х. Фам¹, Т. Т. Х. Ле¹, В. Ф. Ле²

¹Исследовательская группа “Геоматика в науках о Земле”, Ханойский горно-геологический университет,
Ханой, Вьетнам

²Технический университет им. Ле Куи Дон, Ханой, Вьетнам

³Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

*E-mail: trinhlehung@lqdtu.edu.vn

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

В работе представлены результаты моделирования риска возникновения лесных пожаров на западе провинции Нгеан (северо-центральная часть Вьетнама), полученные на основе данных дистанционного зондирования и ГИС. С помощью методов машинного обучения: случайного леса (Random Forest), опорных векторов (Support Vector Machine), деревьев классификации и регрессии (Classification and Regression Trees) были построены модели возникновения лесных пожаров. В моделях учитывались девять основных факторов, определяющих вероятность возникновения лесных пожаров, среди них: количество фитомассы растительного покрова, поверхностная эвапотранспирация, высота местности над уровнем моря, наклон и экспозиция склона, скорость ветра, температура земной поверхности, среднемесячное количество осадков, плотность населения на территории. Различные значения параметров в алгоритмах машинного обучения были исследованы для выбора модели, наиболее точно предсказывающей возникновение лесных пожаров. Установлено, что метод случайного леса со значением параметра “количество деревьев решений”, равным 100, имеет наибольшую точность прогнозирования риска лесных пожаров на исследуемой территории.

Ключевые слова: лесные пожары, оценки риска возникновения, дистанционное зондирование, ГИС, методы машинного обучения, провинция Нгеан

DOI: 10.31857/S0205961424010012, **EDN:** GNEJRH

ВВЕДЕНИЕ

Вьетнам – страна, четверть территории которой составляют горные районы с лесистостью более 42%. Леса являются важным экологическим ресурсом страны, необходимым для социально-экономического развития общества. В последнее время вследствие деятельности человека, а также изменения климата количество лесных пожаров во Вьетнаме возросло, увеличился и ущерб, наносимый пожарами лесным ресурсам.

Лесной пожар представляет собой катастрофическое явление, с которым трудно бороться. Возгоранию и распространению лесных пожаров способствует множество причин, среди которых присутствует человеческий фактор, топографические и метеорологические характеристики территории. Разработка моделей прогнозирования лесопожарной опасности является актуальной задачей.

Геопространственные технологии эффективно используются при построении моделей прогнозирования риска лесных пожаров. Дистанционное зондирование и геоинформационные системы (ГИС) позволяют оперативно собирать информацию о лесном покрове для анализа, управления территориями в целях раннего предупреждения лесных пожаров (Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018) и их негативных последствий, в том числе связанных с эмиссиями вредных примесей в атмосферу (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016).

Исследование лесопожарной опасности обнаруживает тесную связь между погодными условиями, влажностью растительного покрова, факторами рельефа и вероятностью возникновения лесных пожаров (Beals E.A., 1914). Помимо таких метеорологических факторов, как количество осадков, температура и влажность воздуха (Williams, 1993),

важную роль в возникновении лесных пожаров играют скорость ветра, плотность населения, которые увеличивают риск возникновения лесных пожаров (Dong, 2005).

Дистанционное зондирование и ГИС-технологии применялись во многих исследованиях для построения моделей прогнозирования пожароопасности леса на основе сочетания традиционных методов и современных методов обработки пространственных данных. Одним из первых проектов в области применения дистанционного зондирования и ГИС для прогнозирования риска лесных пожаров является Европейская информационная система по лесным пожарам (EFFIS), созданная Европейским центром научно-исследовательского сотрудничества в 2000 году. Система EFFIS позволяет прогнозировать пожарную опасность, своевременно обнаруживать лесные пожары, картографировать очаги пожаров, а также оценивать ущерб от лесных пожаров. Данные дистанционного зондирования, используемые в этой системе, представляют собой спутниковые снимки MODIS, VIIRS и Sentinel 2 MSI (<https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps>).

Yassemi и др. (2008) объединили технологию ГИС, модели окружающей среды и клеточные автоматы Мура (CA) для создания модели прогнозирования лесных пожаров на территории Нордгег Альберта (Канада). Полученные результаты показывают соответствие между результатами моделирования и данными о пожарах в районе исследования. Интеграция технологии GIS-CA позволяет реалистично моделировать сценарии лесных пожаров (Yassemi et al., 2008). В исследовании (Wimberly et al., 2007) использовались разновременные спутниковые снимки Landsat для картографирования интенсивности лесных пожаров в южных Аппалачах (Северная Каролина, США). Нормализованный индекс гарей (NBR), рассчитанный по изображениям Landsat в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазоне, применялся для оценки изменения земного покрова до и после пожара. Chowdhury и др. (2013) использовали спутниковые снимки MODIS для определения входных параметров, таких как температура поверхности, нормализованный многоканальный индекс засухи (NMDI), индекс температуры и влажности растительности (TVWI) с целью построения карты прогнозирования риска лесных пожаров (Chowdhury et al., 2013). Полученные результаты показали, что почти 92% лесных пожаров произошли на территории, отнесенной к категории очень высокой пожароопасности.

В настоящее время методы машинного и глубокого обучения (artificial neural network, random forest, support vector machine) используются для повышения точности моделей прогнозирования лесных

пожаров (Vasilakos et al., 2009; Oliveira et al., 2012; Bui et al., 2016, 2017). Например, изучались методы множественной регрессии (Oliveira et al., 2012), логистической регрессии (Pourghasemi, 2015), географически взвешенной регрессии (GWR) (Fernandez et al., 2012), методы интеллектуального анализа данных (Arapaci et al., 2014).

Iban и Sekertekin (2022) использовали тепловые аномалии изображений MODIS и такие методы глубокого обучения, как метод опорных векторов, дискриминантный линейный анализ, метод случайного леса для прогнозирования лесных пожаров на территории Адана и Мерсин (Турция). Исследование показало, что такие факторы, как высота над уровнем моря, уклон склона и температура, оказывали наибольшее влияние на риск возникновения лесных пожаров в районе наблюдений (Iban and Sekertekin, 2022).

В работе Ruano и др. (2022) вегетационный индекс NDVI и данные о рельефе территории, запасах пожароопасных материалов и транспортной инфраструктуре, использовались для построения моделей возникновения лесных пожаров. В ходе экспериментов исследовались обобщенные линейные модели (GLM), обобщенные аддитивные модели (GAM) для оценки вероятности лесных пожаров (Ruano et al., 2022). Имеются также и другие работы (Jaiswal et al., 2002; Enod et al., 2021; Herrera et al., 2022; Sivrikaya, Kucuk, 2022), в которых прогнозировался риск возникновения лесных пожаров на основе совместного использования данных дистанционного зондирования, ГИС и методов машинного и глубокого обучения.

Исследования по прогнозированию лесных пожаров проводятся во Вьетнаме с конца XX века, первоначально на основе применения совокупного индекса Нестерова (Pham, 1988; Vo, 1995; Tran et al., 2010). Позже, при прогнозировании лесных пожаров, стали использоваться данные о температуре поверхности, рассчитанные по космическим изображениям в тепловом инфракрасном диапазоне (изображения Landsat, MODIS), результаты прогнозирования визуализировались с помощью ГИС (Vuong, 2005; Doan, 2007; Tran et al., 2016). Данные теплового инфракрасного канала Landsat применялись для обнаружения подземных пожаров в угольных шахтах (Trinh, 2014; Trinh, Zablotskii, 2017). В последнее время при оценке риска лесных пожаров в северных горных районах Вьетнама (Nguyen et al., 2018; Dang, 2021; Hoang et al., 2020) использовались методы машинного обучения на основе данных дистанционного зондирования. Установлено, что методы машинного обучения позволяют прогнозировать риски лесных пожаров с большей точностью, чем традиционные методы с использованием техники иерархического анализа. В целом

вышеуказанные работы продемонстрировали эффективность дистанционных методов и ГИС-технологии при разработке моделей оценки риска возникновения лесных пожаров.

В данной работе три популярных алгоритма машинного обучения: метод случайного леса (RF), метод опорных векторов (SVM) и метод деревьев классификации и регрессии (CART) применялись для районирования пожароопасности лесной территории. В результате моделирования получена картосхема лесопожарной опасности западной части провинции Нгеан Вьетнама.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Исследуемая территория и данные дистанционного зондирования

Исследуемая территория. Исследуемая территория расположена на западе провинции Нгеан, в северо-центральной части Вьетнама, с географическими координатами от 18°33' до 20°01' с.ш.

и от 103°52' до 105°48' в.д. (рис. 1). Местность имеет сложный рельеф, сильно расчлененный холмами, горами, системой рек и ручьев.

Площадь лесов и лесных угодий провинции Нгеан занимает более 58%, (Министерство сельского хозяйства и развития сельских районов, Вьетнам, 2021 г.). Хотя лесной покров территории имеет тенденцию к увеличению в последние годы, большая часть новых лесных площадей провинции – это лесопосадки. Естественный лес имеет заметное снижение как качества, так и площади.

Провинция расположена в зоне тропического муссонного климата с жарким, влажным и дождливым летом (с мая по октябрь) и холодной, менее дождливой зимой (с ноября по апрель). Из-за сухого ветра фён, дующего с гор на равнину и деятельности человека Нгеан является районом со сложными лесными пожарами и высоким уровнем (V – чрезвычайно опасный уровень) рисков их возникновения.

Данные дистанционного зондирования. Мультиспектральные изображения Sentinel 2 MSI использовались для расчета вегетационного индекса,

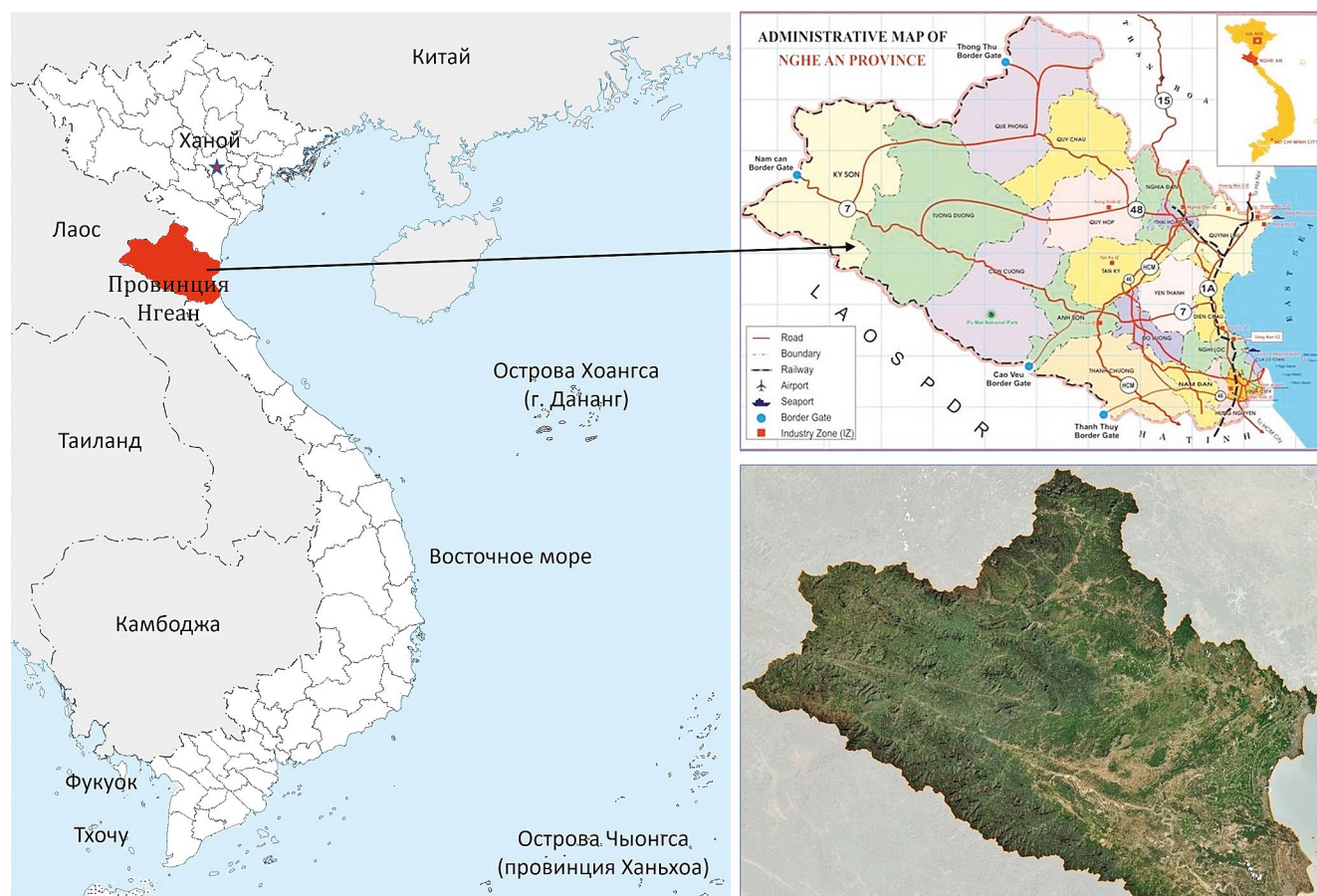


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории. Справа сверху – административная карта, внизу – Landsat изображение провинции Нгеан.

изображения Landsat 8 — для вычисления температуры земной поверхности. Данные дистанционного зондирования собирались и обрабатывались непосредственно на платформе облачных вычислений Google Earth Engine (GEE).

Для создания безоблачного изображения было отобрано 65 сцен Sentinel 2 MSI (Sentinel 2A и Sentinel 2B), сделанных за период с 15 ноября 2021 г. по 16 января 2022 г., затем вычислялся нормализованный разностный индекс растительности (NDVI). Для расчета температуры земной поверхности использовались мультиспектральные снимки Landsat 8 OLI_TIRS (трасса/ряд: 127/047, 127/046 и 128/046, сделанные за период с 15 ноября 2021 г. по 16 января 2022 г.). На рис. 2 представлены изображения Landsat 8 и Sentinel 2 западной части провинции Нгеан.

Методика обработки данных

В моделях прогнозирования риска возникновения лесных пожаров на исследуемой территории использовались следующие параметры:

1. Вегетационный индекс NDVI;
2. Поверхностная эвапотранспирация (по данным MODIS);
3. Высота местности над уровнем моря (DEM SRTM);
4. Наклон склона;
5. Экспозиция склона;
6. Скорость ветра;
7. Температура земной поверхности;

8. Среднемесячное количество осадков;
9. Плотность населения.

Индекс NDVI (Rouse et al., 1973) характеризовал количество фитомассы растительного покрова в моделях прогнозирования лесных пожаров и рассчитывался из значений спектральной отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном каналах Sentinel 2 MSI.

Эвапотранспирация поверхности вычислялась из набора спутниковых изображений MODIS на платформе GEE с пространственным разрешением 1000 м.

Температура земной поверхности рассчитывалась из данных теплового инфракрасного канала спутника Landsat 8 на основе модели HACA (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook>):

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}, \quad (1)$$

где T_B — яркостная температура поверхности (K); K_1 и K_2 — первая и вторая калибровочные константы, записанные в файле метаданных изображения Landsat.

Для расчета температуры поверхности использовался вегетационный индекс NDVI с учетом коэффициента излучения поверхности в соответствии с методом, предложенным Valor и Caseless (Valor и Caseless, 1996):

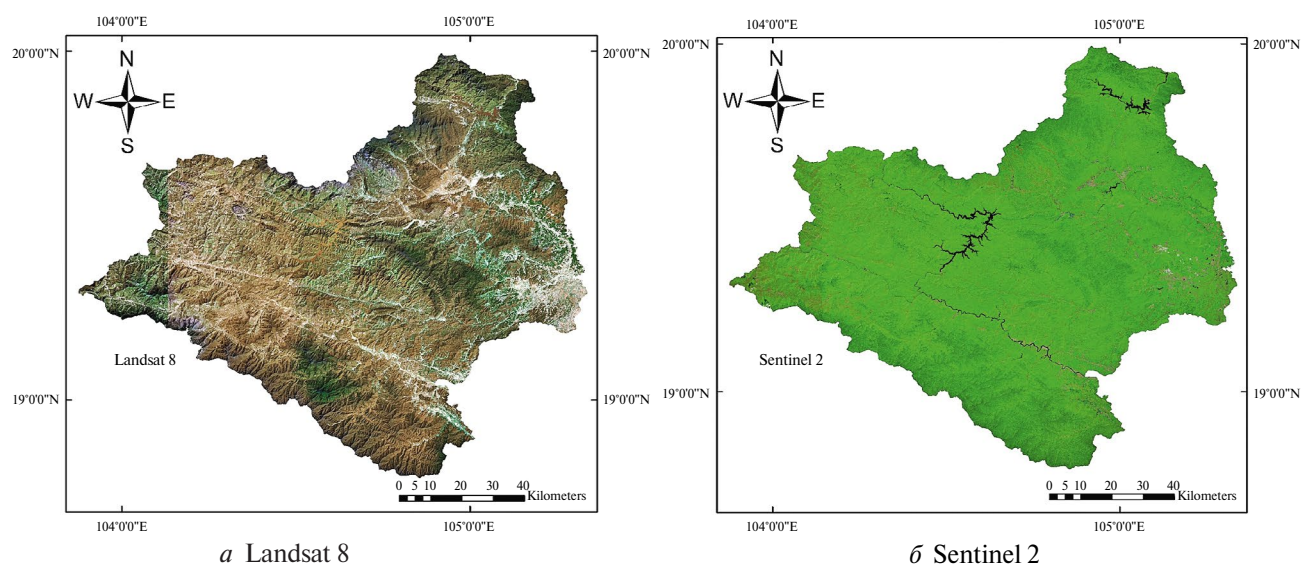


Рис. 2. Изображения Landsat 8 и Sentinel 2 района исследования.

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v), \quad (2)$$

где ε — коэффициент излучения от неоднородной поверхности;

ε_v — коэффициент излучения чистого растительного покрова;

ε_s — коэффициент излучения открытой почвы;

P_v — отношение площади растительности и почвы в пикселе, рассчитанное по формуле:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2. \quad (3)$$

В заключительной части алгоритма обработки данных осуществлялось вычисление поверхностной температуры (LST) по формуле:

$$LST = \frac{T_B}{1 + \frac{\lambda T_B}{\rho} \ln \varepsilon}, \quad (4)$$

где λ — длина волны;

ρ — константа ($1.438 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$).

Цифровая модель рельефа, построенная на основе Shuttle Radar Topography Mission (DEM SRTM) с пространственным разрешением 30 м, применялась для создания ГИС слоев топографических данных. Полученные данные были сохранены и отредактированы с помощью программного обеспечения ArcGIS10.

Данные о плотности населения на исследуемой территории получены из базы данных WorldPop (<https://data.worldpop.org/>). Данные о скорости ветра, среднемесечном количестве осадков, и поверхностная эвапотранспирация получены из базы данных WorldClim (<https://data.worldclim.org/>). Разрешение изображений, взятых из баз данных WorldPop и WorldClim, составляло 1000 м.

Все девять ГИС слоев данных модели прогнозирования лесных пожаров интерполировались до пространственного разрешения в 10 м для обеспечения согласованности по разрешению с изображениями Sentinel 2 MSI. Данные приводились к одинаковому пространственному разрешению с помощью алгоритма интерполяции ближайшего соседа.

Набор данных о пожарах включал 120 точек, собранных в период с 2019 по 2023 год на основе записей о пожарах Департамента охраны лесов, Министерства сельского хозяйства и развития сельских районов Вьетнама и данных о пожарах системы FIRMS (NASA) и 204 точки, на которых лесных пожаров в этот период не наблюдалось. Из всего набора данных о лесных пожарах 70% точек исполь-

зовались для обучения модели, а остальные 30% для проверки точности модели.

Обработка входных данных модели проводилась на платформе Google Earth Engine (GEE), предназначенной для анализа данных дистанционного зондирования. Результаты, полученные в GEE, совместимы с такими ГИС как, например, QGIS, ArcGIS, Foris. При обработке использовался язык программирования JavaScript и редактор кода (Code Editor), чтобы перенести данные изображений Landsat 8/9 и Sentinel 2 MSI на платформу и выполнить этапы обработки, анализа, отображения и вывода результатов. Все девять слоев данных создавались и обрабатывались на платформе GEE и затем использовались в модели.

Блок-схема методики картографирования риска лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования и ГИС представлена на рис. 3.

В вычислительном эксперименте выполнялось обучение компьютерных моделей, соответствующих трем выбранным алгоритмам машинного обучения (RF, SVM, CART). Каждый из представленных алгоритмов минимизировал функцию потерь, обучаясь на тестовом наборе точек. При оценке риска лесных пожаров по девяти ГИС-слоям каждому пикселу изображений присваивалась вероятность возникновения пожара, со значением от 0 до 1, что соответствует риску возникновения пожара от низкого до высокого. Оценка точности обучения осуществлялась на контрольном наборе точек двумя способами: визуально и на основе метрического показателя ROC-AUC. Варьируя параметрами моделей, была выбрана наиболее обученная модель (RF 100), с помощью которой выполнено районирование исследуемой территории на пожароопасность. Вероятность пожарной опасности леса для каждого пиксела была разбита на 5 уровней: “очень низкая” (0.1–0.4), “низкая” (0.4–0.65), “средняя” (0.65–0.8), “высокая” (0.8–0.9) и “очень высокая” (0.9–1.0), причем пороговые значения выбраны согласно исследованию (Nguyen et al., 2018). Результат районирования территории представлен на цветной картосхеме.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлена цифровая модель рельефа SRTM исследуемой территории с пространственным разрешением 30 м. Результаты построения информационных слоев высота местности над уровнем моря, наклон и экспозиция склона показаны на рис. 5а, 5б и 5в. На рис. 5г представлен информационный слой поверхностной эвапотранспирации. Слой растительного покрова (индекс NDVI)

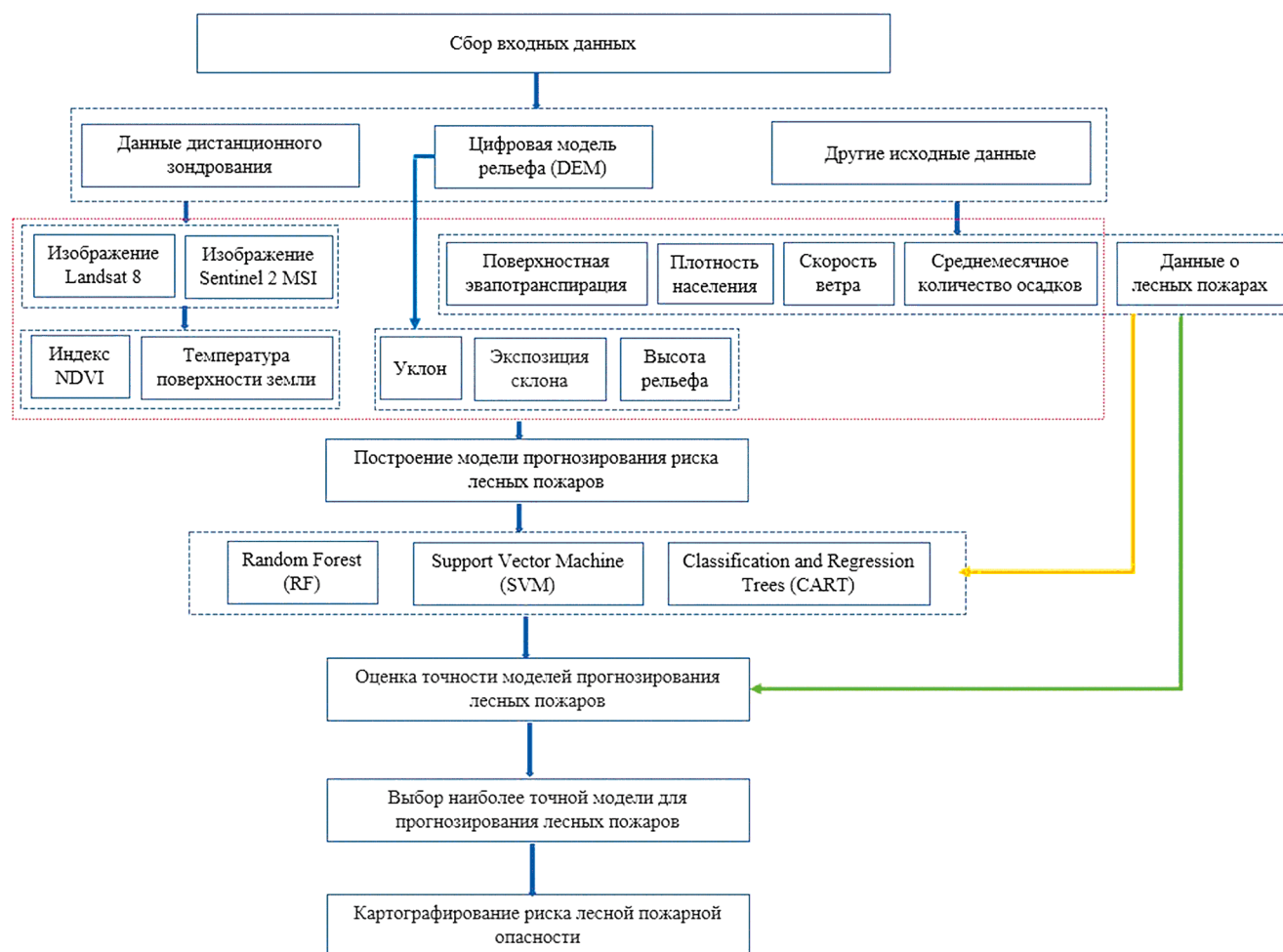


Рис. 3. Блок-схема методики картографирования риска лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования и ГИС.

и слой данных о температуре земной поверхности представлены на рис. 5д и 5е. Из рис. 5д следует, что значение индекса NDVI исследуемой территории изменяется в диапазоне от -0.74 до 0.85 , при этом растительность имеет положительные значения NDVI, большие, чем 0.2 . Открытая поверхность характеризуется значениями NDVI от 0 до 0.2 , водная поверхность имеет отрицательные значения NDVI.

Из рис. 5е следует, что на исследуемой территории температура поверхности колеблется в диапазоне от 15.1°C до 35.5°C . Участки с низкой температурой сосредоточены в горной местности с густым растительным покровом, участки с высокой температурой характерны для населенных территорий и открытой поверхности. Весь интервал температуры земной поверхности разделен на девять диапазонов.

Информационный слой скорость ветра показан на рис. 5ж. Из рисунка следует, что скорость ветра

варьирует в диапазоне от 1.5 до 2.9 м/с. На большей части исследуемой территории скорость ветра не превышала 1.9 м/с. Районы со скоростью ветра более 2 м/с сосредоточены в южной части исследуемой территории.

Информационный слой “среднемесячное количество осадков” показан на рис. 5з. Количество осадков варьирует от 113 мм/мес. до 164 мм/мес. Из рисунка следует, что в районе исследования количество осадков в основном ниже 130 мм/мес. Районы со среднемесячным количеством осадков более 130 мм/мес сосредоточены на юге изучаемой территории.

Информационный слой “плотность населения” представлен на рис. 5и. Как следует из рисунка, плотность населения колеблется от 3 чел./км² до 627 чел./км². Большая часть исследуемой территории с низкой плотностью населения (менее 25 чел./км²) сосредоточена в высокогорных, покрытых лесом

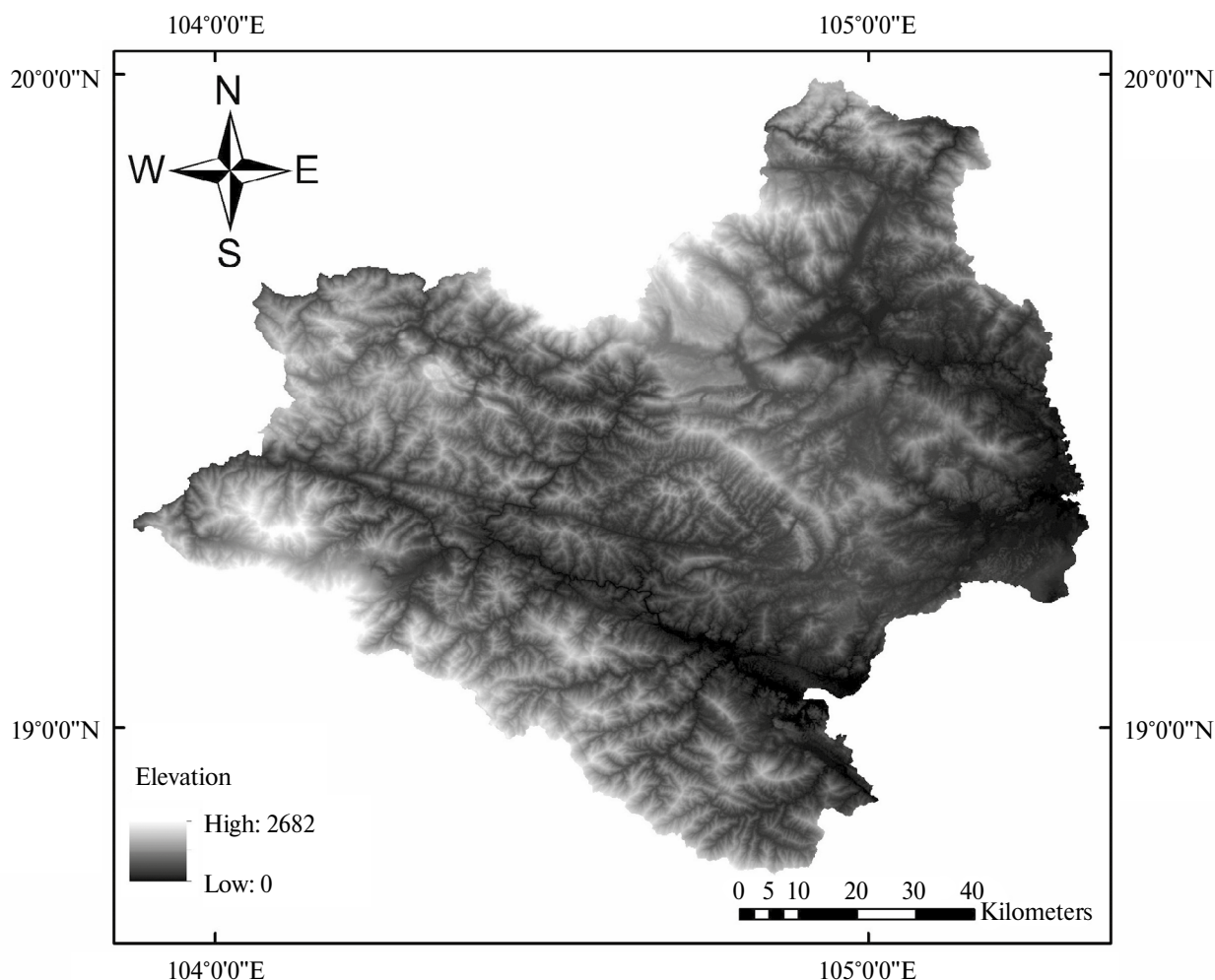


Рис. 4. Цифровая модель рельефа SRTM исследуемой территории.

районах. Районы с плотностью населения выше 100 чел./км² находятся в основном на востоке и юге изучаемой территории.

После обучения моделей RF, SVM, CART с помощью тестового набора данных о лесных пожарах было выполнено прогнозирование рисков возникновения лесных пожаров. Для оценки точности моделей прогнозирования использовался контрольный набор данных (база данных Департамента охраны леса), состоящий из 36 пожароопасных и 61 непожароопасных участков местности. Сравнение результатов прогнозирования лесных пожаров, полученных разными алгоритмами, представлено в табл. 1. Анализ полученных результатов показывает, что использование метода случайного леса со значением параметра “количество деревьев решений”, равным 100 (RF100), дает наиболее точные результаты районирования риска лесных пожаров. Из 36 точек прошлых лесных пожаров, 31 точка по-

пала в район с высокой и очень высокой степенью лесной пожарной опасности (что соответствует 86,11%), причем 23 точки попали в район с очень высокой степенью пожарной опасности.

Только 2 точки, где в прошлом произошли лесные пожары, попали в район с низким уровнем пожароопасности и 3 точки в район со средним уровнем опасности. В зоне с очень низким классом пожарной опасности точки с прошлыми лесными пожарами не были обнаружены. Большинство непожароопасных участков находились в районах с очень низкой (14/61 точки), низкой (25/61 точки) и средней (15/61 точки) пожарной опасностью. На территорию с высоким уровнем пожарной опасности попало всего 5 точек, а на территорию с очень высоким уровнем — 2 точки.

Площадь под кривой AUC (Under the Curve) рабочей характеристики классификатора ROC (receiver operating characteristic) является общепринятым

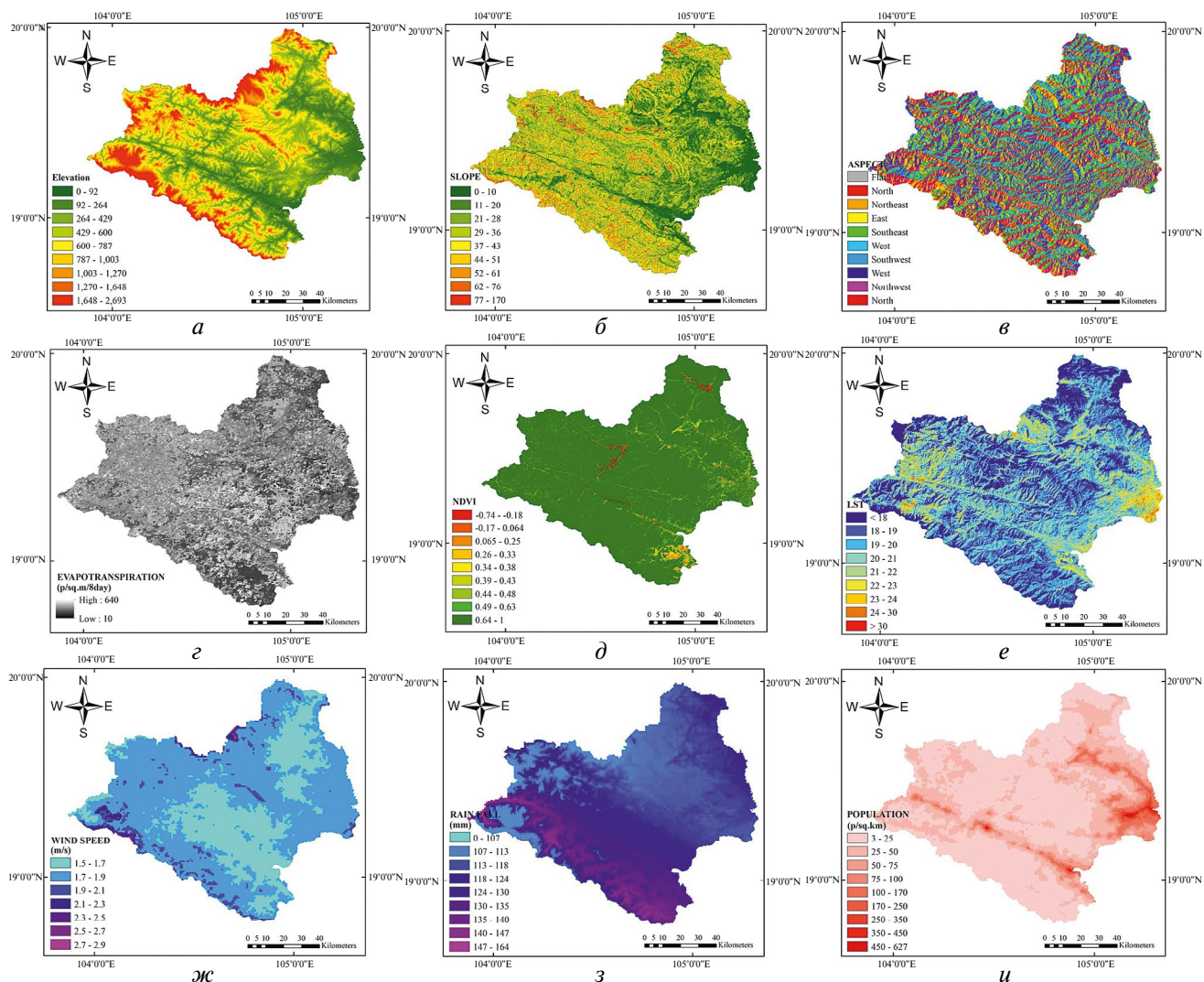


Рис. 5. Информационные слои – входные данные для моделей прогнозирования лесопожарной опасности: *а* – высота местности; *б* – наклон склона; *в* – экспозиция склона; *г* – поверхностная эвапотранспирация; *д* – вегетационный индекс NDVI; *е* – температура поверхности; *ж* – скорость ветра; *з* – среднее количество осадков; *и* – плотность населения.

измеряемым метрическим показателем точности модели. Значение AUC варьирует от 0 до 1, причем, чем больше значение AUC, тем лучшей является модель классификации данных. В табл. 2 представлен результат оценки лесопожарной опасности, основанный на логистической регрессии при классификации данных, который подтверждает, что метод RF100 имеет наибольшее значение $AUC = 0.951$.

Метод случайного леса с параметром “количество деревьев решений”, равным 100, использовался для построения картосхемы лесопожарной опасности западной части провинции Нгеан (рис. 6). Результаты районирования пожарной опасности исследуемой территории представлены в табл. 3. Анализ

полученных результатов показывает, что почти половина территории имеет средний уровень лесопожарной опасности, выделенный на рис. 6 желтым цветом. На территорию очень низкой и низкой пожарной опасности приходится 5.75% и 30% от общей площади, расположенной преимущественно на юго-востоке исследуемой территории. Территория высокой пожарной опасности составляет 16,68% общей площади и находится в западной части провинции Нгеан. При этом территория очень высокой пожарной опасности составляет 4.63% от общей площади и выделена красным на рис. 6. Такие участки характеризуются высокой плотностью населения, вторичными лесами и лесонасаждениями.

Таблица 1. Прогнозирование риска лесных пожаров методами RF, SVM, CART с разными параметрами

Метод	Территория	Уровень лесной пожарной опасности				
		Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
RF3	пожароопасная	0	3	6	8	19
	непожароопасная	11	18	21	9	2
RF100	пожароопасная	0	2	3	8	23
	непожароопасная	14	25	15	5	2
RF200	пожароопасная	2	2	9	20	3
	непожароопасная	8	17	17	12	7
CART5	пожароопасная	0	2	1	4	29
	непожароопасная	8	11	10	2	30
CART30	пожароопасная	0	2	2	8	24
	непожароопасная	10	19	2	1	29
SVM30	пожароопасная	0	3	2	25	6
	непожароопасная	0	5	3	38	15
SVM25	пожароопасная	1	3	11	18	3
	непожароопасная	3	17	8	28	5

Таблица 2. Значения AUC разных методов прогнозирования риска лесных пожаров

Метод	RF3	RF100	RF200	CART5	CART30	SVM25	SVM30
AUC	0.947	0.951	0.938	0.905	0.916	0.756	0.743

Таблица 3. Результаты районирования лесопожарной опасности исследуемой территории

№	Уровень лесной пожарной опасности	Площадь (га)	Площадь (%)
1	Очень низкий	636.65	5.75
2	Низкий	3271.13	29.56
3	Средний	4800.45	43.38
4	Высокий	1845.96	16.68
5	Очень высокий	511.35	4.63

ВЫВОДЫ

В работе для оценки риска пожарной опасности леса с помощью машинного обучения использовались метод случайного леса, метод опорных векторов, метод деревьев классификации и регрессии. Для обучения моделей прогнозированию учитывались такие факторы: наличие и состояние растительного покрова, поверхностная эвапотранспирация, высота местности, уклон и экспозиция склона, скорость ветра, температура земной поверхности, среднемесячное количество осадков и плотность населения территории.

Спутниковые изображения Sentinel 2 MSI и Landsat 8 применялись для создания слоев данных NDVI и температуры поверхности. Входные слои топографических данных, такие как уклон и экспозиции склона, высота местности, извлекались из цифровой модели рельефа SRTM с пространственным разрешением 30 м. Плотность населения, среднемесячные осадки, скорость ветра и поверхностная эвапотранспирация были получены из мировых баз данных WorldPop и WorldClim. Базы данных Департамента защиты лесов Министерства сельского хозяйства и развития сельских районов Вьетнама предоставили данные о произошедших лесных пожарах на исследуемой территории.

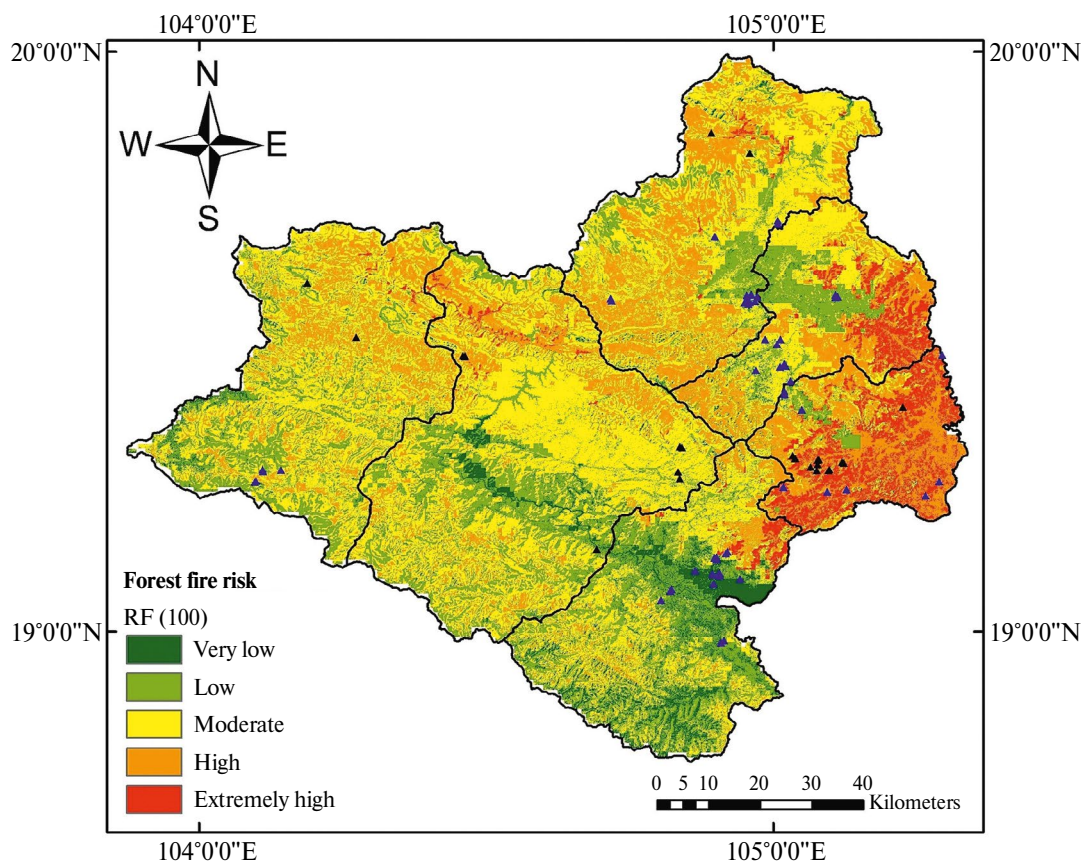


Рис. 6. Картограмма пожарной опасности леса (западная часть провинции Нгеан). Черные треугольники — местоположение бывших пожаров, синие треугольники — очаги возгорания, не переросшие в лесные пожары благодаря своевременному предупреждению.

Визуальное сравнение местоположений, прогнозируемых и произошедших в прошлом лесных пожаров, а также расположение непожароопасных территорий и вычисление значений AUC кривой ROC показывает, что метод случайного леса с параметром “количество деревьев решений”, равным 100, обладает наибольшей предсказательной точностью.

Разработанный на основе метода машинного обучения способ районирования риска лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования и ГИС может использоваться для мониторинга и раннего оповещения населения о лесопожарной опасности с целью снижения ущерба от лесных пожаров.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках научного проекта: “Исследование модели прогнозирования риска лесных пожаров с использованием геопространственных технологий на примере западного региона провинции Нгеан”, код: T23–38. Авторы благодарят Ханойский университет горного дела и геологии (HUMG – Hanoi University of Mining and Geology) за финансирование проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20. DOI: 10.7868/S0205961416060105.
- Бондур В.Г., Гордо К.А. Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55. DOI: 10.7868/S020596141803003X.
- Бондур В.Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. DOI: 10.7868/S0205961415060032.
- Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477. DOI: 10.7868/S0869565216040186.
- Arpaci A., Malowerschnig B., Sass O., Vacik H. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests // Applied Geography. 2014. V. 53. P. 258–270.
- Beals E.A. Weather forecasts in the problem of protecting forests from fire // Monthly Weather Review. 1914. V. 42. P. 111–119.

- Bui T.D., Bui Q.T., Nguyen Q.P., Pradhan B., Nampak H., Phan T.T. A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area, Agricultural and Forest Meteorology. 2017. V. 233. P. 32–44.
- Bui T.D., Le T.K.T., Nguyen V.C., Le H.D., Revhaug I. Tropical Forest Fire Susceptibility Mapping at the Cat Ba National Park Area, Hai Phong City, Vietnam, Using GIS-Based Kernel Logistic Regression // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 347. DOI: 10.3390/rs8040347.
- Chowdhury H., Hassan K. Use of remote sensing derived variables in developing a forest fire danger forecasting system // Natural Hazards. 2013. V.67. P. 321–334.
- Dang N.B.T. Study on the risk and warning of forest fire in Son La province based on the application of geoinformation technology // Geography Doctoral Thesis, Hanoi National University. 2021.
- Doan H.P. Developing algorithms for determining land surface temperature in forest fire warning monitoring based on MODIS satellite images (TERRA and AQUA) in the territory of Vietnam. Hanoi: Vietnam. Thesis of Doctor of Engineering. Hanoi University of Mining and Geology. 2007.
- Dong X. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China // Journal of Forestry Research. 2005. V. 16(3). P. 169–174.
- Fernandez J., Chuvieco E., Koutsias N. Modelling long-term fire occurrence factors in Spain by accounting for local variations with geographically weighted regression // Natural Hazards Earth System Sciences. 2012. V. 12. P. 1–17.
- Enoh M., Okeke U., Narinua N. Identification and modelling of forest fire severity and risk zones in the Cross – Niger transition forest with remotely sensed satellite data // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2021. V. 24(3). P. 879–887.
- Hererra V., Soon W., Moreno C., Hererra G., Dubois R., Cruz L., Fedorov V., Estrada S., Bongelli E., Zuniga E. Past and future of wildfires in Northern Hemisphere's boreal forests // Forest Ecology and Management. 2022. V. 504. 119859.
- Hoang V.T., Chou T., Fang Y., Nguyen N.T., Nguyen Q.H., Pham X.C., Dang N.B.T., Nguyen X.L., Meadows M. Mapping forest fire risk and development of early warning system for NW Vietnam using AHP and MCA/GIS methods // Applied Sciences. 2020. V. 10(12). 4348.
- Jaiswal R., Mukherjee S., Raju K., Saxena R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2002. V. 4(1). P. 1–10.
- Iban M., Sekertekin A. Machine learning based wildfire susceptibility mapping using remotely sensed fire data and GIS: A case study of Adana and Mersin provinces, Turkey // Ecological Informatics. 2022. V. 69. 101647.
- Nguyen N.T., Dang N.B.T., Pham X.C., Nguyen T.H., Bui T.H., Hoang D.N., Bui T.D. Spatial pattern assessment of tropical forest fire danger at Thuan Chau area (Vietnam) using GIS-based advanced machine learning algorithms: A comparative study // Ecological Informatics. 2018. V. 46. P. 74–85.
- Oliveira S., Oehler F., Ayanz J., Camia A., Pereira J. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest // Forest Ecology and Management. 2012. V. 275. P. 117–129.
- Pham N.H. Developing a method to predict forest fires *Pinus merkusii* J. in Quang Ninh province // Thesis of Doctor of Agricultural Science. Hanoi (in Vietnamese). 1988.
- Pourghasemi H. GIS-based forest fire susceptibility mapping in Iran: A comparison between evidential belief function and binary logistic regression models // Scandinavian Journal of Forest Research. 2015. P. 40. DOI: 10.1080/02827581.2015.1052750.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. // Third ERTS Symposium. 1973. NASA SP-351. P. 309–317.
- Ruano A., Jolly W., Freeborn P., Nieva D., Vega N., Herrera C., Rodrigues M. Spatial Predictions of Human and Natural-Caused Wild-fire Likelihood across Montana (USA) // Forests 2022. V. 13(8). 1200.
- Sivrikaya F., Kucuk O. Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region // Ecological Informatics. 2022. V. 68. 101537.
- Tran Q.B., Phung N.T., Le N.H. Research on designing new software for early detection of forest fires from MODIS satellite image. // Journal of Agriculture and Rural Development. 2016. V. 21. P. 114–120.
- Tran V.H., Vo Q.M., Vo T.G. Geographic information system (GIS) approach in forest fire warning methodology development for U Minh Ha national park // Science Journal of Can Tho University. 2010. V. 14. P. 97–106.
- Trinh L.H., Zablotkii V.R. The application of Landsat multi-temporal thermal infrared data to identify coal fire in the Khanh Hoa coal mine, Thai Nguyen province, Vietnam // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53(9). P. 1181–1188.
- Trinh L.H. Studies of land surface temperature distribution using multispectral image Landsat // Vietnam Journal of Earth Sciences. 2014. V. 36(1). P. 82–89.
- Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 57. P. 167–184.
- Vasilakos C., Kalabokidis K., Hatzopoulos J., Matsinos T. Identifying wildland fire ignition factors through sensitivity analysis of a neural network // Natural Hazards. 2009. V. 50. P. 125–143.
- Vo D.T. Methods of forecasting, mapping and zoning the key areas of forest fires in Binh Thuan // Forestry Journal. 1995. V. 10. P. 11–14 (in Vietnamese).
- Vuong V.Q. Research and develop solutions to prevent and overcome the consequences of forest fires for the U Minh and Central Highlands regions // Summary report of topic KC08.24. 2005.
- Yassemi S., Dragicevic S., Schmidt M. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behavior // Ecological Modelling. 2008. V. 210. P. 71–84.
- Williams M. Remote sensing, GIS and wildland fire management: A global perspective // Proceedings of the International Workshop on Satellite Technology and GIS for Mediterranean Forest Mapping and Fire Management. 1983.
- Wimberly M., Reilly M. Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 108(2). P. 189–197.
- <https://www.worldclim.org/>. Accessed April 12. 2023.
- <https://data.worldpop.org/>. Accessed April 12. 2023.
- <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook>. Accessed March 8. 2023.
- <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps>. Accessed April 15. 2023.

Forest Fire Risk Assessment and Mapping Using Remote Sensing and GIS Techniques: A Case Study in Nghe An Province, Vietnam

**Thi Nam Phuong Doan¹, Le Hung Trinh², V. R. Zablotskii³, Van Trung Nguyen¹,
Xuan Truong Tran¹, Thi Thanh Hoa Pham¹, Thi Thu Ha Le¹, Van Phu Le²**

¹*Geomatics in Earth Sciences Research Group, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam*

²*Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam*

³*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia*

This paper presents the results of modeling the risk of forest fires in the west of Nghe An Province (north-central Vietnam) using remote sensing and GIS data. The nine factors influencing the risk of forest fires, including vegetation cover (NDVI vegetation index), surface evapotranspiration, elevation (DEM), slope (slope), aspect, wind speed, ground surface temperature, average monthly precipitation and population density are used to build a forest fire risk mapping model based on machine learning methods, including Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and Classification and Regression Trees (CART). Various parameters are tested in the RF, SVM, CART algorithms to select the algorithm with the highest accuracy in forest fire risk prediction. The obtained results show that the RF algorithm with the value of the numberOfTrees parameter equal to 100 has the highest accuracy in predicting the risk of forest fires in the study area, expressed through the location of the distribution of forest fire points, as well as the AUC value on the ROC curve. The results obtained in the study can be effectively used for monitoring and early warning of forest fire danger in settlements, helping to reduce damage from forest fires.

Keywords: forest fire risk, remote sensing, GIS, support vector machine algorithm, Nghe An province

REFERENCES

- Bondur V.G., Gordo K.A., Kladov V.L.* Spacetime distributions of wildfire areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols in northern Eurasia according to satellite-monitoring data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53. No. 9. P. 859–874. DOI: 10.1134/S0001433817090055.
- Bondur V.G., Gordo K.A.* Satellite monitoring of burnt-out areas and emissions of harmful contaminants due to forest and other wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. Vol. 54. No. 9. P. 955–965. DOI: 10.1134/S0001433818090104.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52. No. 9. P. 1078–1091. DOI: 10.1134/S0001433816090103.
- Bondur V.G., Ginzburg A.S.* Emission of Carbon-Bearing Gases and Aerosols from Natural Fires on the Territory of Russia Based on Space Monitoring // *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 466. No. 2. P. 148–152. DOI: 10.1134/S1028334X16020045.
- Arpaci A., Malowerschnig B., Sass O., Vacik H.* Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests // *Applied Geography*. 2014. V. 53. P. 258–270.
- Beals E.A.* Weather forecasts in the problem of protecting forests from fire // *Monthly Weather Review*. 1914. V. 42. P. 111–119.
- Bui T.D., Bui Q.T., Nguyen Q.P., Pradhan B., Nampak H., Phan T.T.* A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area, Agricultural and Forest Meteorology. 2017. V. 233. P. 32–44.
- Bui T.D., Le T.K.T., Nguyen V.C., Le H.D., Revhaug I.* Tropical Forest Fire Susceptibility Mapping at the Cat Ba National Park Area, Hai Phong City, Vietnam, Using GIS-Based Kernel Logistic Regression // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. P. 347. DOI:10.3390/rs8040347.
- Chowdhury H., Hassan K.* Use of remote sensing derived variables in developing a forest fire danger forecasting system // *Natural Hazards*. 2013. V. 67. P. 321–334.
- Dang N.B.T.* Study on the risk and warning of forest fire in Son La province based on the application of geoinformation technology // *Geography Doctoral Thesis*, Hanoi National University. 2021.
- Doan H.P.* Developing algorithms for determining land surface temperature in forest fire warning monitoring based on MODIS satellite images (TERRA and AQUA) in the territory of Vietnam // *Thesis of Doctor of Engineering*. Hanoi University of Mining and Geology. 2007.
- Dong X.* Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China // *Journal of Forestry Research*. 2005. V. 16(3). P. 169–174.
- Fernandez J., Chuvieco E., Koutsias N.* Modelling long-term fire occurrence factors in Spain by accounting for local variations with geographically weighted regression // *Natural Hazards Earth System Sciences*. 2012. V. 12. P. 1–17.
- Enoh M., Okeke U., Narinua N.* Identification and modelling of forest fire severity and risk zones in the Cross – Niger transition forest with remotely sensed satellite data // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021. V. 24(3). P. 879–887.
- Hererra V., Soon W., Moreno C., Hererra G., Dubois R., Cruz L., Fedorov V., Estrada S., Bongelli E., Zuniga E.* Past and future of wildfires in Northern Hemisphere's boreal forests // *Forest Ecology and Management*. 2022. V. 504. 119859.
- Hoang V.T., Chou T., Fang Y., Nguyen N.T., Nguyen Q.H., Pham X.C., Dang N.B.T., Nguyen X.L., Meadows M.* Mapping forest fire risk and development of early warning system for NW Vietnam using AHP and MCA/GIS methods // *Applied Sciences*. 2020. V. 10(12). 4348.
- Jaiswal R., Mukherjee S., Raju K., Saxena R.* Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS // *International Journal*

- of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2002. V. 4(1). P. 1–10.
- Iban M., Sekertekin A.* Machine learning based wildfire susceptibility mapping using remotely sensed fire data and GIS: A case study of Adana and Mersin provinces, Turkey // *Ecological Informatics*. 2022. V. 69. 101647.
- Nguyen N. T., Dang N. B. T., Pham X. C., Nguyen T. H., Bui T. H., Hoang D. N., Bui T. D.* Spatial pattern assessment of tropical forest fire danger at Thuan Chau area (Vietnam) using GIS-based advanced machine learning algorithms: A comparative study // *Ecological Informatics*. 2018. V. 46. P. 74–85.
- Oliveira S., Oehler F., Ayanz J., Camia A., Pereira J.* Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest // *Forest Ecology and Management*. 2012. V. 275. P. 117–129.
- Pham N. H.* Developing a method to predict forest fires *Pinus merkusii* J. in Quang Ninh province // Thesis of Doctor of Agricultural Science. Hanoi (in Vietnamese). 1988.
- Pourghasemi H.* GIS-based forest fire susceptibility mapping in Iran: A comparison between evidential belief function and binary logistic regression models // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2015. P. 40. DOI: 10.1080/02827581.2015.1052750.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. // Third ERTS Symposium. 1973. NASA SP-351 P. 309–317.
- Ruano A., Jolly W., Freeborn P., Nieva D., Vega N., Herrera C., Rodrigues M.* Spatial Predictions of Human and Natural-Caused Wildfire Likelihood across Montana (USA) // *Forests* 2022. V.13(8). 1200.
- Sivrikaya F., Kucuk O.* Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region // *Ecological Informatics*. 2022. V. 68. 101537.
- Tran Q. B., Phung N. T., Le N. H.* Research on designing new software for early detection of forest fires from MODIS satellite image. // *Journal of Agriculture and Rural Development*. 2016. V. 21. P. 114–120.
- Tran V. H., Vo Q. M., Vo T. G.* Geographic information system (GIS) approach in forest fire warning methodology development for U Minh Ha national park // *Science Journal of Can Tho University*. 2010. V. 14. P. 97–106.
- Trinh L. H., Zablotskii V. R.* The application of Landsat multi-temporal thermal infrared data to identify coal fire in the Khanh Hoa coal mine, Thai Nguyen province, Vietnam // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53(9). P. 1181–1188.
- Trinh L. H.* Studies of land surface temperature distribution using multispectral image Landsat // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 2014. V. 36(1). P. 82–89.
- Valor E., Caselles V.* Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas // *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 57. P. 167–184.
- Vasilakos C., Kalabokidis K., Hatzopoulos J., Matsinos T.* Identifying wildland fire ignition factors through sensitivity analysis of a neural network // *Natural Hazards*. 2009. V. 50. P. 125–143.
- Vo D. T.* Methods of forecasting, mapping and zoning the key areas of forest fires in Binh Thuan // *Forestry Journal*. 1995. V. 10. P. 11–14 (in Vietnamese).
- Vuong V. Q.* Research and develop solutions to prevent and overcome the consequences of forest fires for the U Minh and Central Highlands regions // Summary report of topic KC08.24. 2005.
- Yassemi S., Dragicevic S., Schmidt M.* Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behavior // *Ecological Modelling*. 2008. V. 210. P. 71–84.
- Williams M.* Remote sensing, GIS and wildland fire management: A global perspective // *Proceedings of the International Workshop on Satellite Technology and GIS for Mediterranean Forest Mapping and Fire Management*. 1983.
- Wimberly M., Reilly M.* Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 108(2). P. 189–197.
- <https://www.worldclim.org/>. Accessed April 12. 2023.
- <https://data.worldpop.org/>. Accessed April 12. 2023.
- <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook>. Accessed March 8. 2023.
- <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps>. Accessed April 15. 2023.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИНФОРМАТИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛУГОВОЙ И СТЕПНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ХАКАСИИ ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2024 г. А. П. Шевырнов¹, И. Ю. Ботвич¹ *, Т. И. Письман¹, А. И. Волкова²,
Н. А. Кононова¹, С. А. Иванов¹

¹Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

²Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Россия

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

Поступила в редакцию 02.08.2023 г.

В статье представлены результаты оценки возможности идентификации луговой и степной растительности Хакасии по наземным и спутниковым данным MODIS и LANDSAT 8 в течение вегетационного сезона 2017 г. По результатам полевых геоботанических исследований показано, что продуктивность растительности луга превышает продуктивность степной растительности. В результате наземных спектральных измерений показано, что мониторинг спектральной отражательной способности луговой и степной растительности может использоваться для их идентификации. При анализе спутниковых данных MODIS (на основе индекса NDVI, усовершенствованного индекса EVI, индекса влажности земной поверхности LSWI, индекса листовой поверхности LAI, интенсивности поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR и чистой первичной продукции NPP) выявлено, что значения исследованных индексов для луговой растительности значительно превышают значения для степной растительности. В то же время радиационная температура LST для степной растительности выше, чем для луговой. Определены высокие положительные корреляционные связи между вегетационными индексами, характеризующими биомассу (NDVI, EVI, LAI, NPP) и гидротермическими условиями (LSWI, FPAR) для луговой и степной растительности. Однако коэффициенты корреляции между NDVI и LST, EVI и LST для степной растительности низкие. На основе полученных карт пространственного распределения индекса NDVI луговой и степной растительности по данным Landsat 8 за 29 июля показано, что индекс NDVI достоверно различается для исследуемых типов растительности. Для луговой растительности значение NDVI значительно больше, чем для степной.

Ключевые слова: растительность, спутниковые данные, MODIS, LANDSAT 8, вегетационные индексы, наземное спектрофотометрирование, геоботанические исследования, луг, степь

DOI: 10.31857/S0205961424010028, **EDN:** GNCMTK

ВВЕДЕНИЕ

Природные экосистемы суши обладают многообразными функциями. Они являются источником биологических ресурсов для человека, естественными хранилищами видового разнообразия и важными регуляторами биогеохимических циклов многих веществ, включая воду и диоксид углерода.

В настоящее время первостепенное значение имеет задача сохранения биологического разнообразия луговых и степных экосистем. Особенно это актуально для Хакасии, поскольку растительность республики активно используется в качестве сенокосов и пастбищ.

Природная растительность республики Ха-

касия, используемая для выпаса и сенокошения, сформировалась и существует в течение многих тысячелетий. Но бессистемное ее использование привело к тому, что большая часть площади таких травостоев находится на разных стадиях пастбищной дигрессии. Это остается одной из актуальных проблем Хакасии.

Для интенсификации животноводства требуется создание устойчивой кормовой базы, в том числе за счет лугового кормопроизводства, важного источника производства объемистых кормов. Поддержание высокой урожайности фитоценозов на сенокосах и пастбищах является одной из задач луговодства (Родионова, Тебердиев, 2017).

Являясь источником биологически ценных кормов из дикорастущих трав, природные кормовые угодья (сенокосы и пастбища) 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 трудоемкости и больших размеров территорий, требующих обследования, не способны обеспечить регулярное получение информации с достаточно высоким уровнем точности (Ерошенко и др., 2018).

Анализ динамики естественных объектов, содержащих растительные компоненты, давно и успешно проводится с применением данных дистанционного зондирования Земли из космоса для различных регионов, как северных, так и южных (Бондур, Воробьев, 2015). Изменение растительного покрова, происходящее в течение вегетационного периода, а также в результате болезней, воздействия вредителей, антропогенного вмешательства приводит к изменению спектральных отражательных характеристик (Шукилович и др., 2016).

Спутниковый мониторинг температуры поверхности Земли из космоса реализуется уже несколько десятилетий. Результаты дистанционного определения температуры подстилающей поверхности по спутниковым данным используются в задачах численного анализа и прогноза погоды, гидрологии и агрометеорологии, исследованиях климата и глобальных изменений (Поляков и др., 2010).

Получение надежных оценок водообеспеченности больших по площади территорий сельскохозяйственных районов является важной задачей для организации рационального водопользования и успешного ведения сельского хозяйства. Оценки количества выпадающих осадков, запасов почвенной влаги, как одного из основных показателей водообеспеченности, могут быть объединены в рамках исследования динамики водного режима территорий (Музылев и др., 2019).

В работе Adamovich et al., (2019) показаны возможности использования мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли и полевых исследований для выделения растительных сообществ на примере государственного природного заказника “Пижемский” Кировской области. Использование нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI позволило выделить сосновые, лиственные леса и луговые

фитоценозы, а также распознать водные объекты и открытые почвы.

Цель данной работы – оценка возможности идентификации луговой и степной растительности Хакасии по наземным и спутниковым данным MODIS и LANDSAT в течение вегетационного сезона 2017 г. Для этого будут использованы различные вегетационные индексы и показатели (нормализованный дифференциальный вегетационный индекс NDVI, усовершенствованный вегетационный индекс EVI, индекс влажности земной поверхности LSWI, индекс листовой поверхности LAI, интенсивность поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR, чистая первичная продукция NPP и радиационная температура LST).

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования. Исследования проводились на двух стационарных участках, различающихся по типам растительности, расположенных в Ширинском районе республики Хакасия в течение вегетационного сезона 2017 г. (рис. 1). Участок № 1 (далее – луг) располагается в предгорьях Кузнецкого Алатау у северо-восточного подножия г. Кошулак в междуречье р. Колодзул и р. Кокчул (N54.51984, E89.73734). Участок № 2 (далее – степь) располагается в окрестностях с. Ворота в 50 км от районного центра п. Ши́ра (N54.70534, E90.53529).

Ширинский район Республики Хакасия располагается в ее северо-западной части и занимает территорию 6809 кв. км. По характеру природных условий территория Ширинского района принадлежит двум крупным географическим провинциям – горной системе Кузнецкого Алатау и Чебаково-Балахтинской впадине Минусинской котловины, являющимися составной частью Алтае-Саянской горной области.

Климат Ширинского района резко-континентальный, с холодной зимой и прохладным летом. Выпадение осадков по территории неравномерное. В центральной части Ширинского района за год их количество составляет от 340 до 460 мм. Осадки имеют ярко выраженный летний тип (за наиболее важный период активной вегетации растений их выпадает 40–50%). Минимум осадков приходится на май, максимум – на июль-август.

Объектом исследования являлись растительные сообщества настоящего суходольного злаково-разнотравного луга (участок № 1 – луг) и настоящей мелкодерновинной степи (участок № 2 – степь), имеющие существенные различия в структурно-функциональной организации растительного покрова.

Наземные (геоботанические) методы исследований.

Полевые геоботанические исследования проводились в течение вегетационного сезона 2017 г. (даты выездов: 3 июня, 18 июля, 27 августа). Исследуемые территории относятся к луговому и степному типу растительности. При проведении геоботанических описаний определены видовой состав растений, структура фитоценозов, продуктивность (сырая надземная фитомасса) и общее проективное покрытие травостоя.

Для определения сырой надземной фитомассы в пределах каждой пробной площадки (100 м²) были взяты укосы с 1 м² в четырехкратной повторности. Укосы разбирались по следующим ботаническим группам: осоки, злаки, бобовые, полыни, остальное разнотравье. Предварительно определялась общая сырая масса укосов (Зоркина, 2003). Все полученные результаты пересчитывались в г/м².

Проективное покрытие определено визуально. Проективное покрытие является одним из ключевых параметров растительного покрова и характеризует степень покрытия почвы фитомассой растений. Математически проективное покрытие определяется как отношение проекции побегов и листьев к общей площади участка и выражается в долях или процентах. Латинские названия приведены по сводке Черепанова (1995).

Наземные спектрофотометрические методы. Наземные измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) проводились одновременно с геоботаническими исследованиями в течение вегетационного сезона 2017 г. (03.06; 18.07; 27.08). Для проведения наземной спектрометрии использовался полевой спектрометрический комплекс, состоящий из полевого портативного спектрорадиометра Spectral Evolution PSR-1100F, портативного компьютера PDA GETAC, калибровочного отражающего эталона (Spectral Evolution), цифрового фотоаппарата и соответствующего программного обеспечения (Ботвич и др., 2017). 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. Измерение КСЯ травянистой растительности с помощью спектрорадиометра проводилось на одних и тех же тестовых участках в разные периоды вегетации. Измерения выполнялись с 11 до 15 часов местного времени, что на широте проводимых работ обеспечивало близкие условия освещения объектов.

Спутниковые данные. Для анализа сезонной динамики луговой и степной растительности использовались следующие вегетационные индексы и показатели по данным MODIS:



Рис. 1. Карта расположения исследуемых площадок Ширинского района, где 1 — луг; 2 — степь (описание участков находится в тексте).

– Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Индекс NDVI вычисляется по формуле:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red),$$

где NIR – отражение в ближней ИК-области, RED – отражение в красной области спектра (Rouse et al., 1974).

– Усовершенствованный вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index) – улучшенный индекс биомассы растений, представляющий собой модификацию нормализованного относительного индекса растительности NDVI. Индекс EVI вычисляется по формуле:

$$EVI = (NIR - Red) / (NIR + C1 \times Red - C2 \times BLUE + L) \times (1 + L),$$

где Blue – отражение в синей области спектра. Коэффициенты C1, C2 и L эмпирически установлены равные 6.0, 7.5, и 1 соответственно (Rouse et al., 1974).

– Индекс влажности земной поверхности LSWI (Land Surface Water Index) рассчитывается при использовании коротковолновых (SWIR) и ИК (NIR) областей электромагнитного спектра. В SWIR наблюдается сильное поглощение света водой, и известно, что LSWI чувствителен к общему количеству воды в растительности и ее почвенном фоне (Xiao et al., 2002).

– Индекс листовой поверхности LAI (Leaf Area Index), определяемый как отношение общей площади “односторонней” (“освещенной”) листовой поверхности к единице площади горизонтальной проекции кроны на поверхность земли (Justice et al., 1998).

– Интенсивность поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) позволяет оценить долю радиации в “фотосинтетически активном” диапазоне волн (380–710 нм), поглощаемую растительным покровом (Барталев и др., 2011).

– Значения чистой первичной продукции NPP (Net Primary Productivity) были получены на основе данных сканера MODIS спутника Тетра. В работе использовался продукт MOD17. Данные представляют собой композитные изображения, временной шаг восемь дней, рассчитанные на основе модели MODIS NPP (Ларько и др., 2015). Чистая первичная продукция обусловлена продукционным процессом и является важным показателем круго-

ворота (или цикла) углерода в экосистемах. NPP означает интенсивность накопления органического вещества и углерода за определенный период времени (т·га-1·год-1, или т С·га-1·год-1, или г/м2 сут) (Justice et al., 1998).

– Радиационная температура (LST), восстановленная по спутниковым данным, дает информацию о температуре поверхности исследуемого объекта (верхней границы растительного покрова, почвы). Данные о радиационной температуре восстановлены по измерениям радиометром MODIS в тепловых ИК-каналах (Соловьев, Успенский, 2009).

Для определения вегетационных индексов NDVI, EVI, LSWI используются спутниковые снимки с пространственным разрешением 250 и 500 м (продукты MOD09Q1, MOD09A1). Для определения показателей растительности NPP, FPAR, LAI и радиационной температуры LST используются спутниковые изображения с пространственным разрешением 1 км (продукты MOD17A2H, MOD15A2H, MOD11A2).

Карты пространственного распределения индекса NDVI луговой и степной растительности Хакасии получены по данным Landsat за 29 июля 2017 г. Пространственное разрешение – 30 м.

Используемые длины волн при расчете NDVI: для Modis красный канал – 620–670 нм, БИК – 841–876 нм; для Landsat-8 – 630–680 нм и 845–885 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наземное геоботаническое исследование. Накопление фитомассы является одной из основных эколого-биологических характеристик, отражающих функциональное состояние растительного покрова. Величина наземной фитомассы и соотношение ее основных компонентов зависит в значительной мере от видового состава растительности, проективного покрытия травостоя, а также от степени антропогенного воздействия.

В табл. 1 представлена продуктивность злаково-разнотравного растительного сообщества, которое относится к луговому типу (настоящий суходольный луг). Оно расположено на равнинном участке, окруженным со всех сторон березово-лиственничным лесом с остепненным разнотравно-злаковым покровом. Структура травостоя сложная, включает практически все виды хозяйственно-ботанических групп. В начале вегетационного сезона отмечено высокое обилие разнотравья, состоящего из раннелетнецветущих видов, имеющих короткий жизненный цикл. В середине вегетационного сезона происходит смена доминирующих видов, доля разнотравья возрастает до 74%. Заметно

Таблица 1. Продуктивность растительности настоящего суходольного злаково-разнотравного луга и настоящей мелкодерновинной степи в течение вегетационного сезона 2017 г.

Настоящий суходольный злаково-разнотравный луг	Продуктивность, г/м ²	Продуктивность, г/м ²	Продуктивность, г/м ²
Злаково-разнотравное сообщество	Июнь	Июль	Август
Злаки	92	56.4	376
Разнотравье	630.4	843.36	170.4
Осоки	69.2	50.72	—
Бобовые	40	119.2	63.2
Полыни	—	—	—
Ветошь	173.2	70.2	38.08
Сумма	831.6	1069.76	609.6
Разнотравно-злаково-полынное сообщество	Июнь	Июль	Август
Злаки	8	42.24	14.32
Разнотравье	3.4	8.04	11.96
Осоки	38.8	3.72	35.2
Бобовые	—	—	—
Полыни	42.4	17.36	188.96
Ветошь	38	59.44	29.36
Сумма	92.6	71.36	250.44

участие бобовых (10%). Злаковая основа имеет минимальное участие. В конце вегетационного сезона происходит завершение жизненного цикла у доминирующего разнотравья, доля злаков составляет 64%.

Разнотравно-злаково-полынное растительное сообщество (табл. 1) относится к настоящим мелкодерновинным степям. Сообщество, подверженное пастбищной нагрузке, находится на крутом склоне в условиях избыточной инсоляции, что приводит к формированию разреженного травостоя с низким проективным покрытием. Структура травостоя сложная, характеризуется небольшим участием разнотравья. Обилие осок и полыни свидетельствует о низкой кормовой ценности сообщества. В середине вегетационного сезона заметно возрастает участие злаков. В конце вегетационного сезона, за счет наступления плодоношения доминирующей полыни, участие последней возрастает до 54%.

Видовой состав и динамика проективного покрытия настоящего суходольного злаково-разнотравного луга и настоящей мелкодерновинной степи представлено в табл. 2. Злаково-разнотравное растительное сообщество относится к настоящим суходольным лугам. Общее проективное покрытие фитоценоза 80–100%. Травостой в основном равномерный по видовому составу (табл. 2). Высота травостоя с учетом генеративных побегов крупного

разнотравья может достигать 120 см., но основная доля фитомассы сосредоточена до 55–60 см. Ведущую фитоценотическую роль в формировании злаково-разнотравного сообщества выполняют 5 видов. В основном это: овсяница луговая, тимopheвка степная, лютик многоцветковый, осока стоповидная и тмин обыкновенный.

Разнотравно-злаково-полынное растительное сообщество относится к настоящим мелкодерновинным степям (табл. 2.) Оно располагается в нижней трети склона южной экспозиции урочища Гора Разлуки окрестностей вблизи села Ворота. Общее проективное покрытие фитоценоза – 30–55%. Видовая насыщенность на 1м² – 14–16 видов. Ведущую фитоценотическую роль выполняют 5 видов. В основном это: тонконог гребенчатый, овсяница валлиская, ковыль волосатик, овсяница ложноовечья, типчак и полынь холодная.

Далее проводится анализ связи геоботанических свойств объектов с изменчивостью спектрофотометрических характеристик, определяемых методом ДЗЗ.

Наземная спектрофотометрия. Использование наземных спектральных оптических измерений становится одним из актуальных и востребованных методов полевого изучения растительности. Известно, что спектры отражения растительных сообществ качественно и количественно зависят от

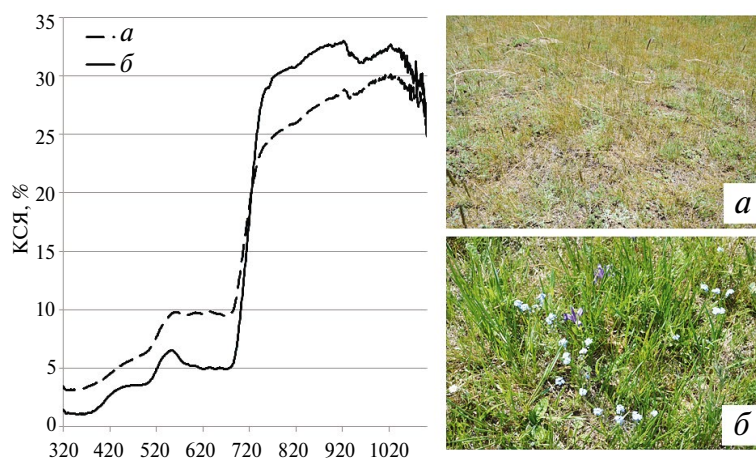
Таблица 2. Доминирующий видовой состав и динамика проективного покрытия (ПП) настоящего суходольного злаково-разнотравного луга и настоящей мелкодерновинной степи в течение вегетационного сезона 2017 г.

	Настоящий суходольный злаково-разнотравный луг	Июнь	Июль	Август
	Злаково-разнотравное сообщество	ПП, %	ПП, %	ПП, %
Вид растения				
1	Овсяница луговая (<i>Festuca pratensis</i> Huds.)	4	5	6
2	Тимофеевка степная (<i>Phleum phleoides</i> (L.) Karst)	6	8	8
3	Осока стоповидная (<i>Carex pediformis</i> C.A. Mey.)	4	2	2
4	Лютик многоцветковый (<i>Ranunculus polyanthemos</i> L.)	6	4	3
5	Тмин обыкновенный (<i>Carum carvi</i> L.)	3	4	5
Настоящая мелкодерновинная степь				
Разнотравно-злаково-полынное сообщество				
Вид растения				
1	Тонконог гребенчатый (<i>Koeleria cristata</i> (L.) Pers.)	8	6	4
2	Овсяница валлиская (<i>Festuca valesiaca</i> Gaudin)	4	3	2
3	Ковыль волосатик (<i>Stipa capillata</i> L.)	2	2	3
4	Овсяница ложноовечья, типчак (<i>Festuca pseudovina</i> Hack. Ex Wiesb.)	4	2	1
5	Полынь холодная (<i>Artemisia frigida</i> Willd.)	4	6	10

видового состава фитоценоза, содержания влаги, фенологического состояния, условий произрастания и других факторов. Спектральные данные, полученные при наземных измерениях КСЯ, можно использовать для интерпретации спутниковых измерений и мониторинга растительного биоразнообразия. Изучение травянистых растительных сообществ на выбранных подспутниковых участках с помощью полевого спектрометра в течение вегетационного сезона (рис. 2) проводилось для отработки методов повышения точности дешифрирования растительности.

Параметры растительного покрова существенно влияют на отражательные свойства системы почва–растительность. Установлено, что при относительно небольшом количестве зеленой массы (степь) спектры отличаются меньшим спектральным контрастом в различных участках спектра (рис. 2, кривая а). При увеличении зеленой массы (луг) характер кривых КСЯ изменяется, постепенно приобретая признаки, характерные для зеленой растительности (рис. 2, кривая б).

Спутниковый мониторинг. На основе спутниковых данных MODIS приводится анализ сезонной

**Рис. 2.** График коэффициента спектральной яркости (КСЯ) растительности настоящей мелкодерновинной степи (а) и настоящего суходольного злаково-разнотравного луга (б) и их фотоизображения (4–5 июня 2017 г.).

динамики различных вегетационных индексов и показателей, характеризующих вегетирующую луговую и степную растительность и гидротермические условия на изучаемой территории.

На рис. 3 представлены результаты сезонной динамики индексов NDVI и EVI растительности луга и степи, различающихся между собой доминирующими видами и продуктивностью (табл. 1 и 2).

Из рисунка 3 видно, что в летний период (июнь–август) вегетационный индекс NDVI луговой растительности значительно выше индекса NDVI степной растительности. Известно, что чем выше значения индекса, тем больше объем фитомассы. Это подтверждают результаты геоботанических исследований (табл. 1). Фитомасса злаково-разнотравного сообщества (луг) превышает фитомассу разнотравно-злаково-полынного сообщества (степь). Кроме того, на значения индекса NDVI влияет видовой состав растительности (табл. 2), ее сомкнутость, состояние, экспозиция склонов и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. В местах понижений (долинах рек, оврагах) значения NDVI больше, чем на возвышенных участках.

На подавляющем большинстве используемых аграрных угодий как минимум раз в год происходит распашка. Т.е. в эти сроки обрабатываемое поле должно характеризоваться признаками оголенной почвы, которые соответствуют более низким значениям вегетационного индекса NDVI, чем растительный покров (Барталев и др., 2011; Савин и др., 2015).

В сезонной динамике NDVI исследуемых участков отмечено отсутствие снижения вегетационного

индекса до низких значений, соответствующих значениям оголенной почвы. Следовательно, в течение сезона на исследуемых участках не производилась распашка.

Известно, что индекс NDVI не является идеальным показателем состояния растительности и надземной фитомассы. Это связано как с “насыщением” этого индекса при высокой сомкнутости посевов и его выхода на плато, так и с влиянием отражательных свойств поверхности почв на его величину при низкой сомкнутости посевов. В случае, если густота растительного покрова достигает величины 70–80%, индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного фона. Если густота растительного покрова меньше 30% и более 80%, то применять NDVI не всегда рационально (Савин и др., 2015).

В связи с этим проведен анализ сезонной динамики усовершенствованного вегетационного индекса EVI (рис. 3). Индекс EVI позволяет оценивать состояние растений как в условиях густого растительного покрова, так и в условиях разреженной растительности. Этот индекс при оценке состояния растений имеет преимущества, поскольку влияние почвы и атмосферы в значениях данного индекса минимизировано. Необходимо отметить, что сезонный тренд значений индекса EVI дает во многом аналогичную картину сезонному тренду NDVI, как луговой, так и степной растительности. Это говорит о возможности использования в ряде случаев индекса EVI. Анализ сезонной динамики индекса EVI также не обнаруживает признаков вспашки на исследуемой территории.

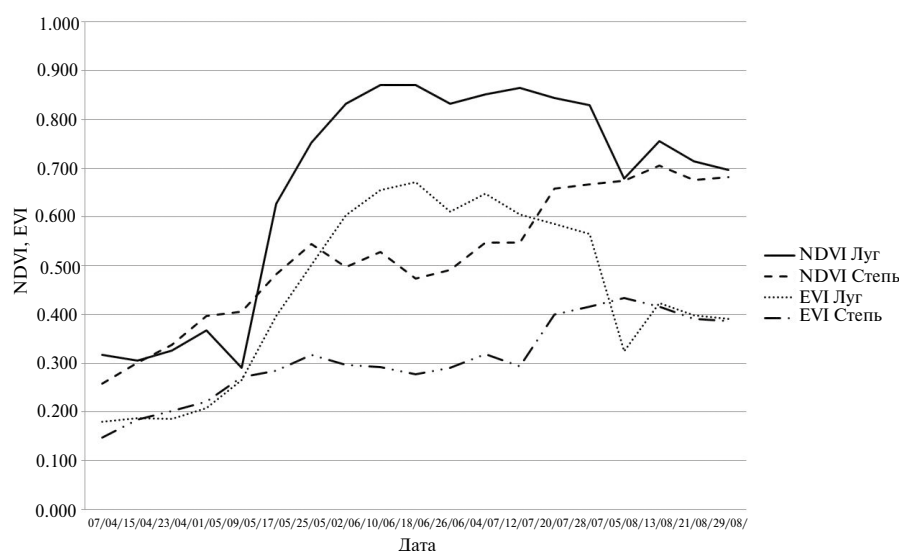


Рис. 3. Сезонная динамика вегетационных индексов NDVI и EVI луговой и степной растительности Хакасии.

Основное влияние на состояние растительного покрова оказывают выпадающие осадки. Однако и влажность почвы вносит свой вклад в фотосинтез растений, влияет на интенсивность вегетационного процесса. В процессе формирования и роста растений определяющую роль играют условия увлажнения в начале вегетации. Устойчивый переход среднесуточной температуры через 10°C в сторону ее повышения при достаточном увлажнении считается в агроклиматологии началом сезона активной вегетации (Черенкова, 2011).

Индекс влажности земной поверхности (LSWI) может использоваться для контроля за увеличением содержания жидкой воды в почве и растительности, особенно в начале сезона (Chandrasekar et al., 2010). Анализ сезонной динамики индекса LSWI показывает, что для луговой растительности значение индекса LSWI превышает значение LSWI для степной растительности (рис. 4). Известно, что различия условий местообитаний по увлажнению сказываются на показателях фитомассы. По-видимому, повышенное содержание воды в почве и растительности является одной из причин наличия большей фитомассы на участке “Луг”, чем на участке “Степь”. В результате анализа сезонной динамики индекса LSWI и индекса NDVI как для луговой растительности, так и для степной, выявлена их высокая положительная корреляционная зависимость (табл. 3). В результате анализа связи индекса LSWI и усовершенствованного вегетационного индекса (EVI) также выявлена их высокая положительная корреляция.

Так как фотосинтез является основной частью продукционного процесса, то изучение влияния

функционирования ассимиляционного аппарата на NDVI, EVI и LAI растений является важным и актуальным направлением исследований в области использования данных дистанционного зондирования Земли в биологии и сельском хозяйстве.

Сезонная динамика доли фотосинтетически активной радиации, поглощаемой растительностью, FPAR для луговой и степной растительности аналогична динамике влажности LSWI (рис. 4). В результате анализа связи FPAR и индексов NDVI и EVI для обоих участков также выявлена высокая положительная корреляционная зависимость (табл. 3).

Индекс листовой поверхности (LAI) является мерой фотосинтезирующей биомассы. Чем выше индекс, тем более полно используется солнечный свет на этой территории. Анализ сезонной динамики листового индекса LAI луговой территории показал, что в летний период его максимальное значение достигает 4, тогда как для степной растительности индекс LAI достигал только 1.7 (рис. 5). Таким образом, индекс LAI так же, как индексы NDVI и EVI, можно использовать для идентификации типа растительности. В результате анализа связи показателя FPAR и индекса LAI также выявлена высокая положительная корреляция для обоих участков (табл. 3), что подтверждает эффективное использование солнечного света (рис. 4 и 5).

Чистая первичная продукция (NPP) является одним из показателей, которые позволяют проследить изменения в растительных сообществах, в первую очередь изменения их продуктивности во времени на определенной территории. Чистая первичная продукция представляет собой количество



Рис. 4. Сезонная динамика индекса влажности земной поверхности LSWI и интенсивности поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR луговой и степной растительности Хакасии.

углерода, ассимилированного зелеными растениями из атмосферы благодаря процессу фотосинтеза. Значения NPP отличаются как для различных растительных биомов, так и для одинаковых растительных сообществ, произрастающих в разных природных условиях (Ларько и др., 2015). Величина чистой первичной продукции служит показателем функционирования любой экосистемы, в т.ч. лугового и степного сообщества.

Сезонная динамика чистой первичной продукции (NPP) луговой и степной растительности представлена на рис. 6. Весной и в начале лета происходит интенсивное накопление органического вещества и углерода в растениях. В результате максимум значения NPP смещен в начало летнего

периода и затем происходит плавное падение NPP до конца осени. При этом максимальное значение NPP лугового сообщества значительно превосходит NPP степного сообщества.

Динамика NPP травянистой растительности во времени обусловлена внешними факторами (температурно-влажностный режим, антропогенное воздействие и др.) и внутренними (возраст, видовая структура и другие характеристики растительного ценоза).

Температура поверхности суши является одним из основных параметров при описании физических процессов на поверхности Земли. Данные о температуре различного пространственного и временного разрешения требуются для обнаружения

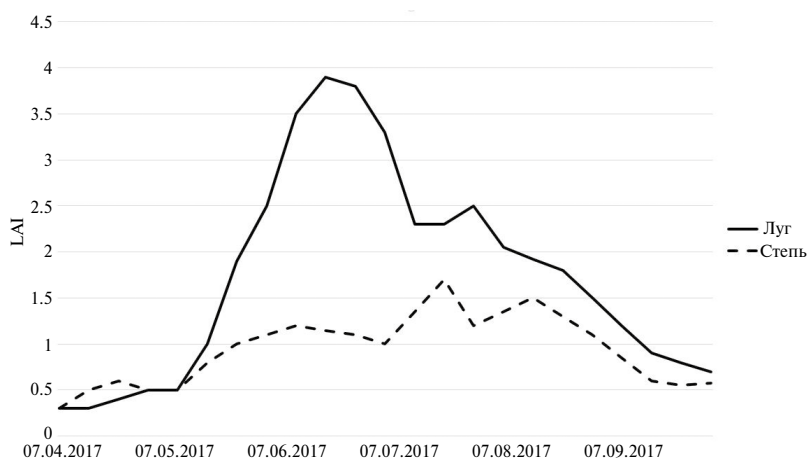


Рис. 5. Сезонная динамика вегетационного индекса LAI луговой и степной растительности Хакасии.



Рис. 6. Сезонная динамика радиационной температуры LST и чистой первичной продукции NPP луговой и степной растительности Хакасии.

Таблица 3. Корреляция между вегетационными индексами и показателями, характеризующими растительность и гидро-термические условия (коэффициент корреляции Пирсона, r)

	LSWI луг	LSWI степь	LST луг	LST степь	FPAR луг	FPAR степь
NDVI луг	0.954	—	0.582	—	0.961	—
NDVI степь	—	0.918	—	0.221	—	0.915
EVI луг	0.983	—	0.586	—	0.913	—
EVI степь	—	0.91	—	0.153	—	0.886
NPP луг	0.867	—	0.843	—	0.852	—
NPP степь	—	0.588	—	0.897	—	0.611
LAI луг	0.95	—	0.781	—	0.963	—
LAI степь	—	0.833	—	0.705	—	0.968

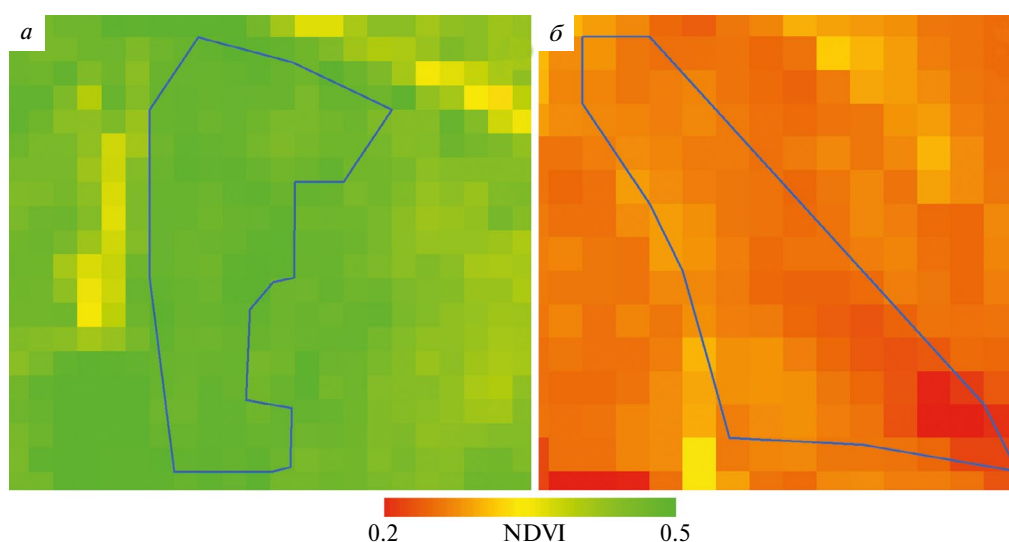
климатических изменений. Необходимость получения регулярных спутниковых данных о температуре подстилающей поверхности диктуется тем, что сеть наземных наблюдений температуры поверхности суши достаточно редкая (Соловьев, 2009).

Сезонная динамика радиационной температуры поверхности исследуемых участков (LST) (рис. 6) так же достигает максимального значения в конце июня, как и чистая первичная продукция (NPP). Наблюдается некоторое различие в апрельской динамике NPP и LST (рис. 6). При этом обнаружена достаточно высокая положительная корреляция между NPP и LST для обоих типов растительности ($r = 0.843$ для луга и $r = 0.897$ для степи) (табл. 3).

Следует отметить, что все исследованные индексы и показатели для луговой растительности выше, чем для степной. Исключением является радиационная температура LST, которая для степной растительности выше, чем для луговой (рис. 6).

По-видимому, это связано с тем, что по определению данный индекс дает информацию о температуре поверхности верхней границы растительного покрова и почвы. Возникает эффект экранирования прямого солнечного излучения растительностью. В данном случае почва участков со степной растительностью, когда растительный покров разреженный, оказывает больший эффект на LST, чем густая луговая растительность. Кроме того, необходимо отметить, что коэффициенты корреляции между NDVI и LST, EVI и LST для степной растительности низкие ($r = 0.221$ и $r = 0.153$) (табл. 3).

На рис. 7 представлено пространственное распределение индекса NDVI по данным LANDSAT 8 для луговой (а) и степной (б) растительности при высоком пространственном разрешении — 30 м за 29 июля 2017 г. В середине лета индекс NDVI достоверно различается для луговой (NDVI = 0.5) и степной (NDVI = 0.2) растительности.

**Рис. 7.** Карты пространственного распределения индекса NDVI луговой (а) и степной (б) растительности Хакасии по данным Landsat 8 в 2017 г. Пространственное разрешение 30 метров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки возможности идентификации луговой и степной растительности Хакасии наземные и спутниковые исследования проводились на двух стационарных участках (№ 1 – луг) и (№ 2 – степь), расположенных в Ширинском районе республики Хакасия в течение вегетационного сезона 2017 г. Участок № 1 относится к настоящему суходольному злаково-разнотравному лугу, участок № 2 – к настоящей мелководерновинной степи.

По результатам полевых геоботанических исследований определена продуктивность луговых и степных сообществ, видовой состав и динамика проективного покрытия травостоя. Показано, что продуктивность растительности настоящего суходольного злаково-разнотравного луга превышает продуктивность настоящей мелководерновинной степи.

Полученные результаты наземных спектральных измерений показывают, что мониторинг спектральной отражательной способности различных сообществ даже при малых спектральных контрастах может использоваться для идентификации луговых и степных растительных сообществ.

При анализе спутниковых данных MODIS (на основе индекса NDVI, усовершенствованного индекса EVI, индекса влажности земной поверхности LSWI, индекса листовой поверхности LAI, интенсивности поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR и чистой первичной продукции NPP) показана возможность идентификации лугового и степного типа растительности. Выявлено, что значения исследованных индексов для луговой растительности значительно превышают значения для степной растительности.

Выявлено, что значения радиационной температуры LST для степной растительности превышают значения для луговой растительности. При этом коэффициенты корреляции между NDVI и LST, EVI и LST для степной растительности низкие ($r = 0.221$ и $r = 0.153$).

Для луговой и степной растительности выявлено, что между вегетационными индексами, характеризующими биомассу (NDVI, EVI, LAI, NPP) и гидротермические условия (LSWI, FPAR), существуют высокие положительные корреляционные связи в пределах от $r = 0.588$ до $r = 0.954$.

Построены карты пространственного распределения индекса NDVI луговой и степной растительности на участках луг и степь по данным Landsat 8 за 29 июля. Выявлено, что индекс NDVI достоверно различается для луговой (NDVI = 0.5) и степной (NDVI = 0.2) растительности.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

“Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0287-2021-0018)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьют. оптика. 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24. DOI: 10.7868/S0205961415040028.
- Ботвич И.Ю., Волкова А.И., Кононова Н.А., Иванова Ю.Д., Шевырногов А.П. Спектрометрирование травянистой растительности Красноярского края и республики Хакасия: методика измерений, хранение и обработка данных // XXI Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева “Решетневские чтения”, 18–22 ноября 2017 г. Красноярск. С. 398–400.
- 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 // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 53–66.
- Зоркина Т.М. Фитоценология: учебно-метод. пособие. Абакан: Изд-во Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова, 2003. 48 с.
- Ларько А.А., Иванова Ю.Д., Шевырногов А.П. Нелинейные тренды чистой первичной продукции растительности юга Красноярского края по спутниковым данным: методы и подходы // Фунд. исслед. 2015. № 3. С. 106–110.
- Музылев Е.Л., Старцева З.П., Зейлигер А.М., Ермолаева О.С., Волкова Е.В., Василенко Е.В., Осипов А.И. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 44–60.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения температуры и излучательной способности поверхности суши по данным спутниковых ик-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 4. С. 85–90.
- Родионова А.В., Тебердиев Д.М. Продуктивность долголетнего сеяного сенокоса и плодородие дерново-подзолистых почв // Успехи современной науки. 2017. Т. 1. № 10. С. 178–183.
- Савин И.Ю., Танов Э.Р., Харзинов С. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни (на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 51–65.
- Соловьев В.И., Успенский С.А. Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 3. С. 79–89.
- Черенкова Е.А. Использование спутниковых данных для анализа изменения влажности почвы и состояния раститель-

ного покрова юга европейской России в конце XX – начале XXI века // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 80–87.

Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.

Шукилович А.Ю., Федотова Е.В., Маглинец Ю.А. Применение сенсора MODIS для оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2016. 9(7). С. 1035–1044.

Adamovich T.A., Domnina E.A., Timonov A.S., Rutman V.V., Ashikhmina T. Ya. Methodological techniques for identifying plant communities based on Earth remote sensing data and field research // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 39–43. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-039-043.

Chandrasekar K, Sai M., Roy P.S., Dwevedi R.S. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS

Vegetation Index product // International journal of remote sensing. 2010. V. 31(15). P. 3987–4005. DOI: 10.1080/01431160802575653.

Justice C.O., Vermote E., Townshend J.R.G., Defries R., Roy D.P., Ha D.K., Salomonson V.V., Privette J.L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R.B., Knyazikhin Y., Running S.W., Nemani R.R., Wan Z., Huete A.R., van Leeuwen W., Woife R.E., Giglio E., Muller J.P., Lewis P., Barnsley M.J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research // IEEE transact. Geosci. and rem. sens. 1998. Y. 36. No. 4. P. 1228–1249.

Rouse J. W, Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings, 3rd Earth Res. Techn. Satellite (ERTS) Symp. 1974. Y. 1. P. 48–62.

Xiao X., Boles S., Liu J., Zhuang D., Liu M. Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data // Rem. Sens. Environm. 2002. V. 82. P. 335–348. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00051-2.

Informative Value of Spectral Vegetation Indices for the Meadow and Steppe Vegetation Monitoring of Khakassia by Ground and Satellite Data

A. P. Shevyrnogov¹, I. Yu. Botvich¹, T. I. Pisman¹, A. I. Volkova²,
N. A. Kononova¹, S. A. Ivanov¹

¹Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

The article presents the results of the assessment of the possibility to identify meadow and steppe vegetation of Khakassia using ground and MODIS and LANDSAT 8 satellite data during the 2017 growing season. According to the results of field geobotanical studies, it was shown that the productivity of meadow vegetation exceeded the productivity of steppe vegetation. As a result of ground-based spectral measurements, it was shown that monitoring of the spectral reflectivity of meadow and steppe vegetation can be used to identify them. The analysis of MODIS satellite data (based on the NDVI, the enhanced vegetation index EVI, the land surface water index LSWI, the leaf area index LAI, the fraction of absorbed photosynthetically active radiation FPAR and net primary production NPP) revealed that the values of the studied indices for meadow vegetation significantly exceeded the values for steppe vegetation. The exception was the land surface temperature LST, which was higher for steppe vegetation than for meadow vegetation. High positive correlations between vegetation indices characterizing biomass (NDVI, EVI, LAI, NPP) and hydrothermal conditions (LSWI, FPAR) for meadow and steppe vegetation were determined. However, the correlation coefficients between NDVI and LST, EVI and LST for steppe vegetation were low. Based on the obtained maps of the spatial distribution of the NDVI index of meadow and steppe vegetation according to Landsat 8 data for July 29, it was shown that the NDVI index significantly differed for the studied vegetation types. For meadow vegetation, the NDVI value was significantly higher than for steppe vegetation.

Keywords: vegetation, satellite data, MODIS, LANDSAT 8, vegetation indices, ground-based spectrophotometry, geobotanical studies, meadow, steppe

REFERENCES

Bartalev S.A., Egorov V.A., Lupyay E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Raspoznavanie pahotnykh zemel' na osnove mnogoletnykh sputnikovyykh dannykh spektroradiometra MODIS i lokal'no-adaptivnoy klassifikatsii [Recognition of arable lands using multi-annual satellite data from spectroradiometer Modis and locally adaptive supervised classification] // Komp'yuternaya optika. 2011. V. 35. № 1. P. 103–116. (In Russian).

Bondur V.G., Vorobev V.E. Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015. Vol. 51. No. 9. P. 949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054.

Botvich I. Yu., Volkova A.I., Kononova N.A., Ivanova Yu.D., Shevyrnogov A.P. Spektrometrirovaniye travyanistoy rastitel'nosti Krasnoyarskogo kraya i respubliki Hakasiya: metodika izmereniy, hraneniye i obrabotka dannykh [Spectrometry of herbaceous vegetation in the Krasnoyarsk Territory and

- the Republic of Khakassia: measurement technique, data storage and processing] // XXI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, posvyashchennaya pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva "Reshetnevskie chteniya", 18–22 noyabrya 2017 g. Krasnoyarsk. P. 398–400. (In Russian).
- Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Lapenko N.G., Samofal E.V., Storchak I.G.* Vozmozhnosti distancionnoy ocenki sostoyaniya i stepeni degradatsii prirodnykh kormovykh ugodij [Capabilities for rangelands state and degradation assessment using remote sensing data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. № 7. P. 53–66. (In Russian).
- Zorkina T.M.* Fitocenologiya: uchebno-metod. posobie. Abakan: Izd-vo Hakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. F. Katanova, 2003. 48 p. (In Russian)
- Lar'ko A.A., Ivanova Yu.D., Shevyrnogov A.P.* Nelinejnye trendy chistoy pervichnoy produktsii rastitel'nosti yuga Krasnoyarskogo kraya po sputnikovym dannym: metody i podhody [Non-linear trends of plants net primary production in south of Krasnoyarsk krai with satellite data: methods and approaches] // *Fundamental'nye issledovaniya* 2015. № 3. P. 106–110. (In Russian).
- Muzylev E.L., Starceva Z.P., Zejliger A.M., Ermolaeva O.S., Volkova E.V., Vasilenko E.V., Osipov A.I.* Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh o harakteristikah podstilayushchej poverhnosti i meteorologicheskikh harakteristikah pri modelirovanii vodnogo i teplovogo rezhimov bol'shogo sel'skohozyajstvennogo regiona [The use of satellite data on land surface and meteorological characteristics in modeling the water and heat regimes of large agricultural region] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 3. P. 44–60. (In Russian).
- Polyakov A.V., Timofeev YU. M., Uspenskij A. B.* Vozmozhnosti opredeleniya temperatury i izluchatel'noj sposobnosti poverhnosti sushi po dannym sputnikovyykh ik-zondirovshchikov vysokogo spektral'nogo razresheniya (IKFS-2) [Possibilities for determining the temperature and emissivity of the land surface from the data of high spectral resolution satellite infrared sounders (IRFS-2)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2010. № 4. P. 85–90. (In Russian).
- 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] // *Uspekhi sovremennoy nauki*. 2017. V. 1. № 10. P. 178–183. (In Russian).
- Savin I. Yu., Tanov E.R., Harzinov S.* Ispol'zovanie vegetacionnogo indeksa NDVI dlya ocenki kachestva pochv pashni (na primere Baksanskogo rajona Kabardino-Balkarii) [The use of NDVI profiles for estimating the quality of arable lands (exemplified by the Baksan region in Kabardino-Balkaria)] // *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2015. V. 77. P. 51–65. (In Russian).
- Solov'ev V.I., Uspenskij S.A.* Monitoring temperatury poverhnosti sushi po dannym geostacionarnykh meteorologicheskikh sputnikov novogo pokoleniya [Land surface temperature monitoring according to new generation geostationary meteorological satellites] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2009. № 3. P. 79–89. (In Russian).
- Cherenkova E.A.* Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh dlya analiza izmeneniya vlazhnosti pochvy i sostoyaniya rastitel'nogo pokrova yuga evropejskoj Rossii v konce XX – nachale XXI veka [Using satellite data to analyze changes in soil moisture and the state of vegetation cover in the south of European Russia at the end of the 20th – beginning of the 21st century] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2011. № 6. P. 80–87. (In Russian).
- Cherepanov S.K.* Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR). SPb.: Mir i sem'ya, 1995. 992 p. (In Russian).
- Shukilovich A. Yu., Fedotova E.V., Maglinec Yu.A.* Prime-nenie sensora MODIS dlya operativnogo monitoringa zemel'sel'skohozyajstvennogo naznacheniya [Using Modis data for agricultural areas monitoring] // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016. 9(7). P. 1035–1044. (In Russian).
- Adamovich T.A., Domnina E.A., Timonov A.S., Rutman V.V., Ashikhmina T. Ya.* Methodological techniques for identifying plant communities based on Earth remote sensing data and field research // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 39–43. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-039-043.
- Chandrasekar K, Sai M., Roy P.S., Dwevedi R. S.* Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product // *International journal of remote sensing*. 2010. V. 31(15). P. 3987–4005. DOI: 10.1080/01431160802575653.
- Justice C. O., Vermote E., Townshend J. R. G., Defries R., Roy D. P., Ha D. K., Salomonson V. V., Privette J. L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R. B., Knyazikhin Y., Running S. W., Nemani R. R., Wan Z., Huete A. R., van Leeuwen W., Woelfe R. E., Giglio E., Muller J. P., Lewis P., Barnsley M. J.* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research // *IEEE transact. Geosci. and rem. sens.* 1998. V. 36. No. 4. P. 1228–1249.
- Rouse J. W., Haas R. H., Scheel J. A., Deering D. W.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // *Proceedings, 3rd Earth Res. Techn. Satellite (ERTS) Symp.* 1974. V. 1. P. 48–62.
- Xiao X., Boles S., Liu J., Zhuang D., Liu M.* Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data // *Rem. Sens. Environm.* 2002. V. 82. P. 335–348. DOI:10.1016/S0034-4257(02)00051-2.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНДИКАТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЛЯХ СРЕДНЕРУССКОЙ ЛЕСОСТЕПИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2024 г. Э. А. Терехин^{1,*}

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

*E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 28.06.2023 г.

Формирование древесной растительности на залежных землях вследствие постагрогенных сукцессий приводит к изменениям в растительном покрове ландшафтов Среднерусской лесостепи. В статье проведен сравнительный анализ индикаторов лесистости и ее динамики для залежей региона, рассчитанных на основе спутниковых данных Landsat OLI, Sentinel-2 MSI, MODIS. Установлено, что показатели, вычисляемые по данным Sentinel-2, характеризуются наиболее сильной связью с лесистостью залежных земель. Для показателей, рассчитанных на их основе, также наиболее высока статистическая значимость различий между отдельными грациями величины проективного покрытия залежей древесной растительностью. Показатели многолетней динамики вегетационного индекса, вычисляемые на основе данных MODIS, наиболее информативны для сравнения внутризональных различий в интенсивности прироста лесистости залежных земель. При этом распределение залежей в подзонах по величине лесистости более сильно проявляется в гистограммах спектрально-отражательных характеристик коротковолнового инфракрасного диапазона, рассчитанных по данным Sentinel-2. Различия в породном составе насаждений, формирующихся на залежах, наиболее сильно оказывают влияние на значения вегетационного индекса, извлеченные из данных Landsat OLI. Для них установлена более высокая чувствительность к различиям в породном составе насаждений на залежных землях в сравнении с коэффициентами спектральной яркости.

Ключевые слова: залежные земли, Среднерусская лесостепь, постагрогенные сукцессии, лесистость, данные дистанционного зондирования, Landsat, MODIS, Sentinel-2

DOI: 10.31857/S0205961424010037, **EDN:** GMXQAX

ВВЕДЕНИЕ

Оценка восстановительных сукцессий на залежных землях выступает одной из ключевых задач в исследованиях ландшафтов лесной (Бурлуцкий, 2021; Данилов, 2023), лесостепной (Черкасов, 2009) и степной (Ходячих, 2021) природных зон. Восстановительные сукцессии на постагрогенных землях в условиях зоны лесов и лесостепи приводят к формированию древесной растительности (Карелин и др., 2017; Терехин, 2022; Широких и др., 2023). Процессы формирования лесных экосистем вместе с тем оказывают существенное влияние на наземную биомассу и потоки углерода (Lappalainen et al., 2014; Velázquez et al., 2022), что определяет анализ изменений в лесистости важнейшей задачей географических исследований.

Распространение залежных земель в Центральном Черноземье и Орловской области обусловлено

выводом части земель из сельскохозяйственного использования, который наиболее значительно происходил в период последнего десятилетия XX в. — начала первого десятилетия XXI в. (Люри и др., 2010). Древесно-кустарниковая стадия в условиях Среднерусской лесостепи во многих случаях является завершающей стадией восстановительных сукцессий (Парахневич, Кирик, 2017). Интенсивность формирования древесной растительности на залежных землях в регионе характеризуется достаточно значительными внутризональными различиями. Ее следствием выступают высокие вариации в величине покрытия древесной растительности или лесистости залежей. Среднерусская лесостепь характеризуется умеренно-континентальным климатом и вариаций природных условий от лесной зоны на севере до степи на юге. В ее пределах выделяют подзоны северной, типичной и южной лесостепи (Физико-географическое районирование, 1961).

Учитывая, что сукцессионные процессы при условии отсутствия антропогенного вмешательства характеризуются непрерывностью, значительные перспективы их изучения связаны с использованием данных дистанционного зондирования Земли (Данилова и др., 2017; Liu et al., 2019; Gerlein-Safdi et al., 2020; He et al., 2022). Благодаря одновременному охвату обширных территорий они позволяют получить представление о пространственных различиях в лесистости залежных земель (Ershov et al., 2022; Velázquez et al., 2022). Вместе с тем актуальность приобретает определение спектральных характеристик, чувствительных к изменениям в ней (Wei et al., 2021; Shang et al., 2022), и оценка возможностей конкретных типов спутниковых данных для количественной оценки процесса формирования древесной растительности на залежных землях.

Согласно ранее выполненным исследованиям (Терехин, 2021, 2022) особенности лесистости залежей связаны с рядом спектрально-отражательных характеристик, измеряемых на основе данных Landsat 8 OLI, Sentinel-2, MODIS. Каждый из них обладает своими преимуществами. Снимки Sentinel-2 MSI характеризуется наиболее высоким пространственным разрешением, MODIS – наибольшей частотой получения, Landsat 8 OLI – сочетанием оптимального пространственного разрешения и достаточно большим временным охватом. В то же время остаются открытыми вопросы, связанные с эффективностью применения тех или иных спутниковых данных для анализа определенных характеристик лесообразовательного процесса. К ним относятся фактические значения лесистости залежей, среднегодовая величина ее прироста, внутризональные различия в скорости формирования древесной растительности, чувствительность к типу формирующихся лесных насаждений. Ответы на эти вопросы могут быть получены методом сравнительного анализа характеристик лесистости и спектральных показателей, оцененных по данным с разных сенсоров, но на одной и той же экспериментальной выборке. Она должна интегрировать сведения о наборе фактических параметров залежей и значениях спектрально-отражательных характеристик, измеренных разными съемочными системами, но в максимально идентичных условиях съемки.

Цель статьи – сравнение эффективности показателей лесистости и ее динамики на залежных землях Среднерусской лесостепи, вычисляемых на основе различных типов спутниковых данных. В работе проведен сопоставительный анализ индикаторов лесистости залежей, рассчитываемых по данным MODIS, Landsat-8 OLI и Sentinel-2 MSI. Задачи исследования включали: а) сравнение индикаторов лесистости залежей и величины ее среднегодового прироста; б) сопоставление показателей

внутризональных различий в лесистости залежных земель; в) сравнение спектрально-отражательных характеристик залежей с различными типами древесной растительности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на территории лесостепной природной зоны в пределах 6 областей: Белгородской, Курской, Орловской, Липецкой, Тамбовской и Воронежской (рис. 1). Анализ информативности спектрально-отражательных характеристик, вычисленных на основе данных Landsat OLI, MODIS и Sentinel-2, осуществлен с использованием сформированной базы данных, включающей сведения о залежах региона.

Она содержала информацию о фактической лесистости угодий в конце второго десятилетия XXI в., особенностях их растительного покрова, типе формирующихся лесных насаждений, времени пребывания в залежном состоянии и наборе спектрально-отражательных характеристик. Он включал ранее установленные, наиболее информативные показатели лесистости, рассчитанные по снимкам с анализируемых спутниковых сенсоров. К ним относятся значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазона и индекса NDVI по данным Landsat 8 OLI, значения индекса NDVI и показатель tau Манна-Кендалла, характеризующий его многолетнюю динамику по данным MODIS (Терехин, 2021), значения коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазонов и индекса NDVI, вычисленные по данным Sentinel-2 (Терехин, 2022). База данных, включающая сведения о залежах, создана методом их выявления и оценки на основе разновременных снимков сверхвысокого пространственного разрешения, полученных в течение первых двух десятилетий XXI в., а также с применением разновременных снимков Landsat 5 TM – Landsat 8 OLI и полевой информации. Анализируемая выборка угодий включала 342 залежи, суммарной площадью 17182.7 га при средней площади 50.2 га.

Значения коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона (1.56–1.66 мкм) и значения вегетационного индекса NDVI по данным Landsat OLI вычислены на основе снимков августа 2018 г., охватывающих исследуемую территорию (10 спутниковых сцен). Значения вегетационного индекса NDVI по данным MODIS вычислены на основе информационных продуктов MOD13Q1 (16-дневных композитных изображений), включающих значения вегетационного индекса августа 2018 года. Значения параметра tau Манна-Кендалла рассчитано на

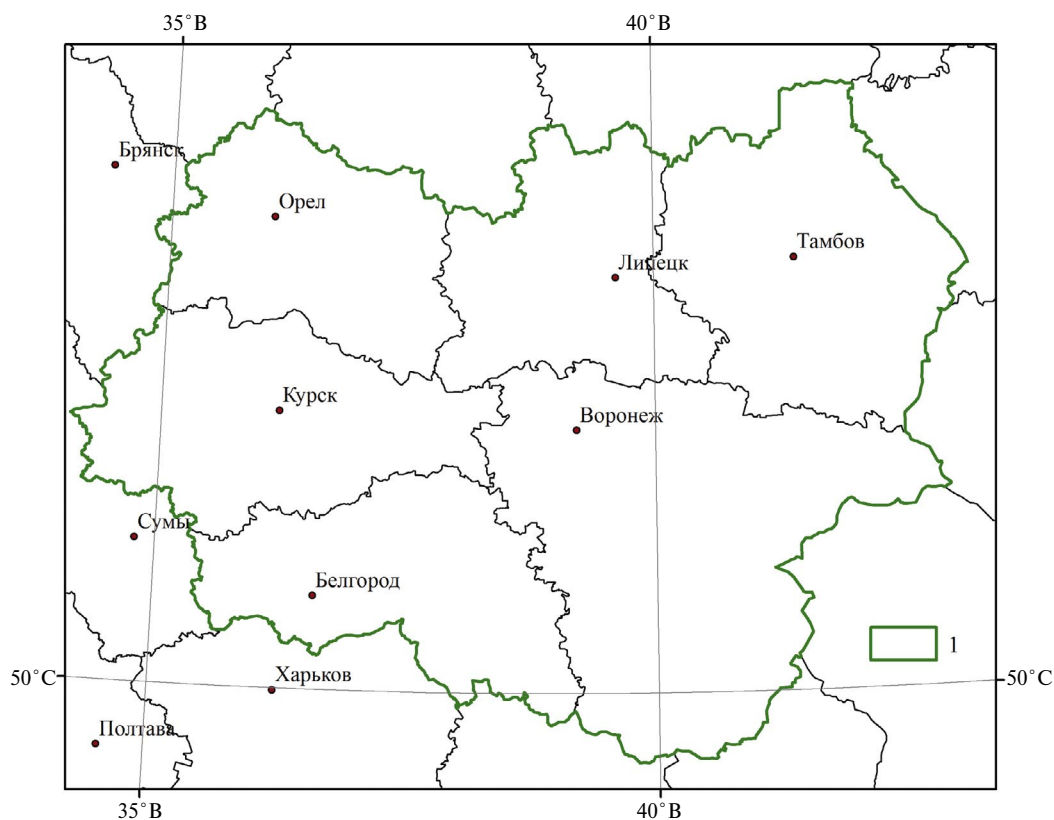


Рис. 1. Местоположение территории исследования. 1 – границы анализируемой территории.

основе многолетних рядов NDVI по изображениям MOD13Q1, полученным в период вегетации каждого года (начало апреля – конец октября) с 2000 по 2019 гг. Значения коэффициентов спектральной яркости по данным Sentinel-2 рассчитаны на основе снимков августа 2019 г. на территорию исследования (21 изображение). На основе этих же снимков вычислены значения вегетационного индекса.

Снимки Landsat-8 и Sentinel-2 прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию и были пересчитаны в безразмерные коэффициенты спектральной яркости (КСЯ). Информационные продукты MOD13Q1 создаются на основе атмосферно и радиометрически откорректированных снимков MODIS. Величины всех анализируемых показателей для конкретных угодий рассчитаны методом зональной статистики в пределах контуров угодий. Фактические характеристики залежей (лесистость, тип древесной растительности) оценены на основе совместного использования снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м) 2000–2020 гг., полученных из интернет-архивов открытого доступа, и снимков Landsat-8 OLI конца второго десятилетия XXI в. Все анализируемые залежные земли подобраны таким образом, чтобы находиться в сходных геоморфологических условиях, вне участков повышенного увлажнения. Вы-

борка включала репрезентативное число угодий с разной величиной лесистости, разными типами формирующихся лесных насаждений (лиственные, хвойные, смешанные). Дополнительным условием выступал учет минимальной площади угодий вследствие ограничений пространственного разрешения снимков MODIS. С его учетом для анализа стремились подбирать залежные земли с площадью от 20 га.

Сравнение эффективности спектральных показателей для оценки лесистости залежей проведено на основе группы критериев:

- сила связи с лесистостью одновозрастных залежей;
- статистическая значимость различий для разных градаций величины их покрытия древесной растительностью;
- наличие связи с внутризональными различиями лесистости залежных земель;
- чувствительность к различиям в породном составе древесной растительности, формирующейся на оставленных аграрных землях.

Для анализа каждого критерия формировалась отдельная выборка залежей. Оценка силы связи

с лесистостью проведена на основе выборки одновозрастных залежей, отдельно для угодий с древесной растительностью из лиственных, хвойных пород и со смешанными лесными насаждениями. Значимость различий спектральных показателей для отдельных градаций лесистости осуществлена с использованием дисперсионного анализа. Связь с внутризональными различиями лесистости изучена методом сравнения статистических характеристик залежных земель с древесной растительностью из лиственных пород, расположенных в подзонах северной, типичной и южной лесостепи. Чувствительность к различиям в породном составе угодий (лиственный, хвойный, смешанный) изучена на основе залежей с соответствующими типами лесных насаждений, но аналогичной величиной лесистости – выше 0.65. Обозначенный порог выбран в связи с тем, чтобы на спектрально-отражательные свойства угодий ключевое влияние оказывала именно древесная растительность, присутствующая на них, а не травянистые участки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование сомкнутых лесных насаждений достаточно выражено проявляется на многозональных космических снимках при анализе одиночных и разновременных изображений (рис. 2). В северной лесостепи этот процесс протекает достаточно интенсивно и за период порядка двух десятилетий, следующих после прекращения аграрного использования, на многих участках залежей успевают сформироваться сомкнутые лесные насаждения.

Вместе с тем возможность формирования многолетних рядов наблюдений предоставляют только некоторые сенсоры. При ее отсутствии, сила связи со среднегодовой величиной прироста лесистости может быть оценена на основе анализа лесистости одновозрастных оставленных аграрных земель.

Различия спектрально-отражательных характеристик залежей, зависящих от нее, в этом случае могут выступать показателями отличий в интенсивности лесообразовательного процесса.

Оценка силы связи с величиной прироста лесистости. Сравнение показателей прироста лесистости, оцененных по данным Landsat-8, Sentinel-2 и MODIS на аналогичные сроки (конец второго десятилетия XXI в.), показало, что среди изученных спектрально-отражательных характеристик наиболее сильной связью с лесистостью одновозрастных залежей характеризуются коэффициенты спектральной яркости коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазона, измеренные по данным Sentinel-2 (табл. 1). Вместе с тем показатели их силы связи с лесистостью ненамного превышают аналогичные величины, измеренные по данным Landsat-8 OLI. Установленная особенность характерна для залежей с разными типами древесной растительности. Непараметрический коэффициент корреляции Спирмена использован для анализа силы связи с лесистостью в связи с тем, что зависимости между ней и спектрально-отражательными характеристиками не линейны (Терехин, 2022) и коэффициент корреляции Пирсона будет вследствие этого менее объективным критерием. Из таблицы видно, что значения вегетационного индекса во всех случаях характеризуются меньшей корреля-

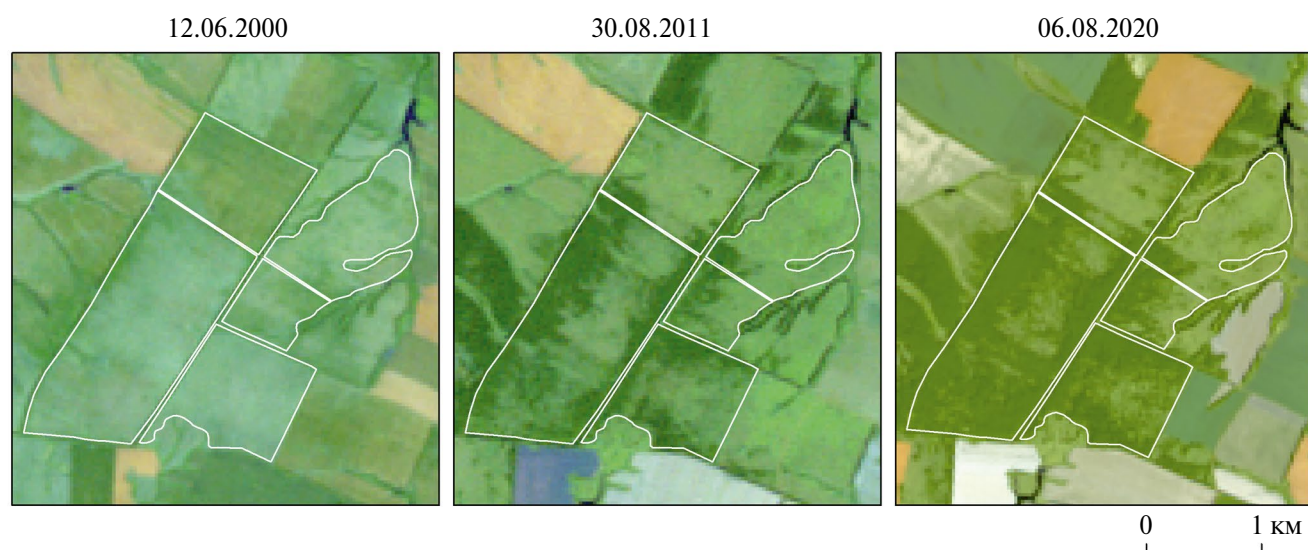


Рис. 2. Отображение динамики лесистости залежных земель в Среднерусской лесостепи на снимках Landsat TM/OLI. Синтез каналов SWIR2 – SWIR1 – RED (2-й, 1-й коротковолновые инфракрасные – красный).

цией с лесистостью залежей, чем отражательные характеристики инфракрасного диапазона. Среди них она наиболее высокая для величин, рассчитанных по данным Sentinel-2. Все коэффициенты корреляции статистически значимы на уровне 0.05.

Причиной несколько более высокой эффективности показателей, вычисленных по данным Sentinel-2 MSI в сравнении с данными Landsat 8 OLI, может выступать их более высокое пространственное разрешение. Для SWIR-каналов Sentinel-2 оно (20 м) в 1,5 раза выше, чем аналогичных каналов Landsat OLI (30 м) при аналогичном радиометрическом разрешении. Более высокое пространственное разрешение снимков Sentinel-2 обуславливает меньшее влияние пограничных пикселей на спектрально-отражательные свойства залежей. В таких пикселях, т.е. расположенных на границе залежей с другими типами угодий, могут присутствовать спектральные смеси обоих типов объектов. Уменьшение размера пикселя до определенного предела может обуславливать их меньшее влияние и, соответственно, более высокую точность оценки спектральной отражательной способности.

Оценка значимости различий для отдельных градаций лесистости залежей. Статистическая значимость различий спектрально-отражательных характеристик для градаций лесистости залежей, выступает другим ключевым критерием их информативности при ее оценке. Несмотря на то, что показатели, рассчитанные на основе всех анализируемых спутниковых данных, выявили достаточно высокую чувствительность к различиям в градациях лесистости залежей (рис. 3), наибольшая информативность характерна для спектрально-отражательных характеристик SWIR1-диапазона, вычисляемых по Sentinel-2, и чуть меньшая — по Landsat OLI. Проведенный анализ показал, что для спектрально-отражательных характеристик залежей, рассчитанных по ним, характерны статистически значимые различия, присутствующие одновременно между всеми градациями лесистости (0–20%, 20–40%, 40–60%, 60–80%, 80–100%). Они

установлены методом взаимного сравнения спектрально-отражательных характеристик для разных градаций лесистости.

Вместе с тем все оцениваемые анализируемые спектрально-отражательные характеристики достаточно выражено показали общую тенденцию к изменению вследствие роста или снижения лесистости залежных земель. Отличие инфракрасных коэффициентов спектральной яркости от значений вегетационного индекса при этом состоит в том, что они находятся в обратной зависимости от величины лесистости угодий.

Оценка связи с внутризональными различиями лесистости залежей. Внутризональные различия залежных земель Среднерусской лесостепи по величине их лесистости определяются интенсивностью естественного прироста лесистости. Для объективности сравнения анализировали только залежи с древесной растительностью из лиственных пород, чтобы исключить влияние фактора отличий в породном составе насаждений (лиственный или хвойный). Сравнение фактической лесистости одновозрастных залежей в подзонах лесистости и значений спектральных характеристик, соответствующих им, показало, что по абсолютным значениям в наибольшей степени фактическим внутризональным различиям соответствуют показатели tau Манна-Кендалла, вычисленные на основе многолетних рядов NDVI (по MOD13Q1) периода вегетации (табл. 2). Например, лесистость одновозрастных залежей в подзоне северной лесостепи превышала аналогичный показатель в типичной лесостепи в конце второго десятилетия XXI в. (2019 г.) более чем в 2 раза. Соотношение значений tau Манна-Кендалла, рассчитанных для подзон, оказалось наиболее близко к этой величине в сравнении с другими спектральными характеристиками. Вместе с тем наиболее высокая статистическая значимость внутризональных различий залежей характерна для коэффициентов спектральной яркости коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазона по данным Landsat OLI, либо Sentinel-2 MSI.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Спирмена между фактической лесистостью залежей и их спектрально-отражательными характеристиками по данным Landsat OLI, MODIS и Sentinel-2

Тип древесной растительности на залежах	КСЯ SWIR1 _L	NDVI _L	NDVI _M	Tau M-K _M	КСЯ SWIR1 _S	КСЯ SWIR2 _S	NDVI _S
Лиственная	–0.87	0.67	0.70	0.76	–0.88	–0.90	0.80
Хвойная	–0.93	0.71	0.58	0.84	–0.95	–0.94	0.88
Смешанная	–0.81	0.69	0.52	0.31	–0.84	–0.83	0.74

КСЯ — коэффициенты спектральной яркости. Tau M-K — tau Манна-Кендалла на основе многолетних рядов вегетационного индекса NDVI. L — значения, рассчитанные по данным Landsat OLI, M — по данным MODIS, S — по Sentinel-2.

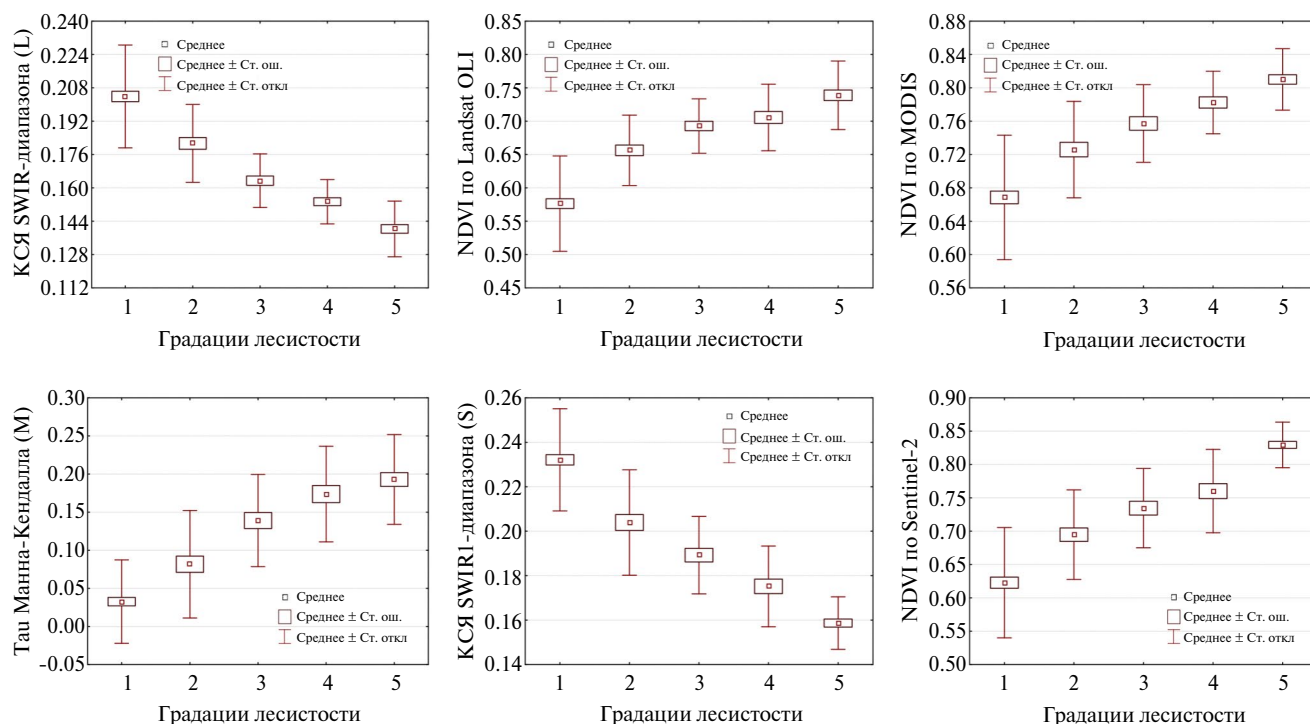


Рис. 3. Сравнение спектрально-отражательных характеристик для градаций лесистости залежей, рассчитанных по разным типам спутниковых данных. Градации лесистости: 1 – 0–0.2; 2 – 0.2–0.4; 3 – 0.4–0.6; 4 – 0.6–0.8; 5 – 0.8–1.0. L – Landsat OLI. M – MODIS. S – Sentinel-2.

При этом все изученные показатели статистически значимо различаются для залежей разных подзон лесостепи. Эффективность показателей многолетней динамики вегетационного индекса, вычисляемых по данным MODIS, в данном случае может быть обусловлена тем, что они рассчитываются на основе многолетних рядов из композитных изображений периода вегетации (13 единиц в год с апреля по октябрь), а не по одиночным снимкам. Определенные различия в абсолютных значениях вегетационного индекса или инфракрасных коэффициентов спектральной яркости, рассчитанных для залежей одних и тех же подзон, но по разным сенсорам, обуславливаются отличиями интервалов длин волн в съемочных системах Landsat OLI, MODIS и Sentinel-2.

Наилучшим показателем фактического распределения залежей в подзонах лесостепи по величине лесистости выступают спектрально-отражательные характеристики 11-го канала (коротковолнового инфракрасного, SWIR), рассчитанные по Sentinel-2. На гистограммах для подзоны северной лесостепи (рис. 4) наглядно просматривается доминирование залежей с высокими значениями лесистости и одновременно низкими значениями спектральной отражательной способности. Как видно из рис. 4, в подзоне северной лесостепи в конце второго де-

сятия XXI в. доминировали залежи с высокими значениями лесистости. Значения коротковолнового инфракрасного диапазона, находящиеся в обратной зависимости от нее, для северной лесостепи показали преобладание залежей с низкими значениями отражательной способности, т.е. залежей с высокой лесистостью.

В подзоне типичной лесостепи распределение залежей смещается в сторону более низких значений лесистости и одновременно, в обратном направлении происходит их смещение в гистограмме в сторону более высоких значений коэффициентов спектральной яркости. В подзоне южной лесостепи в силу доминирования залежей с очень низкими значениями лесистости выраженных закономерностей в распределении спектрально-отражательных характеристик не наблюдается. При этом присутствие в гистограмме залежей с достаточно высокими значениями отражательной способности (выше 0.22) в коротковолновом инфракрасном диапазоне выступает показателем доминирования угодий с очень низкой величиной покрытия древесной растительности (ниже 0.2).

Оценка чувствительности к породному составу лесных насаждений на залежах. Наличие на залежах древесной растительности из лиственных, хвойных пород или смешанных насаждений достаточно

Таблица 2. Сравнение фактических различий лесистости залежей в подзонах лесостепи и средних значений их спектрально-отражательных характеристик по данным Landsat OLI, MODIS и Sentinel-2

Подзона лесостепи	Лесистость	КСЯ SWIR _{1L}	NDVI _L	NDVI _M	Tau M-K _M	КСЯ SWIR _{1S}	КСЯ SWIR _{2S}	NDVI _S
Северной	0.69	0.15	0.71	0.78	0.17	0.17	0.08	0.78
Типичной	0.30	0.18	0.64	0.72	0.08	0.21	0.12	0.68
Южной	0.08	0.23	0.52	0.63	0.01	0.25	0.14	0.61

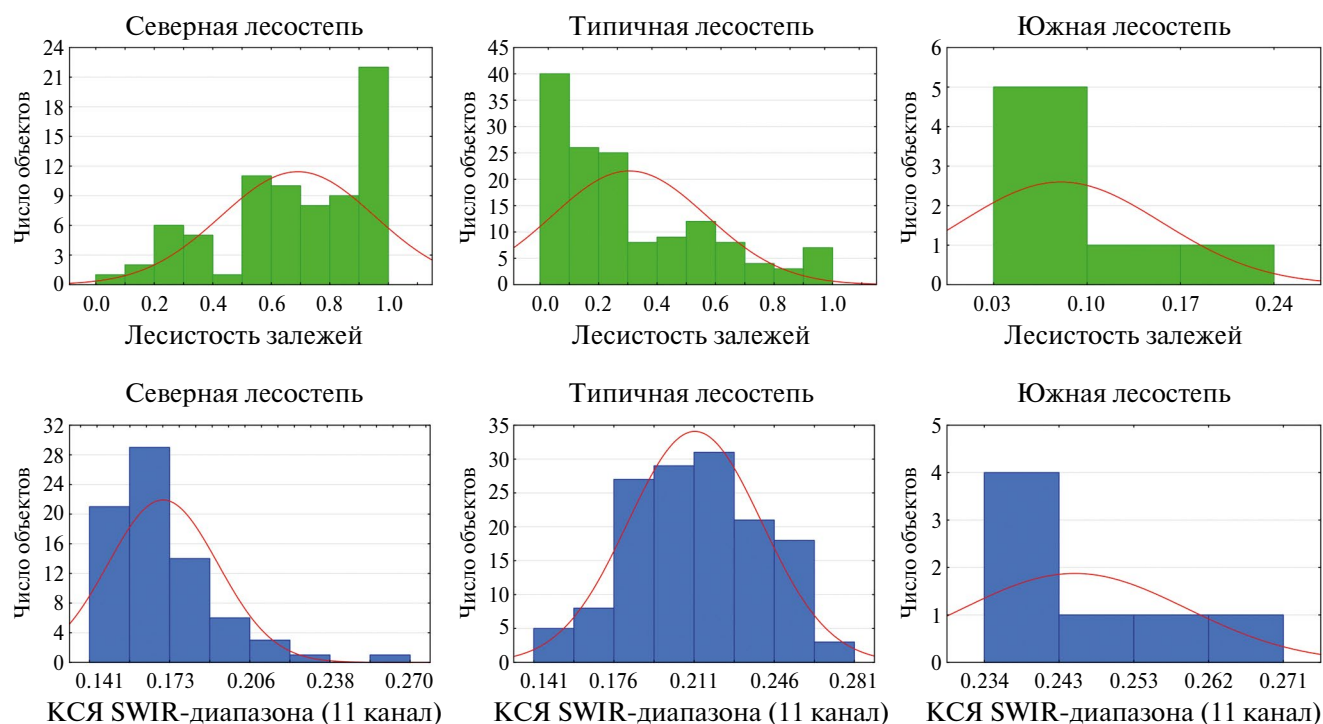
КСЯ – коэффициенты спектральной яркости. Tau M-K – tau Манна-Кендалла на основе многолетних рядов вегетационного индекса NDVI. L – значения, рассчитанные по данным Landsat OLI, M – по данным MODIS, S – по данным Sentinel-2.

существенно проявляется при визуальном анализе угодий в вариантах синтеза инфракрасных и красных каналов спектра (рис. 5), одновременно выступая надежным дешифровочным признаком таких угодий при их выявлении на космических снимках. Соответствующие особенности являются предварительным критерием высокой степени влияния породного состава насаждений на отражательную способность залежных земель.

Анализ угодий с лесистостью выше 65% показал, что наилучшими индикаторами различий залежей по породному составу насаждений являются значения вегетационного индекса, оцененные на основе данных Landsat OLI (табл. 3).

Для них характерны взаимные статистически значимые различия (по величине наименьшей существенности разности) между всеми анализируемыми типами залежей: с лиственными, хвойными и смешанными лесными насаждениями. Вместе с тем стоит отметить более высокую эффективность значений вегетационного индекса и показателей его многолетней динамики (tau Манна-Кендалла) в сравнении с коэффициентами спектральной яркости.

Значения вегетационного индекса NDVI, независимо от того, на основе каких спутниковых данных они были рассчитаны (Landsat, MODIS, Sentinel-2), статистически значимо различны для

**Рис. 4.** Распределение одновозрастных залежей по величине лесистости в спектрально-отражательных характеристиках SWIR-диапазона (по Sentinel-2) в подзонах лесостепи в конце второго десятилетия XXI в.

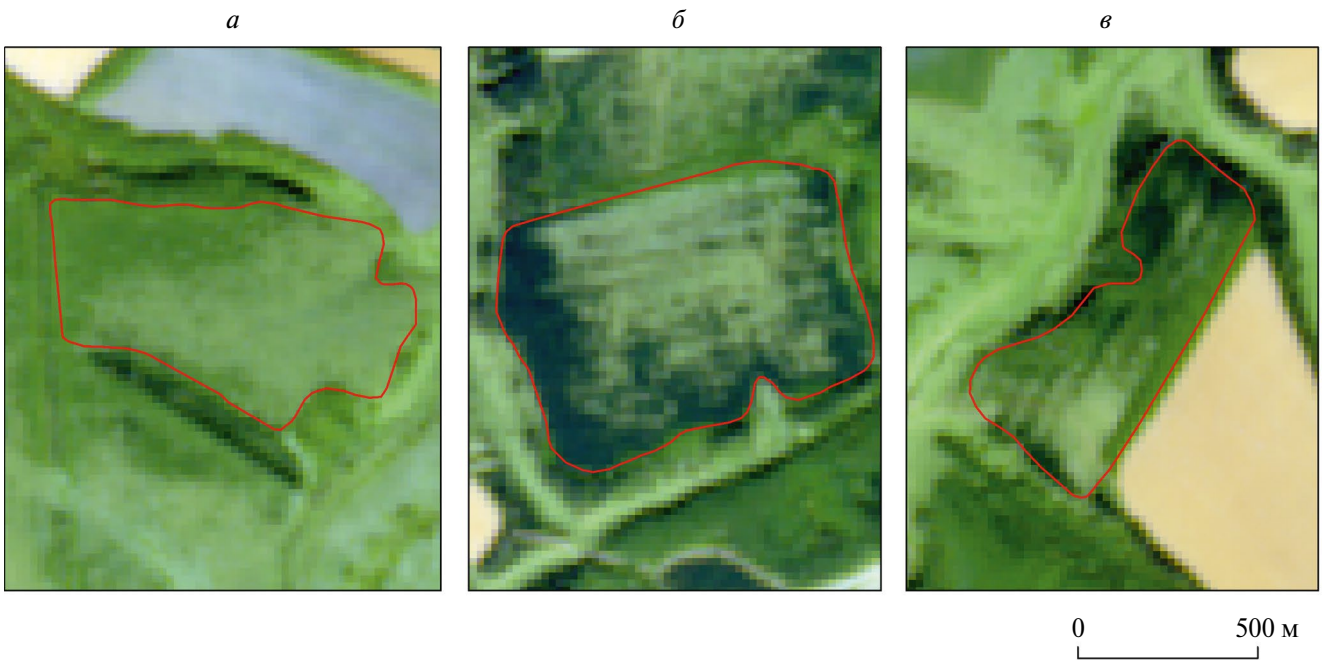


Рис. 5. Примеры залежных земель Среднерусской лесостепи с лиственными (а), хвойными (б) и (в) смешанными насаждениями на снимках Sentinel-2 от 25.08.2018. Синтез каналов 12–11–34 (SWIR2 – SWIR1 – RED).

залежей с лиственными и хвойными породами. Они последовательно уменьшаются в ряду залежей: с лиственными породами – со смешанными насаждениями – с хвойными породами. Для показателя многолетней динамики вегетационного индекса (tau Манна-Кендалла) в этом же ряду характерна обратная закономерность. Для коэффициентов спектральной яркости коротковолнового инфракрасного диапазона, ранее показавших высокую чувствительность к лесистости залежей, такой высокой чувствительности к различиям в породном составе залежей не выявлено.

В свою очередь, более высокая чувствительность вегетационного индекса к присутствию на залежах лиственных, хвойных или смешанных насаждений в сравнении с коэффициентами спектральной яркости может быть обусловлена тем, что NDVI находится в зависимости от надземной фитомассы. Она

достаточно существенно различается для широколиственных и хвойных лесов (Базилевич, 1993). Показатель tau Манна-Кендалла, вычисляемый на основе многолетних рядов вегетационного индекса, таким образом, характеризует интенсивность лесообразовательного процесса на них и одновременно его отличия на залежах с древесной растительностью различного породного состава. В ряду залежей “с лиственными породами – со смешанными насаждениями – с хвойными породами” величина годового прироста лесистости растет и значения tau Манна-Кендалла, вычисляемые по данным MODIS (MOD13Q1), эти различия наглядно продемонстрировали. Несмотря на относительно невысокое пространственное разрешение MODIS, за счет применения многолетних рядов наблюдений, вычисляемых на их основе, показана достаточно высокая контрастность различий в скорости прироста лесистости постагрогенных угодий.

Таблица 3. Сравнение средних значений спектрально-отражательных характеристик по данным Landsat OLI, MODIS и Sentinel-2 для залежей с лиственными, хвойными и смешанными насаждениями

Тип насаждений	КСЯ SWIR _{1L}	NDVI _L	NDVI _M	Tau M-K _M	КСЯ SWIR _{1S}	КСЯ SWIR _{2S}	NDVI _S
Лиственный	0.144 ± 0.002	0.728 ± 0.007	0.801 ± 0.005	0.193 ± 0.008	0.162 ± 0.002	0.075 ± 0.002	0.810 ± 0.007
Смешанный	0.139 ± 0.005	0.695 ± 0.010	0.782 ± 0.011	0.202 ± 0.016	0.162 ± 0.006	0.080 ± 0.004	0.790 ± 0.012
Хвойный	0.133 ± 0.006	0.606 ± 0.012	0.713 ± 0.013	0.376 ± 0.039	0.129 ± 0.005	0.072 ± 0.004	0.740 ± 0.011

КСЯ – коэффициенты спектральной яркости. Tau M-K – tau Манна-Кендалла на основе многолетних рядов вегетационного индекса NDVI. L – значения, рассчитанные по данным Landsat OLI, M – по данным MODIS, S – по данным Sentinel-2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы формирования древесной растительности, протекающие на залежных землях, влияют на ряд их спектрально-отражательных характеристик. Сравнительный анализ спутниковых данных Landsat-8 OLI, Sentinel-2 MSI и информационных продуктов, создаваемых на основе снимков MODIS, показал, что наиболее сильной связью с лесистостью залежей характеризуются значения спектральной отражательной способности коротковолнового инфракрасного диапазона, измеренные по данным Sentinel-2. При этом их сила связи с лесистостью ненамного выше, чем у аналогичных характеристик, вычисленных по данным Landsat OLI. Наиболее эффективным индикатором внутризональных различий залежей по величине прироста лесистости являются абсолютные значения параметра tau Манна-Кендалла, рассчитываемые на основе многолетних рядов вегетационного индекса по данным MODIS. При этом наилучшими показателями распределения залежей по величине лесистости в подзонах лесостепи выступают коэффициенты спектральной яркости коротковолнового инфракрасного диапазона по данным Sentinel-2. Значения вегетационного индекса NDVI по данным Landsat OLI наиболее чувствительны к породному составу насаждений, формирующихся на постагрогенных угодьях. Они статистически значительно различаются для залежей с лиственными, хвойными и смешанными насаждениями. Вместе с тем значения вегетационного индекса и параметры его многолетней динамики показали более высокую чувствительность к породному составу древесной растительности залежей в сравнении с инфракрасными коэффициентами спектральной яркости.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00291.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука. 1993. 293 с.
- Бурлуцкий В.А., Мазуров В.Н., Семешкина П.С., Косолапов В.П. Продукционный потенциал и освоение растительных сообществ залежных земель Мещовского ополья в Калужской области // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2021. № 1. С. 45–52.
- Данилов Д.А., Яковлев А.А., Крылов И.А. Формирование естественных растительных ассоциаций на постагрогенных землях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 242. С. 60–82.
- Данилова И.В., Корец М.А., Рыжкова В.А. Картографирование возрастных стадий лесной растительности на основе анализа разносезонных спутниковых изображений Landsat // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 12–24.
- Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудилов А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И. Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в европейской части России // Почвоведение. 2017. № 5. С. 580–594. DOI: 10.7868/80032180X17050070.
- Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. Москва: ГЕОС, 2010. 416 с.
- Парахневич Т.М., Кирик А.И. Структура и динамика растительного покрова на разновозрастных залежах // Вестник аграрной науки. 2017. № 4(67). С. 43–50.
- Терехин Э.А. Индикация многолетних изменений в растительном покрове залежных земель лесостепи на основе рядов вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 245–252. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
- Терехин Э.А. Влияние лесистости залежных земель лесостепи на спектрально-отражательные характеристики по данным Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 223–235. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235.
- Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Сохранение и оптимизация агроландшафтов Центрального Черноземья // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 1. С. 103–109. DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-103-109.
- Физико-географическое районирование центральных черноземных областей. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1961. 263 с.
- Ходячих И.Н. Смена аспектов фитоценозов на разновозрастных залежах степной зоны Южного Урала // Естественные и технические науки. 2021. № 5(156). С. 77–80.
- Черкасов Г.Н., Масютенко Н.П., Кузнецов А.В. Эволюция залежных земель и перспективы их использования в Центральном Черноземье // Земледелие. 2009. № 7. С. 9–11.
- Широких П.С., Федоров Н.И., Туктамышев И.Р., Бикбаев И.Г., Мартыненко В.Г. Закономерности лесовосстановительных сукцессий на заброшенных сельскохозяйственных землях Башкирского Предуралья // Экология. 2023. № 3. С. 179–187. DOI: 10.31857/S036705972303006X.
- Ershov D. V., Gavriluk E. A., Koroleva N. V., Belova E. I., Tikhonova E. V., Shopina O. V., Titovets A. V., Tikhonov G. N. Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 2. DOI: 10.3390/rs14020322.
- Gerlein-Safdi C., Keppel-Aleks G., Wang F., Froliking S., Mauze-rall D. L. Satellite Monitoring of Natural Reforestation Efforts in China's Drylands // One Earth. 2020. V. 2. № 1. P. 98–108. DOI: 10.1016/j.oneear.2019.12.015.
- He S., Shao H., Xian W., Yin Z., You M., Zhong J., Qi J. Monitoring Cropland Abandonment in Hilly Areas with Sentinel-1 and Sentinel-2 Timeseries // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 15. DOI: 10.3390/rs14153806.
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., Bondur V. et al. Pan Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan-eurasian arctic-boreal areas // Geography. Environment. Sustainability. 2014. № 2(7). P. 13–48.
- Liu C.-C., Chen Y.-H., Wu M.-H.M., Wei C., Ko M.-H. Assessment of forest restoration with multitemporal remote sensing

imagery // Scientific Reports. 2019. V. 9. № 1. P. 7279. DOI: 10.1038/s41598-019-43544-5.

Shang R., Zhu Z., Zhang J., Qiu S., Yang Z., Li T., Yang X. Near-real-time monitoring of land disturbance with harmonized Landsats 7–8 and Sentinel-2 data // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 278. P. 113073. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113073.

Velázquez E., Martínez-Jaraíz C., Wheeler C., Mitchard E.T.A., Bravo F. Forest expansion in abandoned agricultural lands has

limited effect to offset carbon emissions from Central-North Spain // Regional Environmental Change. 2022. V. 22. № 4. P. 132. DOI: 10.1007/s10113-022-01978-0.

Wei Z., Gu X., Sun Q., Hu X., Gao Y. Analysis of the Spatial and Temporal Pattern of Changes in Abandoned Farmland Based on Long Time Series of Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 13. DOI: 10.3390/rs13132549.

Comparative Analysis of Reforestation Indicators on Abandoned Agricultural Lands in the Central Russian Forest-Steppe Based on Remote Sensing Data

E. A. Terekhin¹

¹Belgorod State University, Belgorod, Russia

Natural afforestation of abandoned agricultural lands due to postagrogenic successions leads to changes in the vegetation cover of landscapes in the Central Russian forest-steppe. The article presents a comparative analysis of natural afforestation indicators on abandoned lands, calculated using Landsat OLI, Sentinel-2 MSI and MODIS satellite data. The Sentinel-2-derived indicators are the most informative for assessing the forest cover of abandoned lands. For indicators extracted from Sentinel-2 data, the statistical significance of differences between gradations of forest cover of abandoned lands is highest. The indicators of long-term dynamics of the vegetation index, calculated based on MODIS data, are the most informative for comparing intra-zonal differences in the intensity of abandoned lands afforestation. At the same time, the distribution of abandoned lands by forest cover in the physical-geographical subzones is most pronounced in the histograms of SWIR-reflectance derived from Sentinel-2. Differences in the species composition of forests on abandoned agricultural lands most strongly affect the values of Landsat OLI vegetation index. Its values are more sensitive to differences in the species composition of forests on abandoned lands in comparison with the spectral reflectance.

Keywords: abandoned agricultural land, Central Russian forest-steppe, postagrogenic succession, forest cover, remote sensing data, Landsat, MODIS, Sentinel-2

REFERENCES

Bazilevich N. I. Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii (Biological productivity of ecosystems in Northern Eurasia), Moscow: Nauka, 1993, 293 p. (In Russian).

Burlutskiy V.A., Mazurov V.N., Semeshkina P.S., Kosolapov V.P. Produktionnyy potentsial i osvoenie rastitel'nykh soobshchestv zaleznykh zemel' Meshchovskogo opol'ya v Kaluzhskoy oblasti [Production capabilities and exploitation of fallow lands plant communities of meshchovsky opolye in the kaluga region] // Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki. 2021. № 1. P. 45–52. (In Russian).

Danilov D.A., Yakovlev A.A., Krylov I.A. Formirovaniye estestvennykh rastitel'nykh assotsiatsiy na postagrogennykh zemlyakh [Formation of natural plant associations on post-agrogenic lands] // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2023. № 242. P. 60–82. (In Russian).

Danilova I.V., Korets M.A., Ryzhkova V.A. Kartografirovaniye vozrastnykh stadiy lesnoy rastitel'nosti na osnove analiza raznosezonnykh sputnikovyykh izobrazheniy landsat [Regenerating vegetation age stages mapping based on multi-seasonal landsat satellite imagery] // Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2017. № 4. P. 12–24. (In Russian).

Karelin D.V., Goryachkin S.V., Kudikov A.V., Lunin V.N., Dolgikh A.V., Lyuri D.I., Lopes de Gerenu V.O. Changes in carbon pool and CO₂ emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (luvic phaeozems) in European Russia // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. № 5. P. 559–572. DOI: 10.1134/S1064229317050076.

Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. Dinamika sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii v

XX veke i postagrogennoye vosstanovleniye rastitel'nosti i pochv (Dynamics of agricultural lands of Russia in XX century and postagrogenic restoration of vegetation and soils), Moscow: GEOS, 2010, 416 p. (In Russian).

Parakhnevich V.M., Kirik A.I. Struktura i dinamika rastitel'nogo pokrova na raznovozrastnykh zaleznykh zemel' [The structure and dynamics of vegetation on the different age abandoned fields] // Vestnik agrarnoy nauki. 2017. № 4(67). P. 43–50. (In Russian).

Terekhin E.A. Indikatsiya mnogoletnikh izmeneniy v rastitel'nom pokrove zaleznykh zemel' lesostepi na osnove ryadov vegetatsionnogo indeksa NDVI [Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series] // Komp'yuternaya optika. 2021. V. 45. № 2. P. 245–252. (In Russian). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.

Terekhin E.A. Vliyanie lesistosti zaleznykh zemel' lesostepi na spektral'no-otrazhatel'nye kharakteristiki po dannym Sentinel-2 [Effect of abandoned agricultural lands forest cover on Sentinel-2 spectral response in forest-steppe natural zone] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 4. P. 223–235. (In Russian).

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235.

Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. Sokhraneniye i optimizatsiya agrolandshaftov Tsentral'nogo Chernozem'ya [Preservation and optimization of agrolandscapes of the Central Chernozem Zone] // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2017. № 1. P. 103–109. (In Russian). DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-103-109.

Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye tsentral'nykh chernozemnykh oblastey [Physico-geographical zoning of the central cher-

- nozem regions]. Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo universiteta, 1961. 263 p. (In Russian).
- Khodyachikh I. N.* Smena aspektov fitotsenozov na raznovozrastnykh zalezkhakh stepnoy zony Yuzhnogo Urala [Change of phytocenosis aspects on mixed in terms of age deposits of the Southern Urals steppe zone] // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2021. № 5(156). P. 77–80. (In Russian).
- Cherkasov G. N., Masyutenko N. P., Kuznetsov A. V.* Evolyutsiya zalezhnykh zemel' i perspektivy ikh ispol'zovaniya v Tsentral'nom Chernozem'e [Evolution of fallow lands and perspectives of its use in Central chernozem region] // *Zemledelie*. 2009. № 7. P. 9–11. (In Russian).
- Shirokikh P. S., Fedorov N. I., Tuktamyshev I. R., Bikbaev I. G., Martynenko V. G.* Zakonomernosti lesovosstanovitel'nykh suksessiy na zabroshennykh sel'skokhozyaystvennykh zemlyakh Bashkirskogo Predural'ya // *Ekologiya*. 2023. № 3. P. 179–187. (In Russian). DOI: 10.31857/S036705972303006X.
- Ershov D. V., Gavriluk E. A., Koroleva N. V., Belova E. I., Tikhonova E. V., Shopina O. V., Titovets A. V., Tikhonov G. N.* Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 2. DOI: 10.3390/rs14020322.
- Gerlein-Safdi C., Keppel-Aleks G., Wang F., Froliking S., Mauzerall D. L.* Satellite Monitoring of Natural Reforestation Efforts in China's Drylands // *One Earth*. 2020. V. 2. № 1. P. 98–108. DOI: 10.1016/j.oneear.2019.12.015.
- He S., Shao H., Xian W., Yin Z., You M., Zhong J., Qi J.* Monitoring Cropland Abandonment in Hilly Areas with Sentinel-1 and Sentinel-2 Timeseries // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 15. DOI: 10.3390/rs14153806.
- Lappalainen H., Petaja T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., Bondur V. et al.* Pan Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan-eurasian arctic-boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. № 2(7). P. 13–48.
- Liu C.-C., Chen Y.-H., Wu M.-H.M., Wei C., Ko M.-H.* Assessment of forest restoration with multitemporal remote sensing imagery // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. № 1. P. 7279. DOI: 10.1038/s41598-019-43544-5.
- Shang R., Zhu Z., Zhang J., Qiu S., Yang Z., Li T., Yang X.* Near-real-time monitoring of land disturbance with harmonized Landsats 7–8 and Sentinel-2 data // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 278. P. 113073. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113073.
- Velázquez E., Martínez-Jaraíz C., Wheeler C., Mitchard E. T. A., Bravo F.* Forest expansion in abandoned agricultural lands has limited effect to offset carbon emissions from Central-North Spain // *Regional Environmental Change*. 2022. V. 22. № 4. P. 132. DOI: 10.1007/s10113-022-01978-0.
- Wei Z., Gu X., Sun Q., Hu X., Gao Y.* Analysis of the Spatial and Temporal Pattern of Changes in Abandoned Farmland Based on Long Time Series of Remote Sensing Data // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 13. DOI: 10.3390/rs13132549.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА В ПРЕДЕЛАХ НОВОГОДНЕНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ

© 2024 г. Г. А. Миловский^{1, *}, А. Д. Апарин¹, А. Р. Ибрагимов¹, Е. Э. Тюкова^{1, 2}

¹Научный геоинформационный центр РАН (НГИЦ РАН), Москва, Россия

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: oregas@mail.ru

Поступила в редакцию 06.06.2023 г.

При дешифрировании материалов космической съемки среднего (Landsat-7) и высокого (Канопус-ПСС, Ресурс-П) разрешения и результатов магнитной и гравиметрической съемки в Новогодненском рудном поле (Q-42-VII) выявлены разновозрастные линейные, дуговые и кольцевые линейaments различного ранга. Показана важная роль дизъюнктивов северо-восточного и субмеридионального простираения, определяющих блоковое строение рудного поля и контроль золотого оруденения.

Ключевые слова: многозональная космическая съемка, поисковые признаки, месторождения, золото, серебро, Полярный Урал

DOI: 10.31857/S0205961424010047, **EDN:** GMSUFV

ВВЕДЕНИЕ

Материалы дистанционного зондирования позволяют проводить независимую оценку пространственного местоположения основных структурных элементов, выявленных на основании геологической съемки, в ряде случаев с их помощью можно выявить дизъюнктивы, не отображенные на геологической карте. Космическая съемка высокого разрешения использована для детализации структурной позиции месторождений Новогодненского рудного поля Полярного Урала. Полигенная природа золоторудных объектов предопределила комплексный подход к изучению рудоконтролирующих структур на исследуемой территории на основе геолого-геофизических и космических данных. Дешифрирование на среднемасштабном уровне осуществлялось на основе космической съемки Landsat-7; на крупномасштабном и детальном уровне — с помощью многозональной космической съемки Канопус-ПСС (виток 22059, включение 4; виток 24068, включение 4) и Ресурс-П (виток 2075, включение 2). Материалы космической съемки и геолого-геофизические карты представлены в среде ArcGIS ver. 10, обработка космоданных проводилось с помощью программных средств ENVI и Adobe Photoshop.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА РАБОТ

В строении Новогодненского района (рис. 1) участвуют структурно-вещественные комплексы раннепротерозойского, рифейско-раннекембрийского, позднекембрийско-пермского, мезозойского структурных этажей (Государственная..., 2014). Центральную часть исследуемого района занимает Северо-Войкарский блок и Няровечская пластина. Эти образования надвинуты на метаморфиты Харбейского мегаблока по зоне Главного Уральско-го надвига с образованием тектонического меланжа. Няровечская пластина сложена магматическими формациями, сменяющими друг друга от лежащего бока к висячему: дунит-гарцбургитовая (райизско-войкарский комплекс) и дунит-клинопироксенит-габбровая (кэршорский комплекс). Северо-Войкарский блок сложен преимущественно магматитами собского и конгорского полифазных комплексов. Преобладают кварцевые диориты собского комплекса, морфология кровли и подошвы которого определяет внутреннюю структуру блока. В состав блока входит Тоупугольская палеовулканическая структура. Южная часть Новогодненского района перекрыта мезозойским плитным чехлом.

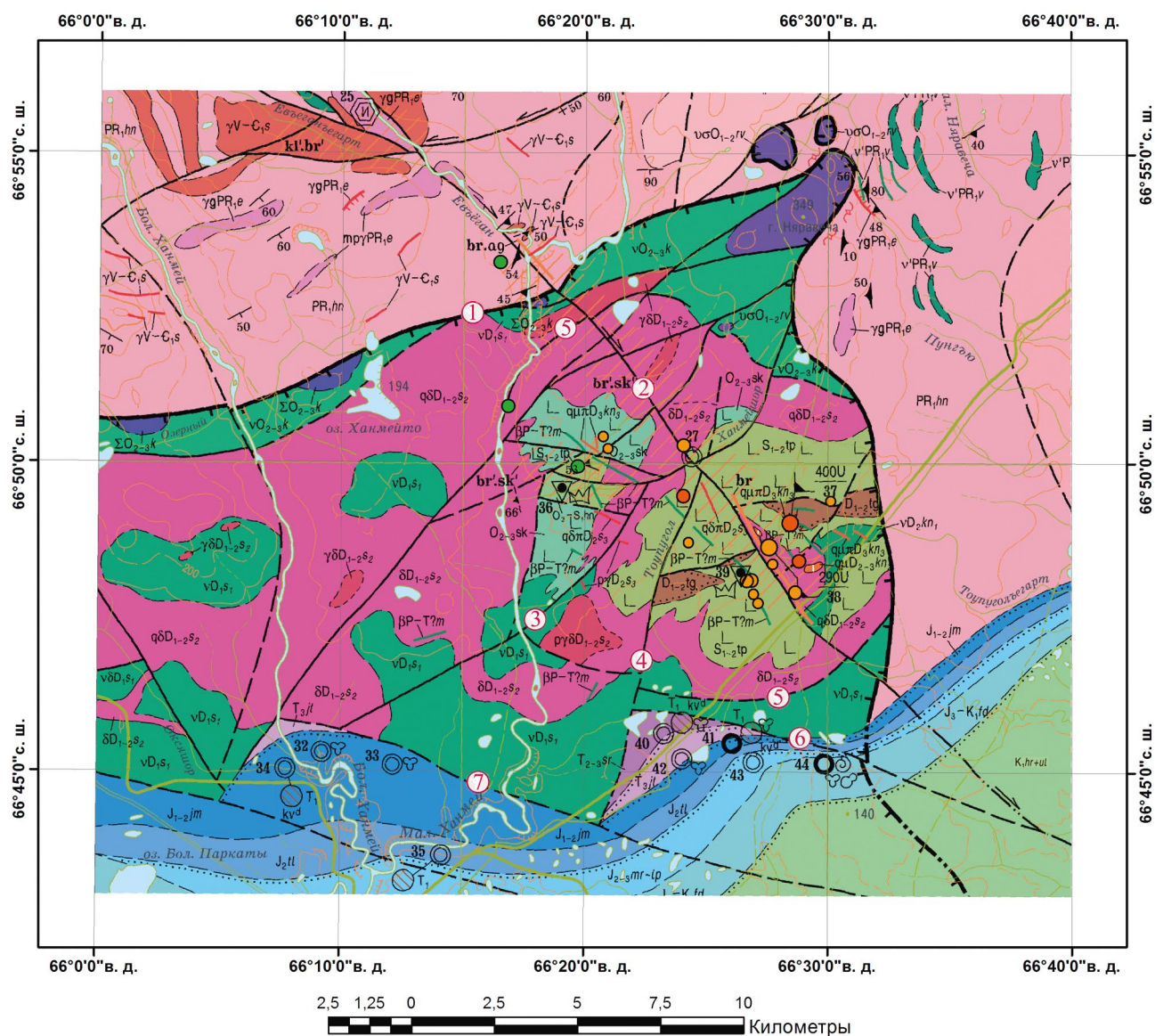
В пределах исследуемого района выделяются дизъюнктивные структуры первого (Главный Уральский надвиг) и второго (Евѣганский, Межханмейский, Тоупугольский, Приобский и др.) ранга. Разломы второго ранга подразделяются на северо-западные, субмеридиональные, северо-восточные и субширотные. Разломы северо-западного и северо-восточного направлений были заложены в допалеозойское время и активизированы в мезозое (Государственная..., 2014). Их отличительная особенность – протяженность и прямолинейность в плане, секущий характер по отношению к границам структурно-формационных зон. В плане это зоны шириной от нескольких десятков до сотен метров со сложным внутренним строением. Тоупугольскую палеовулканическую структуру контролируют северо-восточные, северо-западные и субширотные разломы сдвига-сбросовой морфологии с достаточно крутыми падениями сместителей (55° – 75°). Они представлены как системой одиночных швов, так и зонами повышенной трещиноватости с глиной трения и элементами милонитизации. Дизъюнктивы более высоких порядков имеют различную направленность и представлены сбросами, сдвигами, надвигами либо их комбинациями. Они совместно со структурами первого и второго порядков создают исключительно сложный блоковый рисунок. Как правило, эти структуры сопровождаются зонами дробления, катаклаза и рассланцевания.

Современное тектоническое строение района определилось развитием мезозойской блоковой тектоники, наложенной на палеозойские и более древние структуры. Примером крупных разломов активизационной природы могут служить Приобские разломы северо-западного простирания. Для них характерны сбросо-сдвиговые деформации и отмечается связь с неотектоническими дислокациями. Расположенное в пределах Тоупугольской палеовулканической структуры Новогодненское рудное поле соответствует тектоническому блоку в пределах периферической интрузив-надинтрузивной зоны крупного батолитоподобного массива гранитоидов собского комплекса, прорванного более поздними интрузивными образованиями конгорского и малоханмейского комплексов (Волчков и др., 2001). Согласно (Викентьев, Иванова и др., 2021), рудное поле ($\sim 8 \text{ км}^2$) представляет собой локальное вулcano-тектоническое поднятие, осложняющее вулcano-тектоническую депрессию, и приурочено к пересечению зон разломов субмеридионального, северо-восточного и северо-западного простираний, которые ограничивают его и контролируют позицию золоторудных месторождений и проявлений.

Согласно имеющимся представлениям (Викентьев и др., 2021; Волчков и др., 2001), Новогодненское золоторудное поле формировалось в несколько этапов. На раннем островодужном этапе происходило накопление вулcanoгенно-осадочных отложений тоупугольской толщи (S_{1-2tp}). К прослоям тонкообломочных пород флишеидных ритмов тоупугольской толщи приурочена стратиморфная сульфидная (пирит) минерализация. Затем была сформирована существенно осадочная (конгломераты, гравелиты, алевропесчаники, известняки) тоупугольгартская толща (D_{1-2tg}). Эти породы прорваны многофазными интрузиями габбро-диорит-гранодиоритового собского комплекса (D_{1-2s}), становление которого завершилось серией даек диоритовых порфириров и плагиогранит-порфириров. На завершающем этапе были сформированы монцогаббро-граносиенитовый конгорский комплекс (D_{2-3kn}) и дайки габбро-долеритов малоханмейского (мусюрского) комплекса ($P-T?m$).

В рудном поле выделяются два месторождения и ряд рудопроявлений. Месторождение Новогоднее-Монто локализовано в контактовой зоне Новогодненского штока диоритовых порфириров собского комплекса. Во вмещающих породах наряду с пропилитизацией развиты ороговикование, мраморизация и скарны с эпидот-гранат-магнетитовой минерализацией. Определяющее значение в локализации золото-скарнового оруденения приобретает присутствие горизонтов карбонат-содержащих пород и чашек их переслаивания с лавами и пирокластикой основного состава. С магнетитовыми телами сопряжены участки развития золото-магнетит-сульфидного минерального комплекса. Золоторудные тела характеризуются сложной гнездо- и линзообразной морфологией, их контуры совпадают с участками повышенной (первые проценты) сульфидизации магнетитовых скарновых тел. На месторождении Новогоднее-Монто выделяются два основных типа руд: I – золотосодержащий сульфидно-магнетитовый скарновый; II – золото-сульфидно-кварцевый жильно-прожилково-вкрапленный. Главными рудными минералами месторождения являются пирит, магнетит, гематит, халькопирит и сфалерит.

Минерализованные зоны месторождения Петропавловское представляют собой тяготеющие к апикальным частям интрузий порфировых диоритов линейно-штокверковые тела прожилково-вкрапленных руд. В осевых частях последних локализируются жильно-прожилковые тела богатых золотом руд. На флангах штокверка, вне центральной части месторождения, установлена жильная золото-полиметалло-кварцевая минерализация (Викентьев, Мансуров и др., 2017). Характер распределения золота определяется пересечениями

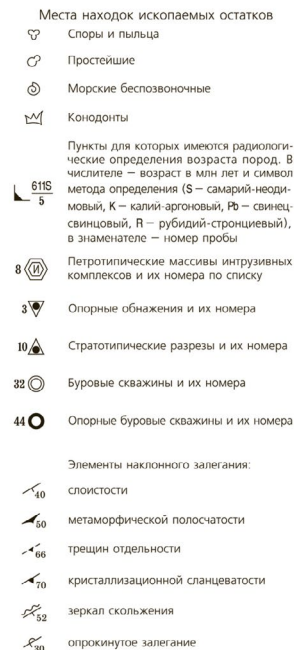


Условные обозначения – см. рис 1а

- – месторождение Ау
 - – проявления Ау
 - – проявления Ау, Fe
 - – месторождение Ау, Fe
 - – проявления Cu, Au
 - – пункты минерализации Ау
 - – проявления Ау, Fe
 - – проявления Cu, Au
 - – пункты минерализации Ау
- ① – Главный Уральский надвиг; ② – Евъёганский разлом;
- ③ – Межханмейский шов; ④ – Тоупугольский разлом;
- ⑤ – Границы Тоупугольской палеовулканической структуры;
- ⑥ – Приобский I разлом; ⑦ – Приобский II разлом;

Рис. 1. Новогодненский район. Геологическая карта масштаба 1:200000. а – условные обозначения к рисунку 1.

a



зон субмеридионального (север-северо-западного, север-северо-восточного) и субширотного (восток-северо-восточного) направления. Главное субмеридиональное направление концентрационных зон золоторудной минерализации согласуется в плане с преобладающим простираем тел диоритовых порфириров собского комплекса; максимумы содержаний золота тяготеют к экзоконтактовым частям гипабиссальных образований. Субширотное направление совпадает в плане с ориентацией жильно-прожилковых зон кварц-карбонатного состава. Основная продуктивная золото-сульфидная ассоциация (пирит + халькопирит + сфалерит + пирротин) приурочена к хлорит-альбитовым и альбит-кварцевым метасоматитам.

Золотое оруденение Новогодненского рудного поля имеет полигенный и полихронный характер (Григорьев и др., 2003; Черняев и др., 2005). Скарново-магнетитовые руды месторождения Новогоднее-Монто сформировались при внедрении диоритоидов главной фазы собского комплекса, золото-порфиновые крупнообъемные штокверки Петропавловского месторождения связаны с кварцевыми диорит-порфиритами и плагиогранит-порфирами поздней фазы собского комплекса. Березитизация значительно проявлена на Петропавловском месторождении, а для месторождения Новогоднее-Монто характерно распространение ассоциации скарнового типа (магнетит-пиритовая, золото-сульфидно-магнетитовая) и кварцево-жильной с комплексом медных минералов (халькопирит, борнит). Для золотоносных ассоциаций руд месторождения Петропавловское характерно присутствие теллуридов золота и серебра в виде мельчайших включений в главном минерале руд – пирите, тогда как теллуридная минерализация на месторождении Новогоднее-Монто проявлена незначительно.

Предшествующие исследования по дистанционному зондированию района работ с помощью космической съемки Landsat (Викентьев, Мансуров и др., 2017; Иванова и др., 2019; Иванова, Выхристенко и др., 2021) позволили выделить в пределах Новогодненского палеовулкана кольцевые, дуговые и радиальные элементы. Дешифрируемые радиальные зоны разломов протяженностью ~15 км соответствуют разломам фундамента, более мелкие линейные зоны связаны с разломами северо-восточного и северо-западного направлений. Отмечается, что первостепенное значение в рудолокализации играли крупные кольцевые морфоструктуры, реконструированные в качестве корневых частей длительно развивавшихся стратовулканов. Показано, что перспективные на золото площади могут быть выражены при космической съемке контраст-

ными проявлениями индексов оксида железа (Викентьев, Иванова и др., 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Дешифрирование структур Новогодненского района (рис. 2) выявило ряд существенных различий с результатами геологической съемки. С одной стороны, пространственное положение Главного Уральского надвига и Приобских разломов по данным космодешифрирования и геокартирования в существенной степени совпадает, за исключением сдвиговых деформаций Главного Уральского надвига по разломам северо-западного простираения. Вместе с тем, в строении Северо-Войкарского блока, образованного магматитами собского и конгорского комплексов, а также ордовик-силурийскими вулканогенными образованиями по данным космодешифрирования выявлен ряд новых элементов: большим развитием пользуются кольцевые структуры второго ранга (2–5 км); не наблюдается сквозного трассирования Евъёганского разлома через Тоупугольскую палеовулканическую структуру, в пределах которой отдешифрированы разломы восток-северо-восточного простираения; установлены многочисленные дуговые разломы, развитые в поле развития магматитов собского комплекса. По данным космодешифрирования на площади, относимой к Тоупугольской палеовулканической структуре, можно выделить две кольцевые структуры, одна из которых сложена образованиями тоупугольской толщи (в северной части этой структуры расположено Новогодненское рудное поле), а другая представлена вулканогенно-осадочными образованиями соколинской и ханмейшорской толщ и магматитами преимущественно собского комплекса.

В магнитном поле эти две кольцевые структуры, обозначим их как Петропавловская и Ханмейшорская, существенно различаются. Значения магнитного поля Петропавловской структуры варьируют в пределах $+50 \div +200$ нТл (рис. 3), к этой структуре относятся 80% золоторудных объектов, включая месторождения Петропавловское и Новогоднее-Монто. Ханмейшорская кольцевая структура расположена в области отрицательных значений магнитного поля, только в южной ее части, где развиты вулканы соколинской свиты, отмечены положительные значения магнитного поля. Гравитационное поле в узком интервале значений $+30 \div +35$ мГал отличает более 90% золоторудных объектов исследуемой площади (рис. 4). Петропавловская и Ханмейшорская кольцевые структуры характеризуются значениями гравитационного поля $+25 \div +40$ мГал.

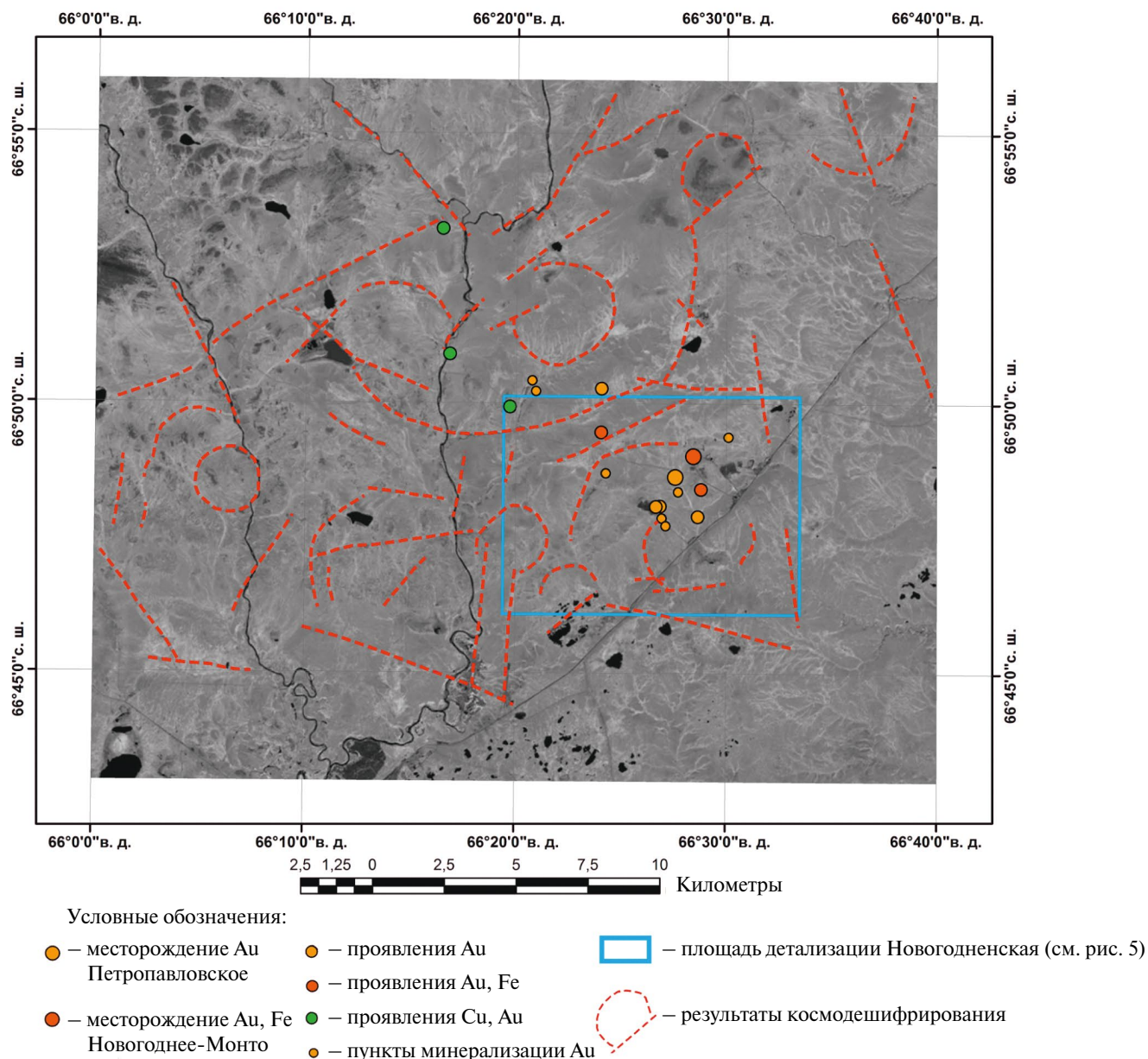


Рис. 2. Новогодненский район. Результаты дешифрирования съемки Landsat-7.

Детализация Новогодненской площади (рис. 5) с месторождениями Новогоднее-Монто и Петропавловское позволяет рассматривать Тоупугольский разлом как дуговую структуру, ограничивающую с запада выявленную при космодешифрировании Петропавловскую кольцевую структуру, в пределах которой расположено Новогодненское рудное поле.

По геологическим данным (Геологическая..., 2014), золото-сульфидно-кварцевые зоны месторождения Новогоднее-Монто представляют собой

в структурном плане единую полосу север-северо-западного направления протяженностью 400 м. Характер распространения минерализации в них свидетельствует о ее формировании в условиях малоамплитудных правосдвиговых деформаций по основной структуре с развитием системы оперяющих субмеридиональных трещин отрыва. Падение зон крутое северо-восточное. Золоторудная зона месторождения Петропавловское приурочена к субмеридиональному Новогодненскому разлому. Центральная часть зоны длиной 1100–1200 м и шириной

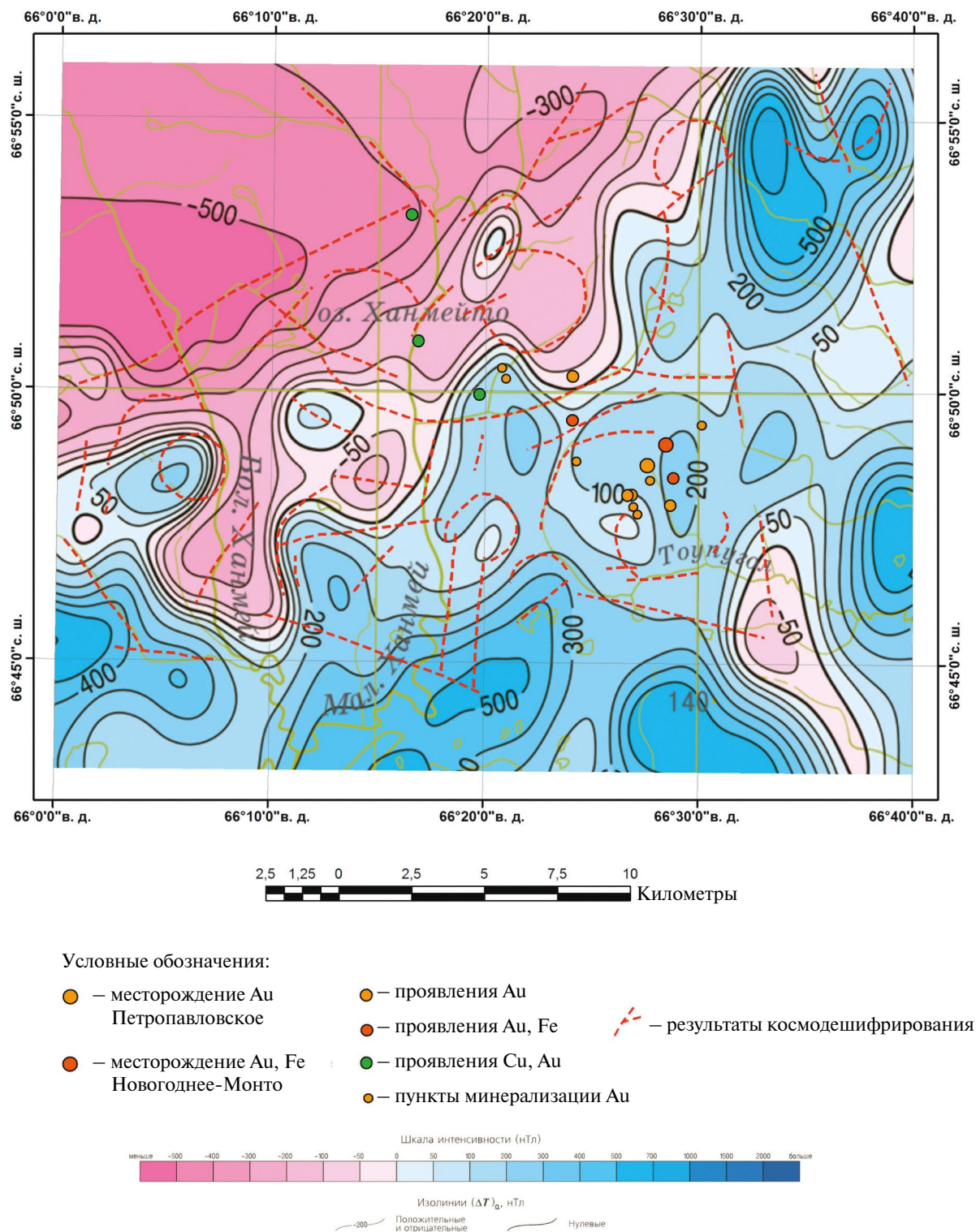


Рис. 3. Новогодненский район. Карта аномального магнитного поля масштаба 1:500 000.

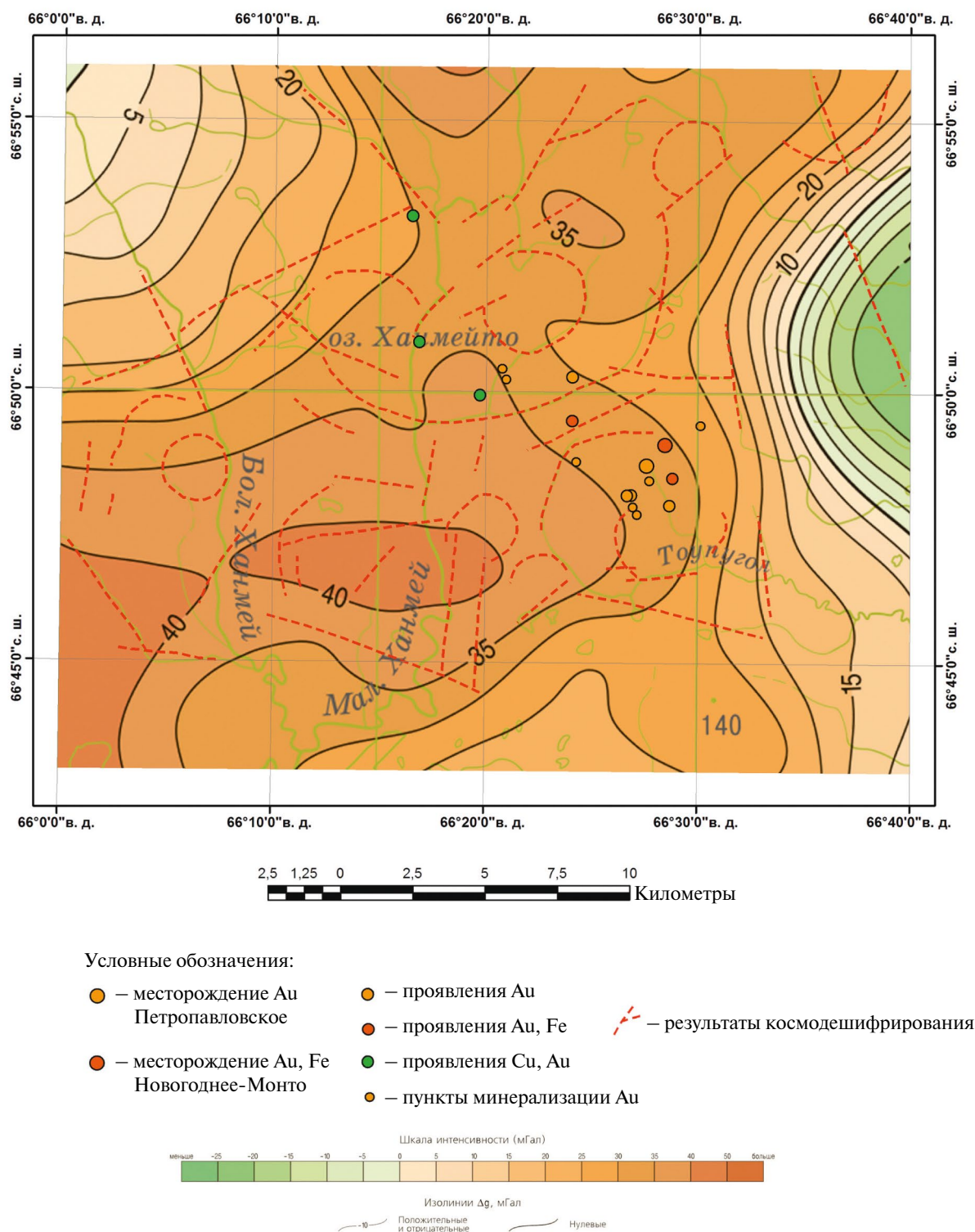


Рис. 4. Новогодненский район. Карта гравиметрических аномалий масштаба 1:500 000.

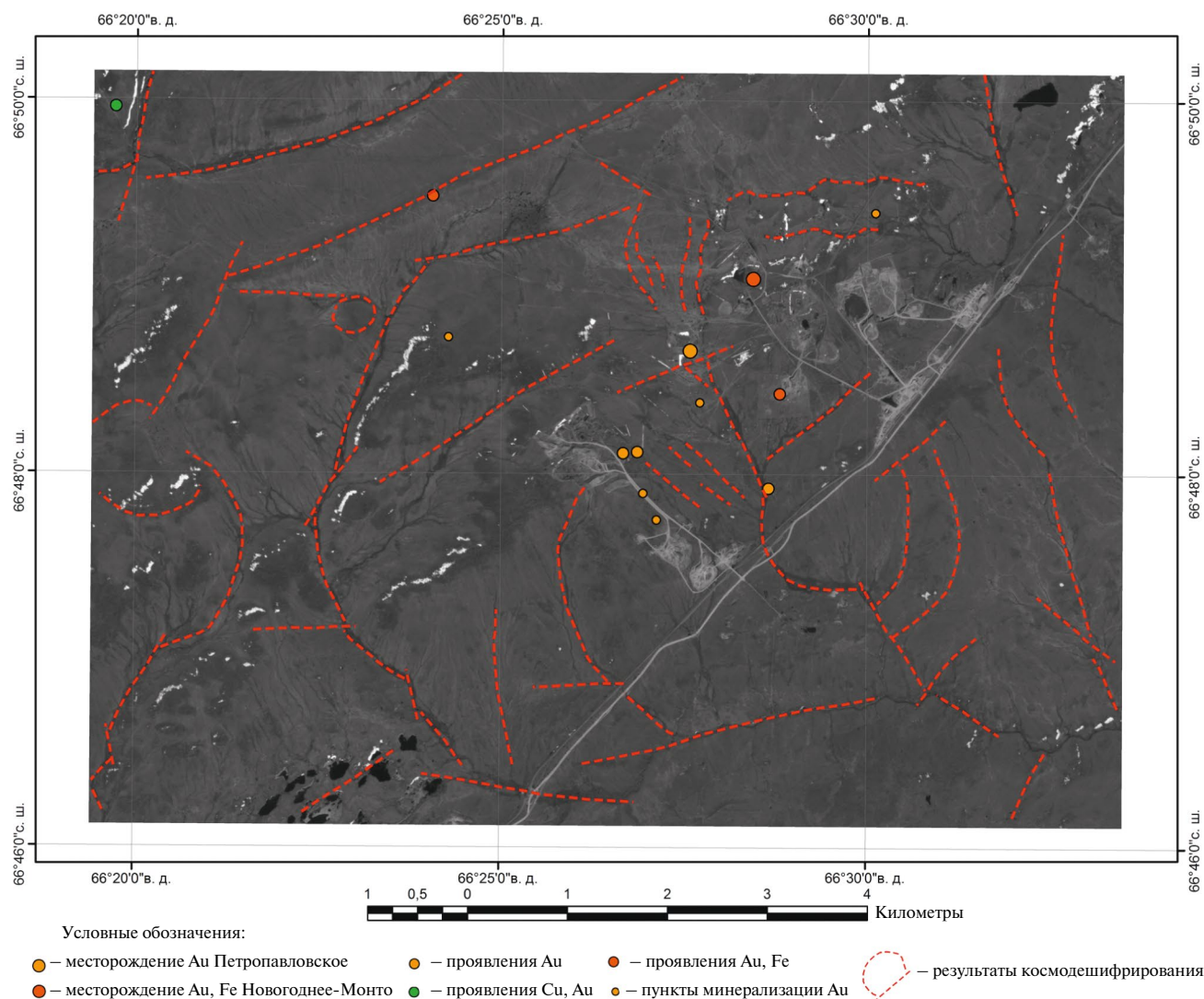


Рис. 5. Площадь детализации Новогодненская. Результаты дешифрирования съемки Канопус-ПСС маршрут № 24068_04 (5 июня 2022 г.)

до 150–200 м представляет собой субвертикальную штокверковую зону в гидротермально измененных вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах и прорывающих их гранодиоритах. В пределах Новогодненского рудного поля (рис. 6, рис. 7) приоритетными являются дизъюнктивы субмеридионального и восток-северо-восточного простирания, вместе формирующие блоковое строение рудного поля. Северный фланг месторождения Петропавловское представляет собой наиболее перспективный участок для постановки разведочных работ.

ВЫВОДЫ

Применение космической съемки высокого разрешения позволило детализировать структурные

особенности Новогодненского района. В результате космодешифрирования установлены линейные, дуговые и кольцевые структуры первого (6–12 км) и второго (2–5 км) ранга, сформированные на рифейско-раннекембрийском, позднекембрийско-пермском и мезозойском этапах. Определены диапазоны значений магнитного и гравитационного полей благоприятные для локализации золотого оруденения. Выявлена определяющая роль дизъюнктивов субмеридионального и северо-восточного направления при формировании блокового строения Новогодненского рудного поля. В качестве первоочередного для постановки разведочных работ предложен участок на северном фланге Петропавловского месторождения.

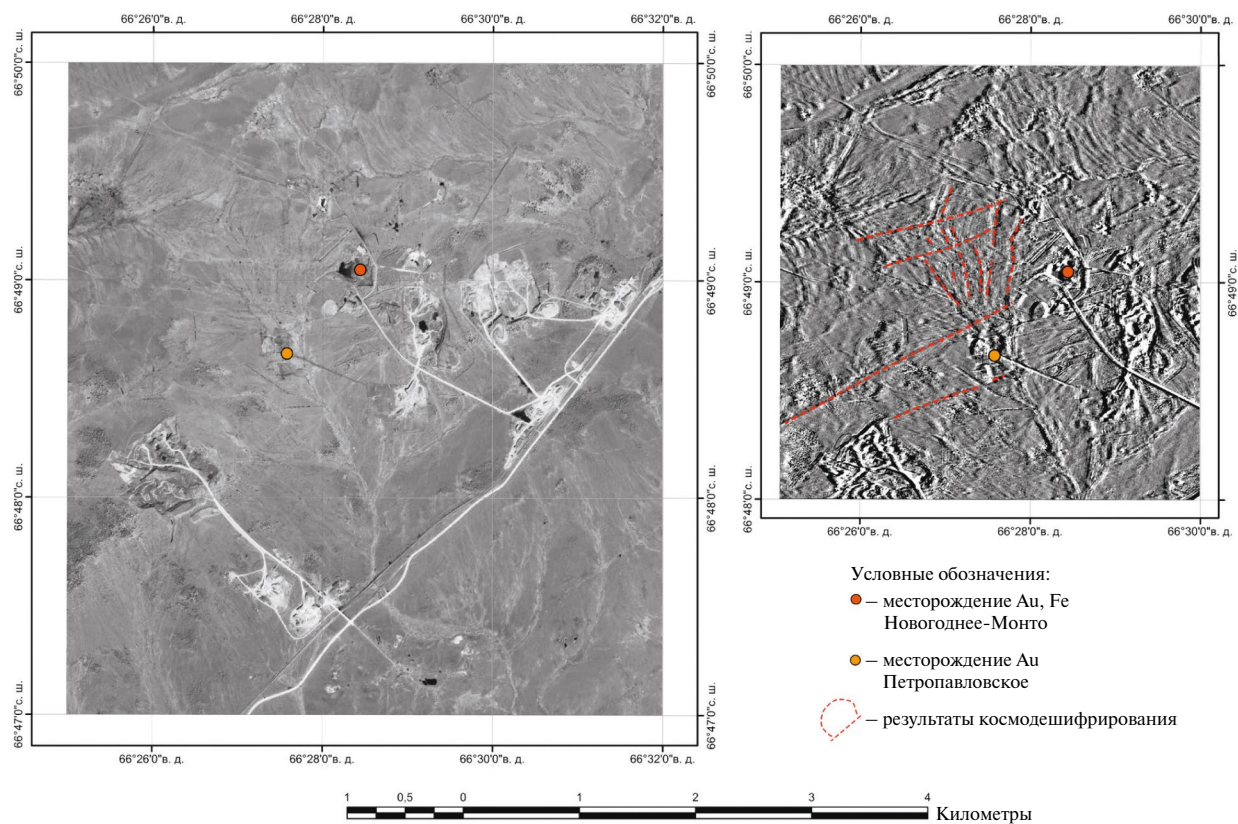


Рис. 6. Новогодненское рудное поле. Космическая съемка Канопус-ПСС маршрут № 22059_04 (6 июля 2021 г.).

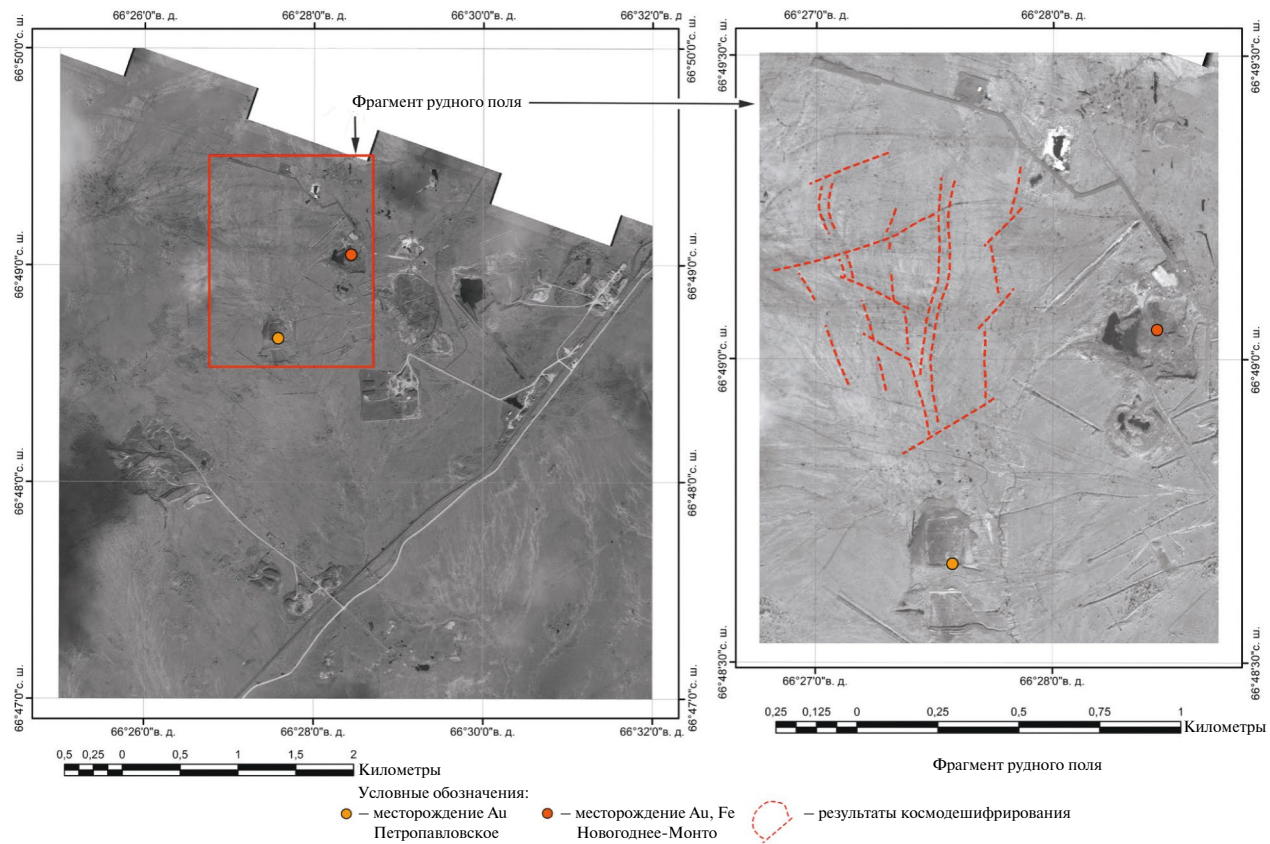


Рис. 7. Новогодненское рудное поле. Космическая съемка Ресурс-П маршрут № 2075_2 (19 августа 2015 г.).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме Госзадания № 122040300015-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Викентьев И. В., Мансуров Р. Х., Иванова Ю. Н. Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // Геол. руд. месторожд. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.

Викентьев И. В. Полярный Урал – металлогения и перспективы исследований. Смирновский сборник: Проблемы минерации, экономической геологии и минеральных ресурсов. М.: МАКСПресс. 2021. С. 193–208.

Викентьев И. В., Иванова Ю. Н., Нафигин И. О., Бортников Н. С. Структурная позиция и типизация метасоматических зон, Полярный Урал: первый опыт современного космического зондирования Земли // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 115–122.

Волчков А. Г., Барышев А. Н., Черемисин А. А. Отчет по теме № 29 “Анализ золотонности территории ЯНАО, сопровождаемый поисково-ревизионными работами на перспективных участках”. М.: ЦНИГНИ, 2001, Росгеофонд, инв. № 475968.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Полярно-

Уральская. Лист Q-42-VII, VIII (Обской). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014, 384 с.

Григорьев В. В., Мартыанов Е. В. Полиформационность метасоматитов месторождения Новогоднее-Монто и их отношение к золотому оруденению // Эволюция внутриконтинентальных подвижных поясов: тектоника, магматизм, метаморфизм, седиментогенез, полезные ископаемые: Материалы науч. конф. “IX Чтения А. Н. Заварицкого”. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2003. С. 164–166.

Иванова Ю. Н., Выхристенко Р. И., Викентьев И. В. Геологическая позиция и структурный контроль оруденения Тоупугол-Ханмейшорского района (Полярный Урал) по результатам дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 66–76.

Иванова Ю. Н., Выхристенко Р. И. Структурный контроль золоторудной минерализации восточного склона Полярного Урала по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 60–63.

Черняев Е. В., Черняева Е. И., Седельникова А. Ю. Геология золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто (Полярный Урал) // Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): Материалы науч. конф. “XI Чтения А. Н. Заварицкого”. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2005. С. 131–137.

Application of Earth Remote Sensing Materials to Refine the Localization of Gold Deposits within the Novogodnenskoye Ore Field in the Polar Urals

G. A. Milovsky¹, A. D. Aparin¹, A. R. Ibragimov¹, E. E. Tyukova^{1,2}

¹Scientific Geoinformation Center of the Russian Academy of Sciences (NGIC RAS), Moscow, Russia

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Interpretation of medium (Landsat-7) and high (Kanopus-PSS, Resurs-P) satellite imagery materials and the results of magnetic and gravimetric surveys in the Novogodnensky ore field (Q-42-VII) revealed uneven-aged linear, arc and ring lineaments of various ranks. The important role of disjunctives of northeastern and submeridional strike, which determine the block structure of the ore field and control gold mineralization, is shown.

Keywords: multi-zone satellite imagery, prospecting features, deposits, gold, silver, Polar Urals

REFERENCES

Vikent'yev I. V., Mansurov R. Kh., Ivanova Yu. N. Zoloto-porfirovoye Petropavlovskoye mestorozhdeniye (Polyarnyy Ural): geologicheskaya pozitsiya, mineralogiya i usloviya obrazovaniya // Geol. rud. mestorozhd. 2017. T. 59. № 6. P. 501–541. (In Russian).

Vikent'yev I. V. Polyarnyy Ural – metallogeniya i perspektivy issledovaniy. – Smirnovskiy sbornik: Problemy mineragenii, ekonomicheskoy geologii i mineral'nykh resursov. – Moskva: MAKSPress. 2021. P. 193–208. (In Russian).

Vikent'yev I. V., Ivanova Yu. N., Nafigin I. O., Bortnikov N. S. Strukturnaya pozitsiya i tipizatsiya metasomaticheskikh zon, Polyarnyy Ural: pervyy opyt sovremennogo kosmicheskogo zondirovaniya Zemli // Doklady RAN. Nauki o Zemle. 2021. V. 500. № 2. P. 115–122. (In Russian).

Volchkov A. G., Baryshev A. N., Cheremisin A. A. Otchet po teme № 29 “Analiz zolotonosti territorii YANAO, soprovozhdenyy poiskovo-revizionnymi rabotami na perspektivnykh uchastkakh”. М.: TSNIGNI, 2001, Rosgeofond, inv. № 475968. (In Russian).

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200 000. Izdaniye vtoroye. Seriya Polyarno-Ural'skaya. List Q-42-VII, VIII (Obskoy). Ob"yasnitel'naya zapiska. SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2014. P. 384. (In Russian).

Grigor'yev V. V., Mart'yanov Ye. V. Poliformatsionnost' metasomatitov mestorozhdeniya Novogodneye-Monto i ikh otnosheniye k zolotomu orudneniyu // Evolyutsiya vnutrikontinental'nykh podvizhnykh poyasov: tektonika, magmatizm, metamorfizm, sedimentogenez, poleznyye iskopayemyye: Materialy nauch. konf. “IX Chteniya A. N. Zavaritskogo”. Yekaterinburg: IGIG UrO RAN, 2003. P. 164–166. (In Russian).

Ivanova Yu.N., Vykhristenko R.I., Vikent'yev I.V. Geologicheskaya pozitsiya i strukturnyy kontrol' orudneniya Toupugol-Khanmeyshorskogo rayona (Polyarnyy Ural) po rezul'tatam distantsionnogo zondirovaniya // Issled. Zemli iz kosmosa. 2019. № 3. P. 66–76. (In Russian).

Ivanova Yu.N., Vykhristenko R.I. Strukturnyy kontrol' zoloto-rudnoy mineralizatsii vostochnogo sklona Polyarnogo Urala po rezul'tatam analiza mul'tispektral'nykh snimkov kosmicheskogo

apparata Landsat 8 // Issled. Zemli iz kosmosa. 2021. № 6. P. 60–63. (In Russian).

Chernyayev Ye.V., Chernyayeva Ye.I., Sedel'nikova A. Yu. Geologiya zoloto-skarnovogo mestorozhdeniya Novogodneye-Monto (Polyarnyy Ural) // Skarny, ikh genezis i rudonosnost' (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): Materialy nauch. konf. "XI Chteniya A.N. Zavaritskogo". Yekaterinburg: IGIG UrO RAN, 2005. P. 131–137. (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5, ОСНОВАННЫХ НА СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2024 г. Г. В. Шевченко^{1,2,*}, Ж. Р. Цхай¹, Д. М. Ложкин¹

¹Сахалинский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («СахНИРО»), Южно-Сахалинск, Россия

²Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

Особенности пространственно-временной изменчивости температуры поверхности Берингова моря изучены путем построения средних многолетних распределений для различных месяцев года и с применением метода естественных ортогональных функций по данным реанализа ERA5, основанных преимущественно на спутниковой информации, за период 1998–2020 гг. (пространственное разрешение данных — четверть градуса, временной интервал — один месяц). Также в каждой пространственной ячейке для каждого месяца были рассчитаны амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник, отражающие сезонные изменения термических условий на изучаемой акватории. Определены коэффициенты линейного тренда, которые показали устойчивую тенденцию к потеплению поверхностного слоя вод моря, наиболее выраженную летом. Рассмотрены экстремальные отклонения от средних многолетних значений (аномалии) температуры поверхности Берингова моря.

Ключевые слова: температура поверхности моря, реанализ, термический режим, линейный тренд, гармонический анализ, метод естественных ортогональных функций, Берингово море

DOI: 10.31857/S0205961424010059, **EDN:** GMSLES

ВВЕДЕНИЕ

Западная часть Берингова моря является важным районом для российского рыболовства. В частности, у российского побережья добывается значительный объем тихоокеанских лососей, сельди, мойвы и других видов рыб. Это определяет интерес к изучению особенностей термического режима в данном бассейне, к происходящим в нем процессам на фоне глобального потепления и их влиянию на основные объекты рыбного промысла (Кровнин и др., 2021) и экосистему арктической части Тихого океана (Baker et al., 2020). Ряд работ указывает на наличие тенденции к повышению температуры поверхностного слоя воды Берингова моря (Overland, 2004; Хен и др., 2008, 2022; Ростов и др., 2018). В (Хен и др., 2022) было выбрано три крупных квадрата в западной, северной и восточной частях его акватории, в которых были построены усредненные по пространству и по сезонам графики хода температуры поверхности моря (ТПМ). Было установлено, что тенденция к потеплению характерна для разных частей рассматриваемого бассейна во все сезоны года.

В то же время многие важные вопросы, касающиеся особенностей сезонных и межгодовых вариаций ТПМ на различных участках моря, значительно отличающихся по своим физико-географическим характеристикам (наиболее существенными являются различия батиметрических условий в более глубоководной юго-западной и мелководной северо-восточной его частях), до настоящего времени недостаточно изучены. В последние годы появились информационные ресурсы, позволяющие провести всесторонний пространственно-временной статистический анализ широкого набора гидрометеорологических параметров, в том числе температуры поверхности моря. Одним из них является сайт свободного доступа <https://cds.climate.copernicus.eu>, на котором представлены данные реанализа ERA5. Такая работа была выполнена для северо-западной части Тихого океана (до меридиана 180° в.д.) и дальневосточных морей, включая западную часть Берингова моря (Цхай и др., 2022).

Основной целью данной работы было выявление основных особенностей пространственно-временной изменчивости термических условий в поверхностном слое всей акватории Берингова моря

на основе системного статистического анализа данных реанализа за 1998–2020 гг. и сравнение полученных результатов с основанными на судовых измерениях (Гидрометеорология..., 1999; Лучин, 2019). Особое внимание уделялось вариациям, которые можно было бы оценить как реакцию данного бассейна на глобальное потепление. Имеющиеся материалы позволяли вычислить линейные тренды в каждой пространственной ячейке изучаемой области и определить участки акватории, где однонаправленные изменения проявляются в наибольшей степени. Наличие массива данных во всей области с постоянной дискретностью позволило применить метод естественных ортогональных функций (ЕОФ), предназначенный для изучения особенностей сезонных и межгодовых вариаций гидрометеорологических параметров (Багров, 1959).

При анализе термических условий в различных бассейнах существенное внимание традиционно уделяется ситуациям, когда температура воды была существенно выше или ниже средних многолетних значений (норм). В таких случаях нормальное функционирование экосистемы водоема нарушается, что может негативно сказаться на состоянии популяций морских организмов, в том числе имеющих промысловое значение. В данной работе рассмотрены наиболее значительные нарушения термического режима, когда аномалии имели не только большую величину, но и наблюдались на существенной части акватории Берингова моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование базировалось на данных реанализа ERA5 по температуре поверхности Берингова моря за 1998–2020 гг., взятых с сайта <https://cds.climate.copernicus.eu>. Эти материалы основаны на широком спектре наблюдений за температурой воды в поверхностном слое океана, включая контактные судовые измерения, всплывающие буи ARGOS, дрейфтеры и т.д. Однако главной основой данных ТПМ являлись спутниковые наблюдения за морской поверхностью, важным преимуществом которых являлся полный охват акватории Мирового океана, а также информация о состоянии атмосферы, используемая при моделировании процессов в системе океан–атмосфера. Пространственное разрешение данных составляло четверть градуса, временное – один месяц. Область исследования была ограничена координатами 51.5°–66° с.ш. и 161° в.д. – 157° з.д. и полностью включала акваторию изучаемого бассейна, а также два участка северо-западной и северо-восточной части Тихого океана, примыкающих к Алеутской островной гряде (рис. 1).

Анализ выбранного материала проведен по следующей схеме. В каждой пространственной ячейке для каждого месяца и посезонно рассчитаны средние многолетние значения ТПМ и определены параметры линейного тренда методом наименьших квадратов (МНК). Средние многолетние распределения в различные месяцы или сезоны



Рис. 1. Карта района исследований (<https://earth.google.com/>).

года характеризовали изменения термических условий в течение года. Помимо этого, проанализирована динамика среднемесячных величин ТПМ по всей акватории. Для определения количественных характеристик сезонных вариаций температуры с помощью МНК вычислены амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник. Последовательность временных слоев ТПМ изучена с использованием метода разложения по ЕОФ (Багров, 1959). Межгодовая изменчивость температуры поверхности моря и других параметров выражена, главным образом, в модуляции годовой гармоник (отражающей изменчивость летних максимумов и зимних минимумов). Во временных функциях главных мод разложения ТПМ также выявлены подобные колебания, поэтому для них выполнен аналогичный анализ с расчетом гармоник.

Для идентификации значительных отклонений термических условий от обычных применялась методика, разработанная в (Цхай, Шевченко, 2013). В каждой пространственной ячейке изучаемой области для каждого месяца были рассчитаны не только средние многолетние значения (нормы), но и среднеквадратические отклонения. Выбирались случаи, когда аномалия превышала удвоенную величину среднеквадратического отклонения, что указывало на экстремальные термические условия, и подсчитывалась число таких ячеек. В анализируемую выборку отбирались те моменты времени (месяц и год), когда такие условия наблюдались не менее чем на 5% площади Берингова моря.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАЦИЙ ТПМ

На рис. 2 приведены средние многолетние распределения температуры поверхности моря для различных сезонов года – зимы (февраль), весны (май), лета (август) и осени (ноябрь).

Подробное описание пространственных распределений температуры воды, построенных помесячно на основе судовых измерений, было приведено в работе (Гидрометеорология, 1999), что позволяет сравнить их с результатами, полученными по данным реанализа. В этой работе отмечалось две важные особенности гидрологического режима Берингова моря, проявляющихся в сезонных вариациях температуры поверхностного слоя воды. Первая из них связана с тем, что на его акватории выделяются два периода, различающихся крупномасштабными особенностями распределения ТПМ. На протяжении большей части года, в холодный период и весной (с ноября по июнь) главным отопляющим фактором является поступление более теплой океанской воды через проливы Алеутской островной гряды, поэтому наиболее высокие значения тем-

пературы отмечены в южной части моря. Летом же (июль–сентябрь) наиболее важным является прогрев мелководных районов на северо-востоке и на западе, в Карагинском и Анадырском заливах, а вдоль островной гряды температура существенно ниже, чем на остальной части бассейна. Поле температуры в октябре является переходным.

Вторая особенность связана с формированием выраженного термического фронта между мелководной северо-восточной и более глубоководной юго-западной частями изучаемого бассейна, существующего с января по июнь. К аналогичным выводам пришел и В.А. Лучин (Лучин, 2019) при анализе сезонной динамики термического состояния верхнего квазиоднородного слоя в Беринговом море.

Обратимся теперь к пространственным распределениям ТПМ по данным реанализа. Зимой эти распределения в Беринговом море (они идентичны представленному на рис. 2 в период с января по апрель) характеризуется понижением значений от Алеутской островной дуги в направлении берега Азии, что, очевидно, отражает влияние залива более теплой океанской воды через проливы. На акватории моря значения ТПМ плавно уменьшается от 3.5° до 0°C вблизи Карагинского залива и участка побережья между мысами Наварин и Олюторский. Здесь выделяется узкая полоса с отрицательными значениями температуры, формируется припай. Более обширная зона с водой с отрицательными значениями (от -1.3° до -1.7°C) выделяется в северной части моря. Здесь также обычно наблюдаются обширные ледяные поля, но в данных реанализа в замерзающих районах чаще всего указывается температура замерзания морской воды. Четко выделяется термический фронт над свалом глубин. В прилегающей к островам северо-западной части Тихого океана (СЗТО) температура колеблется в достаточно узких пределах – от 3.7° до 4.1°C, и уменьшается до 1.5°C в районе Командорских островов. В целом, пространственные распределения ТПМ по спутниковым и судовым данным идентичны, за исключением некоторых несущественных деталей.

Весной структура пространственного распределения ТПМ сходна с наблюдавшейся в зимний период, но происходит несколько существенных изменений, помимо того, что значения температуры воды повсеместно возрастают. Главное отличие (не отмеченное по судовым наблюдениям) заключается в том, что в мае начинает разрушаться гидрологический фронт, разделявший мелководную и глубоководную части акватории. Этот процесс имеет место у берега Северной Америки, где ТПМ возрастет до 0.5°C, в значительной мере он определяется действием летнего муссона с характерными для него ветрами южного и юго-западного румбов. Нулевая изотерма смещается на запад, в централь-

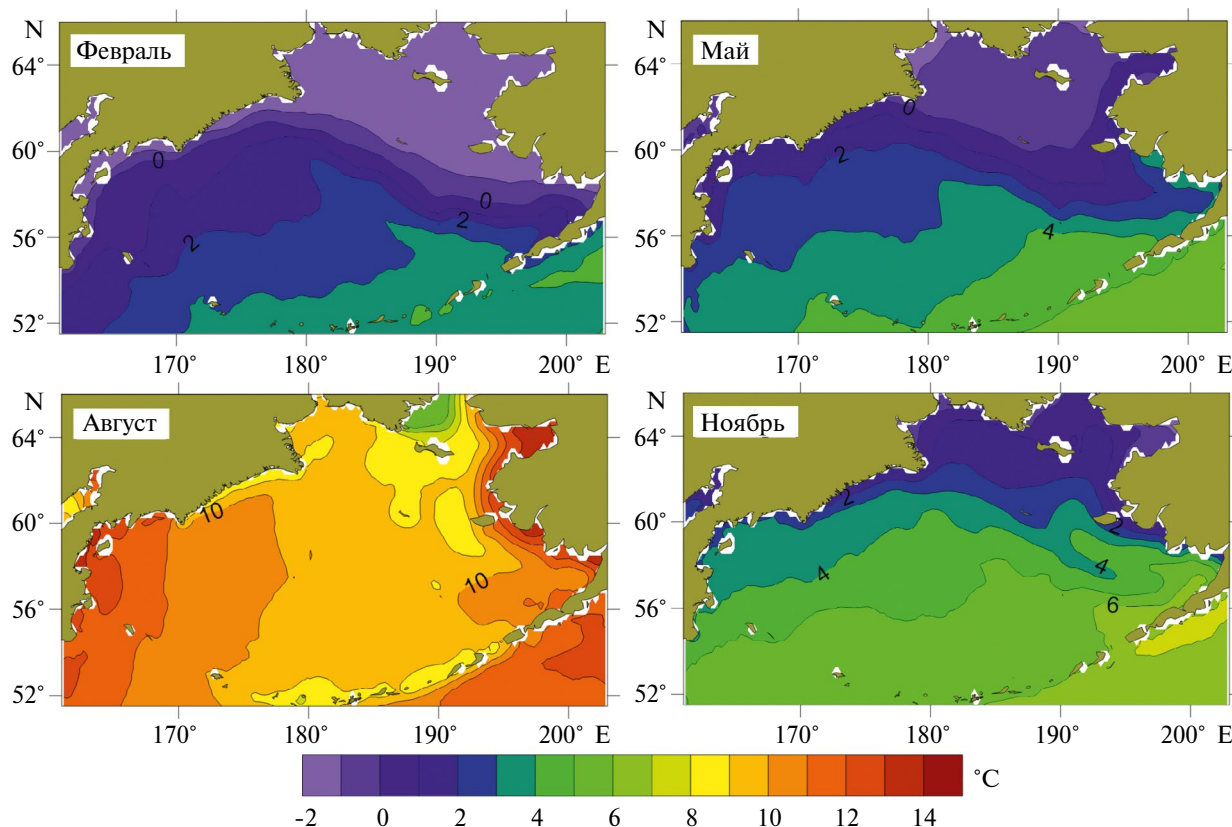


Рис. 2. Пространственное распределение ТПМ (°C) на акватории Берингова моря зимой (февраль), весной (май), летом (август) и осенью (ноябрь).

ной части мелководного района температура ниже нуля и колеблется от -0.5°C до -1°C , а наиболее низкие значения выявлены в Анадырском заливе (до -1.4°C). В прилегающей части СЗТО температура воды колеблется от 5°C до 5.7°C на восточной границе области, вблизи Алеутских островов уменьшается до 4.5°C и далее плавно снижается до 0.8°C вблизи берега Камчатки.

Июнь, так же, как и октябрь, можно охарактеризовать как переходный период от одного типа распределения ТПМ к другому. В районе Алеутской дуги температура воды мало отличается от прилегающих акваторий, только в восточной ее части еще ощущается обогревающее влияние тихоокеанской воды. Гидрологический фронт выражен слабо, на акватории Берингова моря отмечены значительные различия ТПМ. Так, у побережья Америки формируется полоса сравнительно теплой воды (в заливе Нортон-Саунд до 6.5°C), в то время как в прибрежных районах Анадырского залива и вблизи берега Чукотки вода более холодная (2°C – 2.5°C). Существенные различия в значениях ТПМ в прибрежных акваториях в восточной и западной частях моря обусловлены как разными глубинами, так и влиянием летнего муссона.

В период максимального прогрева поверхностного слоя в изучаемом бассейне в августе характер пространственного распределения иной, чем зимой и весной. Наиболее теплая вода (12°C – 13°C) отмечена на западе и на востоке рассматриваемой области, самые высокие значения (около 13.5°C) – в юго-западной части Карагинского залива и в заливе Нортон-Саунд на Аляске. Самая холодная вода с температурой 5°C – 7°C обнаружена на северном участке акватории моря, у восточного берега Чукотки от Анадырского пролива (между полуостровом и островом Святого Лаврентия) до Берингова пролива. Образование этой зоны холодной воды связано с проявлением апвеллинга, природа которого довольно сложна и была выявлена сравнительно недавно (подъем воды возникает из-за формирующегося под действием донного трения в проливе и полусуточных приливов придонного потока, ориентированного на запад (Kawaguchi et al., 2020)). При этом в восточной западной части Берингова пролива наблюдается движение холодной воды с низкой солесностью в Северный ледовитый океан. Вообще говоря, в летний период наиболее важным фактором считается транспорт более теплой и соленой, богатой биогенными элементами берингоморской воды в восточной его части в Чукотское

море и море Бофорта, чему посвящено существенно больше работ (Woodgate et al., 2005; 2010; Danielsen et al., 2014).

Только в сентябре-октябре, после перестройки поля ветра от летнего муссона с характерными для теплого периода года южными ветрами к зимнему с сильными и устойчивыми ветрами северо-западного румба в Беринговом проливе формируется поток на юг (Жук, Кубряков, 2021) с относительно небольшими скоростями. В этой работе также отмечено, что даже в летний период в западной части пролива, вдоль берега полуострова Чукотка может поступать более холодная вода из Чукотского моря, при способствующих этому метеорологических условиях (в работе (Захарчук, Тихонова, 2006) отмечалась значительная изменчивость течений в проливе в синоптическом диапазоне частот по данным инструментальных измерений). Однако такие эпизодические затопы вряд ли отражаются на осредненных распределениях ТПМ у восточного берега Чукотки в теплый период года.

Сравнительно холодная вода (8° – 9° С) отмечена также вдоль Алеутской островной дуги, что согласуется с результатами работы (Гидрометеорология..., 1999), в которой причина ее формирования связывалась с приливным перемешиванием вблизи проливов, а также более позднего исследования динамики верхнего квазиоднородного слоя (Лучин, 2019).

Образование области с низкими значениями температуры у восточного побережья Чукотки и в Анадырском заливе в осенний период в большей мере может быть связано с проявлением ветрового апвеллинга, обусловленного действием зимнего муссона. Ветра северо-западного румба являются причиной масштабного потока тепла из океана в атмосферу вдоль всего восточного побережья Азии (Шевченко, Ложкин, 2023). Сезонный апвеллинг четко проявляется на распределениях ТПМ вдоль западного побережья Берингова моря от Беринго-

ва пролива до м. Олюторский в сентябре и октябре, и уже несколько в меньшей степени в ноябре, из-за общего выхолаживания поверхностного слоя воды в северной части изучаемого бассейна. Отметим, что в летнее время в западной части Берингова моря между мысами Наварин и Олюторский также наблюдается апвеллинг, однако он проявляется эпизодически при определенных синоптических условиях (Жабин и др., 2022), поэтому вряд ли может так значительно проявляться на осредненных за многолетний период распределениях ТПМ.

В масштабах всего моря в ноябре пространственное распределение температуры вновь принимает характер, выявленный выше для зимы и весны. Вблизи Алеутских островов температура воды более 6° С (на восточном фланге гряды – около 7° С), в прибрежной полосе вблизи побережья Азии колеблется от 1° до 2.5° С, в западной части Анадырского залива уже принимает отрицательные значения – около -0.4° С, как и в заливе Нортон-Саунд на Аляске.

В целом по данным реанализа подтверждается сделанный в работах (Гидрометеорология, 1999; Лучин, 2019) вывод, что такой тип пространственного распределения ТПМ обусловлен влиянием адвекции более теплой воды из СЗТО и характерен для Берингова моря в период с ноября по май, когда роль солнечной радиации не является определяющей. В июле–сентябре характер пространственного распределения ТПМ иной, а в июне и октябре происходит перестройка от одного типа к другому. В ноябре температура поверхности моря выше, чем в мае.

На рис. 3 представлен ход ТПМ, усредненных для каждого месяца по всей площади Берингова моря. В колебаниях явно доминирует годовая гармоника со средней амплитудой 4.5° С и фазой 221° , это отвечает максимальным значениям в августе и минимальным в феврале (табл. 1), хотя чаще наблюдается минимум в марте, а иногда и в апреле. Вклад полугодовой составляющей существенно меньше, ее амплитуда составляет 1.2° С, а фаза равна 63° , что означает наличие максимумов этой составляющей в феврале и августе.

Амплитуда годовой гармоники максимальна на западном и восточном участках акватории, где летом наблюдается максимальный прогрев (рис. 4). Минимальные значения отмечены вблизи Берингова пролива и в районе Алеутских островов. Колебания амплитуды в разные годы сравнительно невелики, минимальное значение (3.8° С) отмечено в 2001 г., а максимальное (5° С) – в 2014 г. Это неожиданный результат, так как изменчивость летних максимумов существенна, она превышает 3° С (в их вариациях просматривается цикличность с периодом около 12 лет, на которую накладываются

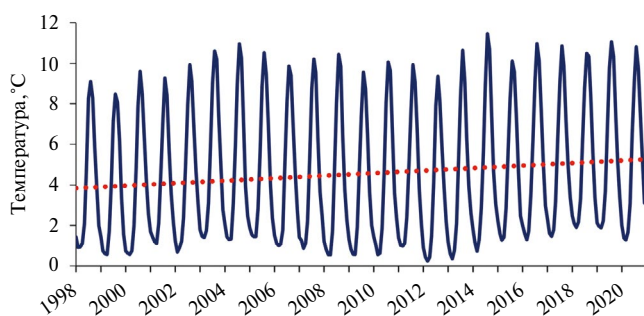


Рис. 3. График усредненных по акватории Берингова моря значений ТПМ за 1998–2021 гг. Красными точками показана линия тренда, рассчитанного методом наименьших квадратов.

Таблица 1. Средние многолетние значения ТПМ, среднеквадратическое отклонение σ и экстремальные значения ТПМ по месяцам ($^{\circ}\text{C}$)

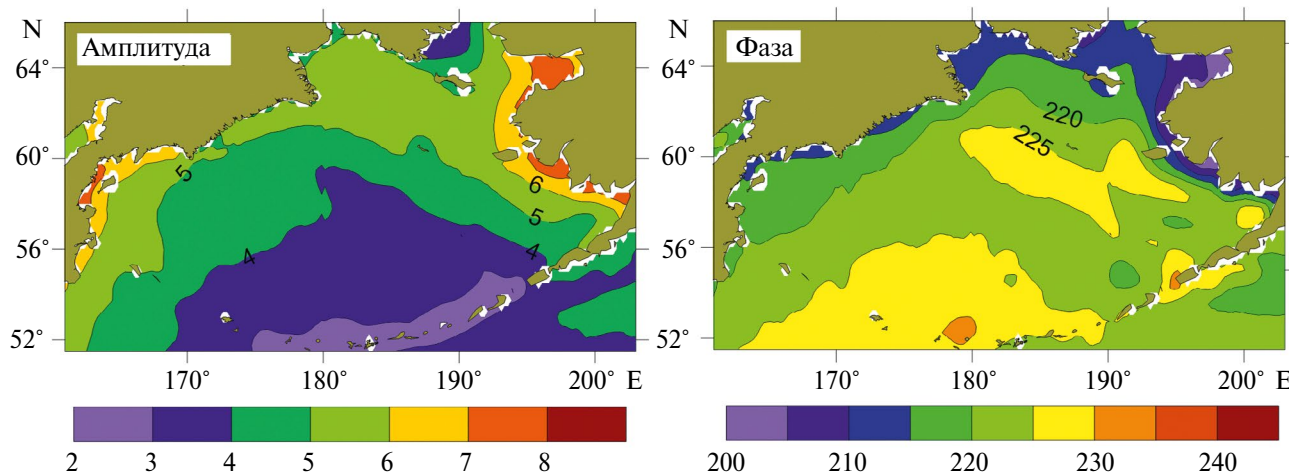
Месяц	Среднее	σ	Минимум	Максимум
Январь	1.6	0.4	0.7	2.5
Февраль	1.2	0.4	0.4	2.1
Март	1.0	0.4	0.2	1.9
Апрель	1.2	0.5	0.4	2.2
Май	2.5	0.6	1.5	3.7
Июнь	5.3	0.8	4.1	6.9
Июль	8.4	0.7	7.1	9.7
Август	10.2	0.7	8.5	11.5
Сентябрь	9.4	0.8	8.1	10.7
Октябрь	6.8	0.6	5.7	8.4
Ноябрь	4.3	0.6	3.4	5.6
Декабрь	2.6	0.5	1.6	3.4

более слабые вариации с периодом около трех лет). Проявляются эти составляющие главным образом в восточной части Берингова моря. Наиболее теплые условия в летний период в масштабах моря наблюдались в 2004 и 2014 гг., самым холодным было лето 1999 г. Вариации амплитуды полугодовой гармоника незначительны.

Вариации зимних минимумов также достаточно велики, они изменялись, в целом, аналогично (в них также заметна роль 12-летнего цикла) — то есть, когда лето более теплое, то и зима тоже. Минимальные значения зимой во всех случаях были положительными, наиболее суровые зимние условия отмечены в марте 2012 и 2013 гг. (0.2° и 0.3°C), самые мягкие зимы наблюдались в 2003–2005 гг. (около 1.4°C) и особенно в 2018–2019 гг. (около 1.9°C).

В графике хода средних для всего моря значений ТПМ явно прослеживается положительный линейный тренд с коэффициентом $0.0052^{\circ}\text{C}/\text{мес.}$, или примерно 0.6°C за 10 лет, что является высоким показателем. Глобальное потепление явно выражено в повышении температуры поверхностного слоя воды в Беринговом море, что согласуется с результатами предыдущих исследований (Overland, 2004; Хен и др., 2008, 2022; Ростов и др., 2018). Для выяснения характера этого влияния в различных районах моря в разные сезоны года коэффициенты линейного тренда были рассчитаны МНК в каждой пространственной ячейке для каждого месяца отдельно и посезонно (рис. 5).

Зимой на большей части Берингова моря коэффициенты линейного тренда положительные, но

**Рис. 4.** Пространственное распределение амплитуды ($^{\circ}\text{C}$) и фазы ($^{\circ}$) годовой гармоника ТПМ на акватории Берингова моря.

сравнительно невелики — от 0.05° до $0.2^{\circ}\text{C}/10$ лет в северной части бассейна и от 0.2° до $0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет в южной. На этом фоне резко выделяется область к югу от м. Наварин, где рост ТПМ значителен — до $1.2^{\circ}\text{C}/10$ лет. Область с высокими скоростями роста вытянута от этого района в направлении п-ова Аляска. Также отметим две небольших области с коэффициентами выше 0.5 у Командорских островов и в районе Карагинского залива.

Весной тенденция к потеплению поверхностного слоя воды в Беринговом море выражена более явно. Область с высокими значениями коэффициента линейного тренда вблизи побережья Азии существенно расширилась в направлении открытого моря. Зона со значениями скорости роста выше $1^{\circ}\text{C}/10$ лет протянулась от м. Наварин на юг до м. Олюторский. Также расширилась область на юго-востоке изучаемого района — от п-ова Аляска до острова Нунивак. Появляется и новая зона с тенденцией к потеплению, охватывающая крупный залив Нортон-Саунд и прилегающие к нему акватории, причем в кутовой части залива значения коэффициента линейного тренда достигают $2.5^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Летом влияние глобального потепления достигает в Беринговом море своего максимума. Примерно на 75% его акватории значения коэффициента линейного тренда выше $0.5^{\circ}\text{C}/10$ лет, а в западной части Анадырского залива и в вершине залива Нортон-Саунд достигают максимальных $3^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Осенью картина пространственного распределения коэффициента линейного тренда не отличается существенно от наблюдавшейся летом, но его значения повсеместно уменьшаются.

РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛЯ ТПМ ПО ЕОФ

Особенности сезонной и межгодовой изменчивости поля ТПМ были исследованы также методом разложения последовательности временных слоев по ЕОФ. На рис. 6 представлены временные функции и соответствующие им пространственные распределения двух основных мод (на первую моду приходится 92.6% дисперсии изучаемого параметра, на вторую — 5.3%, вклад более высоких мод незначителен).

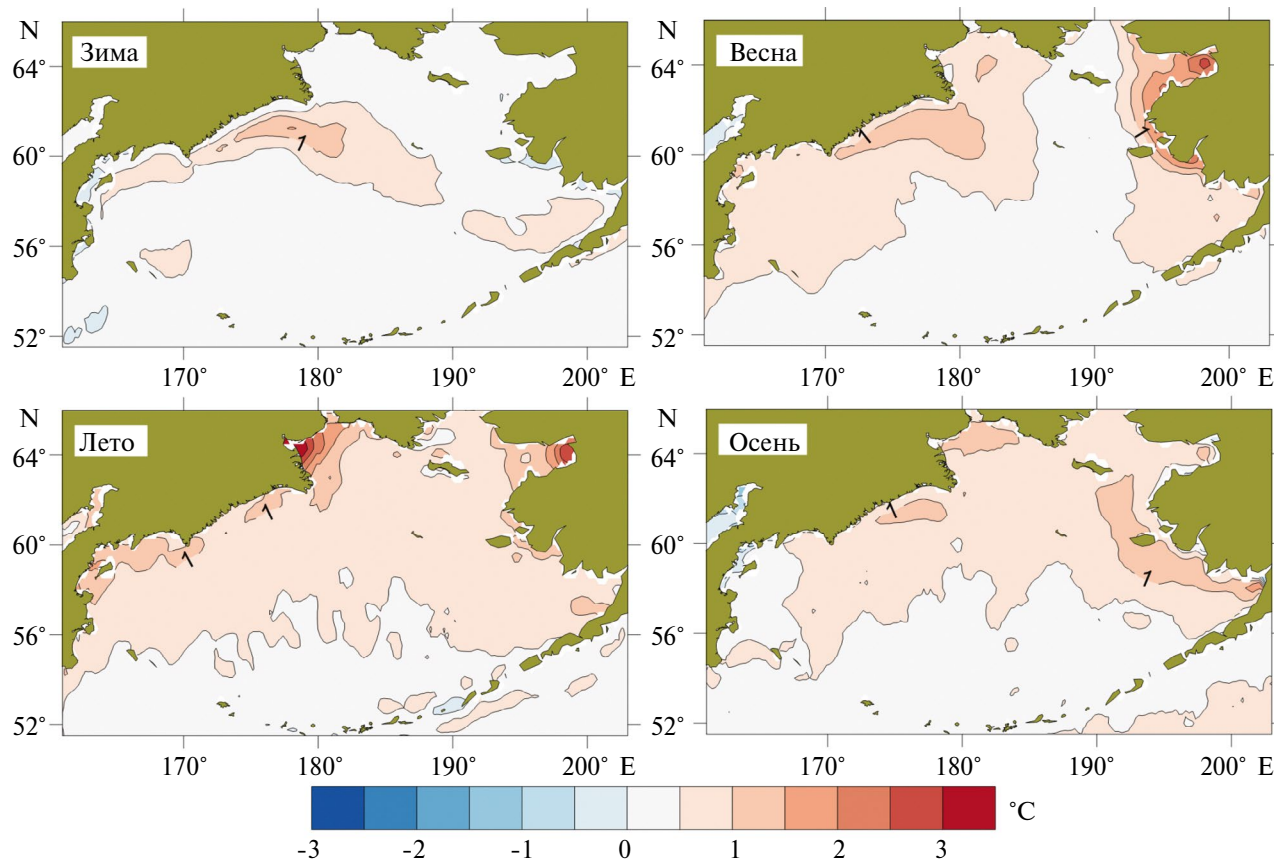


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициента линейного тренда ТПМ (в $^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) на акватории Берингова моря зимой, весной, летом и осенью.

Максимальные значения пространственной функции первой моды (7–8) выявлены в СЗТО в районе, примыкающем к полуострову Аляска и островам восточного фланга Алеутской островной дуги. В акватории вблизи этих участков суши, но со стороны Берингова моря, значения моды немного ниже – от 6.0 до 6.3. Такие же величины отмечены на юго-востоке изучаемого района, как со стороны моря, так и в океане. Наиболее низкие значения пространственной функции выявлены на северном участке моря, вблизи Берингова пролива, а также в западной части Анадырского залива (от 2 до 3). На основной части Берингова моря эта функция меняется незначительно – в пределах от 5 до 6.

Вариации временной функции первой моды идентичны ходу усредненных значений ТПМ (коэффициент корреляции $r = 0.999$) и хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 0.8° и 0.2°C соответственно. Все ее значения положительные, значимые величины более 1°C наблюдаются с июля по октябрь, максимальные значения в августе и сентябре (1.78° и 1.66°C), минимальные – в феврале–апреле (около 0.25°C).

Временной ход одинаков во всех пространственных ячейках изучаемой области, различия в интенсивности прогрева характеризуются пространственной функцией. Характер временной функции показывает, что первая мода отражает главным образом особенности ТПМ летом и при переходе к осени. К ним относятся прежде всего отсутствие гидрологического фронта, высокие значения температуры в центральной, юго-восточной и юго-западной частях моря, а также относительно низкие значения параметра в центральной части Алеутской гряды. Небольшие значения пространственной функции в северо-западной части бассейна, у побережья Чукотки и в Анадырском заливе отражают поступление холодной воды из Северного Ледовитого океана и осенний ветровой апвеллинг.

Вторая мода является поправкой к основной, описывающей несинфазные процессы в вариациях термических условий. Ее пространственная функция имеет узловую линию, которая разделяет море на две примерно равные части. Одну из них можно условно назвать прибрежной, она охватывает сравнительно мелководные районы в северной

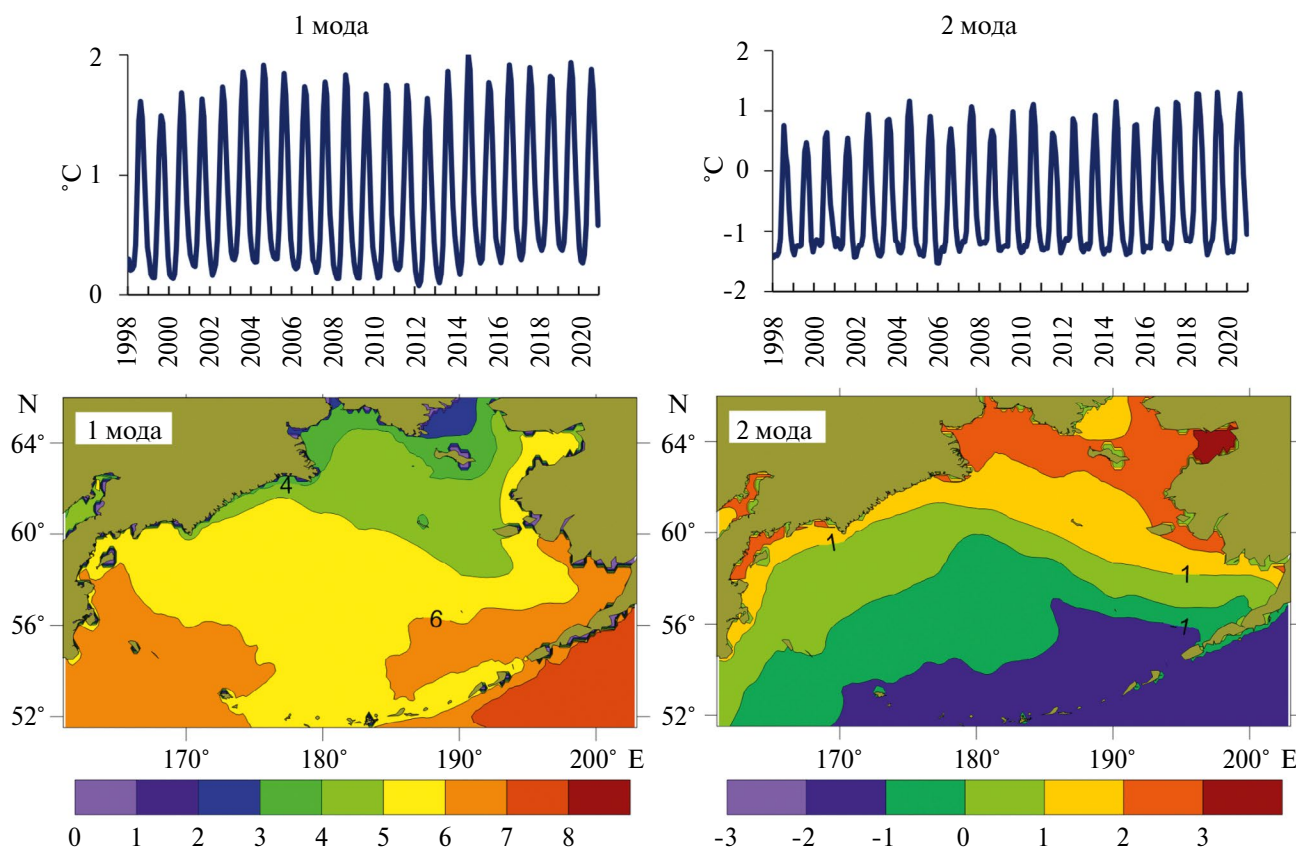


Рис. 6. Графики временных функций ($^\circ\text{C}$) и пространственное распределение (безразмерная величина) первых двух мод разложения ТПМ по ЕОФ.

Таблица 2. Информация о наиболее значительных аномалиях ТПО в Беринговом море

Дата	Доля площади, %	Знак аномалии
Август 1999 г.	29.25	Отрицательные
Январь 2000 г.	23.89	Отрицательные
Июль 2001 г.	22.59	Отрицательные
Февраль 2018 г.	30.39	Положительные
Октябрь 2018 г.	39.94	Положительные

части Берингова моря. Максимальные положительные значения отмечены у побережья штата Аляска, в частности в заливе Нортон-Саунд (до 3), в Анадырском лимане и в западной части Карагинского залива. Область с отрицательными значениями охватывает центральную часть моря и акваторию, прилегающую к Алеутским островам. Именно вблизи них отмечены наибольшие по величине отрицательные значения моды — до -1.8 . Из этого следует, что вторая мода ответственна за процесс формирования гидрологического фронта над свалом глубин, о котором говорилось выше. Он не нашел своего отражения в основной моде, что несколько необычно учитывая его роль в термических условиях Берингова моря.

Временная функция второй моды также меняет знак. Она имеет положительные значения только в июле—сентябре (максимум в августе составил 0,88). Отрицательные значения отмечены с октября по июнь, минимум — в январе ($-1,31$), но близкие значения с декабря по апрель. Это означает, что вторая мода обеспечивает летом положительную поправку в прибрежных районах моря и отрицательную вблизи Алеутских островов. В другие месяцы ее вклад имеет противоположный характер. Из этого также следует вывод о важном вкладе второй моды в формирование в летний период высоких значений ТПМ у побережья США и в заливах у российского побережья. Зимой в этих районах вклад моды отрицательный, что согласуется с более значительным выхолаживанием поверхностного слоя в прибрежных акваториях.

ЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ АНОМАЛИИ ТПМ В БЕРИНГОВОМ МОРЕ

Особый интерес представляют экстремальные аномалии температуры поверхностного слоя воды в изучаемом бассейне. Для их идентификации использовалась описанная выше методика, предложенная в (Цхай, Шевченко, 2013). Было выявлено восемь ситуаций, когда аномалия, превышавшая 2σ , была отмечена более чем на 10% площади Берингова моря (по четыре положительных и отри-

цательных), в пяти из них она превышала 20% его акватории, они представлены в табл. 2.

Некоторые специалисты рассматривают подобные условия как термические катастрофы (Ustinova, 2021), имеющие тяжелые последствия для состояния популяций пелагических рыб. Рассмотрим более подробно некоторые из таких ситуаций, которые были выявлены в августе 1999 г., январе 2000 г., феврале и октябре 2018 г. (рис. 7).

В августе 1998 г. на всей акватории Берингова моря наблюдались отрицательные аномалии ТПМ, наиболее существенные (от -2.2° до -2.8°C) в северо-восточной части моря, в широкой полосе, протянувшейся от п-ова Чукотка до побережья Аляски. Близкие значения отмечены в акватории, прилегающей к северо-восточному побережью Камчатки, на остальной части моря отклонения от средних многолетних значений чуть меньше — от $-1,2^{\circ}$ до -1.9°C . Площадь акватории, на которой аномалия превысила 2σ , составила больше 29% от площади всего бассейна.

Еще один пример значимых отрицательных аномалий имел место в январе 2000 г. Значения ниже нормы также наблюдались практически на всей акватории Берингова моря. Вблизи берегов п-ова Аляска и на восточном фланге Алеутской островной гряды отрицательные аномалии колебались от -3° до -3.5°C , что является исключительно большой величиной, в особенности для холодного периода, когда вариации температуры незначительны (больше 3σ). В широкой полосе, протянувшейся до м. Наварин, отклонение от нормы превышало 1.5°C , что также является существенной величиной. Это указывает на экстраординарность термических условий в северо-восточной части моря, в области, вытянутой вдоль свала глубин, в которой обычно проявляется влияние залива теплой воды из Тихого океана. Это позволяет предположить, что в данном случае этот заток был ослаблен.

Случай положительных аномалий в холодный период года имел место в феврале 2018 г. На всей акватории моря они превышали 0.4°C , вблизи побережья России — 1.2°C , а в полосе от м. Нава-

рин в направлении восточного сектора Алеутских островов – 3°C . Последнее значение также очень велико для зимних условий, в этой полосе аномалия превышала 3σ (на площади около 8% от всей изучаемой акватории). Неслучайно зимние условия этого года характеризовались низкими значениями ледовитости – ледяной покров сформировался на существенно меньшей площади, чем обычно (Басюк, Зуенко, 2019).

Наиболее существенные аномалии (пороговое значение 2σ было превышено на 40% его площади) были выявлены в октябре 2018 г. Положительные отклонения от средних многолетних значений наблюдались в северо-восточной части бассейна, достигали величины 5°C в заливе Нортон-Саунд, в районе о. Святого Лаврентия и плавно уменьшались вблизи Командорских островов. На основной части моря преобладал повышенный фон температур, вдоль всей Алеутской островной дуги ТПМ не превышала норму. Это согласуется с результатами работы (Басюк, Зуенко, 2019), в которой термические условия в Беринговом море в 2018 г. характеризовались как аномально теплые.

Приведенные примеры показывают, что значительные аномалии ТПМ время от времени фор-

мируются на акватории Берингова моря и могут занимать значительные площади, сопоставимые с площадью всего изучаемого бассейна. Количество положительных и отрицательных аномалий примерно одинаково, они формируются в различные сезоны года. Резкие отклонения термических условий от обычных могут представлять существенную угрозу для условий обитания пелагических рыб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ средних многолетних распределений показал, что с ноября по июнь изменения ТПМ в Беринговом море носят преимущественно зональный характер. Температура воды в поверхностном слое снижается от островов Алеутской гряды в северном направлении и достигает наименьших значений в Анадырском заливе и в акватории, прилегающей к Берингову проливу. В теплый период характер изменений термических условий иной – наиболее теплая вода обнаруживается на западе (у побережья Камчатки, в частности в Карагинском заливе) и востоке (у берегов Аляски, прежде всего в заливе Нортон-Саунд) изучаемой акватории. В центральной части моря, на севере вблизи Берингова пролива

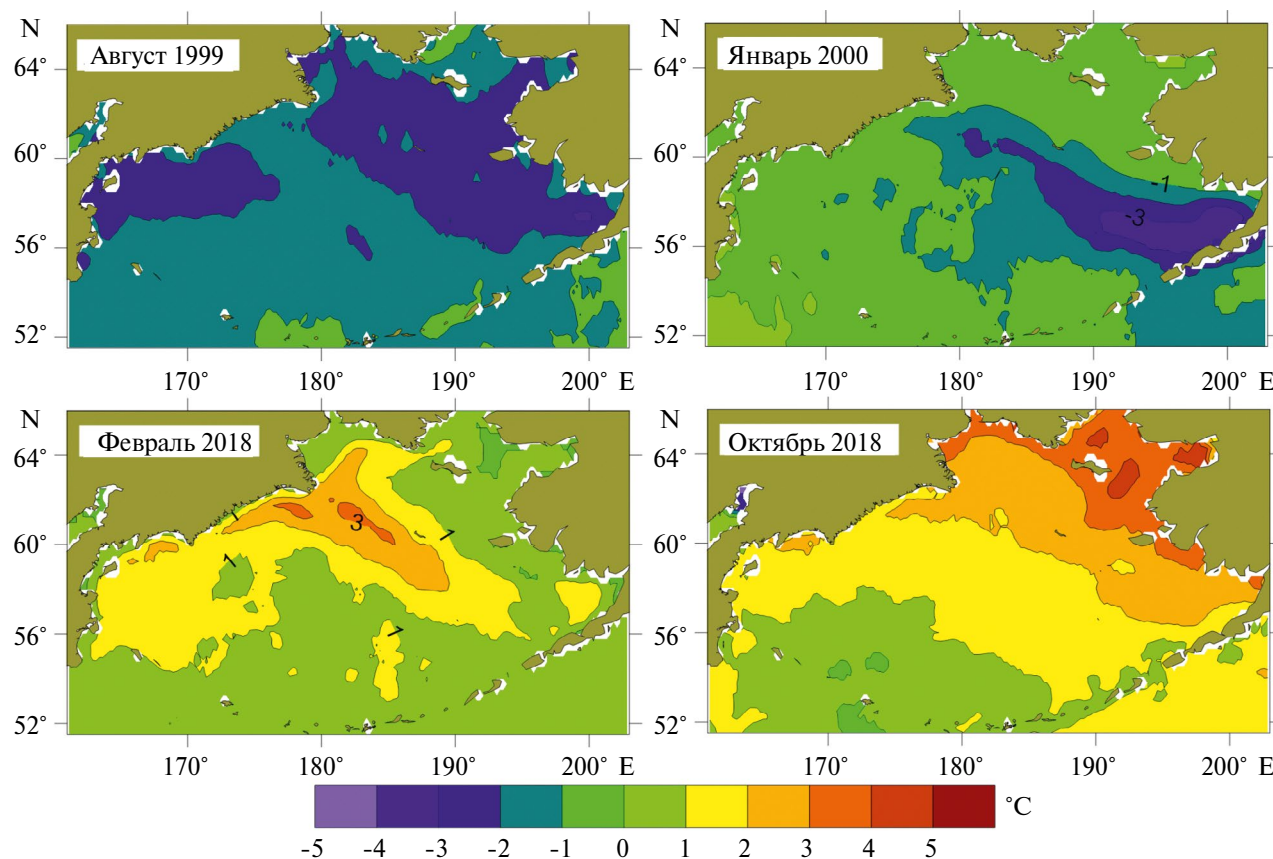


Рис. 7. Пространственное распределение аномалий ТПМ в Беринговом море.

и на южном участке в центральной части Алеутской гряды выявлены более холодные воды.

Пространственное распределение первой моды разложения поля ТПМ по ЕОФ в целом сходно со средним многолетним в теплый период года (отсутствие гидрологического фронта, низкие значения в центральной части Алеутской островной гряды), но имеет также существенные отличия. Наиболее существенные из них следующие: во-первых, низкие значения пространственной функции у северо-западного побережья, от Берингова пролива до м. Олютоский, связаны с проявлением сезонного апвеллинга в начале осени, а во-вторых, первая мода не отражает прогрев прибрежных акваторий ни в восточной, ни в западной частях моря, то есть не полностью характеризует летнее распределение ТПМ.

Вторая мода также содержательна, ее пространственная функция положительна в мелководных районах Берингова моря и отрицательна в глубоководной части, прилегающей к Алеутским островам, что отражает различие в термическом режиме этих акваторий. Следовательно, она отражает формирование гидрологического фронта вдоль свала глубин, существующего в Беринговом море на протяжении большей части года. Также вторая мода ответственна за высокую степень прогрева прибрежных акваторий (заливы Нортон Саунд, Карагинский, Анадырский) летом и выхолаживания зимой.

Годовой ход ТПМ, усредненных для каждого месяца по всей площади Берингова моря, характеризуется максимумом в августе (около 10°C) и минимумом в марте (1°C). В его колебаниях явно доминирует годовая гармоника со средней амплитудой 4.5°C и фазой 221°, вклад полугодовой составляющей существенно меньше — ее амплитуда составляет 1.2°C, а фаза равна 63°.

Температура поверхности Берингова моря имеет выраженную тенденцию к повышению, что можно рассматривать как результат влияния глобального потепления, в то время как в Охотском море и северной части Японского реакция на эти процессы иная и преобладает снижение ТПМ (Ложкин, Шевченко, 2019). Особенно она проявляется в летний период, когда примерно на 75% его акватории значения коэффициента линейного тренда выше 0,5°C/10 лет, а в западной части Анадырского залива и в вершине залива Нортон-Саунд достигают максимальных 3°C/10 лет. Слабее всего тенденция к повышению температуры поверхностного слоя воды выражена зимой.

Показано, что значительные аномалии ТПМ формируются на акватории Берингова моря, и могут занимать значительные площади, сопоставимые с площадью всего бассейна. Количество положительных и отрицательных аномалий примерно

одинаково, они формируются в различные сезоны года. Резкие отклонения термических условий от обычных могут представлять существенную угрозу для условий обитания пелагических рыб.

Полученные результаты могут использоваться для изучения влияния термических условий на состояние популяций пелагических рыб и совершенствования прогнозов сроков и условий нагульных и нерестовых миграций тихоокеанских лососей в Беринговом море.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензенту за внимательное отношение к нашей статье и ряд полезных замечаний, способствовавших повышению ее качества.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания ФГБНУ «ВНИРО» по теме «Изучение влияния изменчивости климато-океанологических условий на основные объекты российского рыболовства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды Центрального института прогнозов. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
- Басюк Е. О., Зуенко Ю. И. Берингово море 2018 — экстремально малоледовитый и теплый год // Изв. ТИНРО. 2019. Т. 198. С. 119–142. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142.
- Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Дубина В.А., Лучин В.А. Изменчивость летнего ветрового апвеллинга у Корякского побережья в северо-западной части Берингова моря по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 60–73.
- Жук В.Р., Кубряков А.А. Влияние Восточно-Сибирского течения на водообмен в Беринговом проливе по спутниковым данным // Океанология. 2021. Т. 61, № 6. С. 856–868.
- Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Об интенсивности течений разных временных масштабов в Чукотском море и Беринговом проливе // Метеорология и гидрология. 2006. № 1. С. 76–85.
- Кровнин А.С., Кивва К.В., Мурый Г.П., Сумкина А.А. Влияние климатических факторов на межгодовые колебания запасов камчатской горбуши в 2014–2020 гг. // Вопр. рыболовства. 2021. Т. 22. № 4. С. 35–45. DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-4-35-45.
- Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным 1998–2017 гг. // Исследование Земли из космоса. 2019. № 1. С. 55–61.
- Лучин В.А. Средние многолетние параметры верхнего квазигомогенного слоя Берингова моря (нижняя граница, температура, соленость) и их внутригодовая изменчивость // Известия ТИНРО. 2019. Т. 199. С. 214–230. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-199-214-230.

Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Воронцов А. А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных акваторий западной части Берингова моря за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 193. С. 167–182. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182.

Хен Г. В., Басюк Е. О., Сорокин Ю. Д., Устинова Е. И., Фигуркин А. Л. Термические условия на поверхности Берингова и Охотского морей в начале 21-го века на фоне полувековой изменчивости // Изв. ТИНРО. 2008. Т. 153. С. 254–263.

Хен Г. В., Устинова Е. И., Сорокин Ю. Д. Многолетние изменения термических условий на поверхности дальневосточных морей и СЗТО и их связь с крупномасштабными климатическими процессами // Изв. ТИНРО. 2022. Т. 202. № 1. С. 187–207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207.

Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В. Оценка температурных аномалий поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 50–61. DOI: 10.7868/S0205961413020139.

Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В., Ложкин Д. М. Анализ термических условий в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 1. С. 30–37. DOI: 10.31857/S0205961422010079. EDN HRSJAX.

Шевченко Г. В., Ложкин Д. М. Пространственно-временная изменчивость потока длинноволновой радиации на поверхности северо-западной части Тихого океана по данным реанализа ERA5 // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39. № 3. С. 359–370. EDN HJUFMZ. DOI: 10.29039/0233-7584-2023-3-359-370.

Baker M. R., Kivva K. K., Pisareva M. N., Watson J. T., Selivanova Ju. Shifts in the physical environment in the Pacific Arctic and implications for ecological timing and conditions // Deep-Sea Res. II. 2020. V. 177. 104802. DOI: 10.1016/j.dsr2.2020.104802.

Danielson S. L., Weingartner T. J., Hedstrom K. S., Aagaard K., Woodgate R. A., Curchitser E., Stabeno P. J. Coupled wind-forced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait through flow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic sea surface height gradient // Progress in Oceanography. 2014. V. 125. P. 40–61. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2014.04.006>.

Kawaguchi Y., Nishioka J., Nishino S., Fujio S., Lee K., Fujiwara A., Yanagimoto D., Mitsudera H. and Yasuda I. Cold water upwelling near the Anadyr Strait: Observations and simulations. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. V. 125. e2020JC016238. <https://doi.org/10.1029/2020JC016238>.

Overland J. E. Is the climate of Bering Sea warming and affecting the ecosystem? // EOS. 2004. V. 8. No. 33. P. 309–316.

Ustinova E. Extreme events in the thermal state of the Far-Eastern Seas and adjacent waters of the Northwestern Pacific // PIC-ES-2021 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract. Victoria, BC, Canada. 2021. P. 26.

Woodgate R. A., Aagaard K., Weingartner T. Monthly temperature, salinity, and transport variability of the Bering Strait through flow // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. Issue 4. <https://doi.org/10.1029/2004GL021880>.

Woodgate, R. A., T. Weingartner, and R. Lindsay (2010), The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat // Geophys. Res. Lett., 2010. V. 37. L01602. DOI: 10.1029/2009GL041621.

The Spatio-Temporal Variability of Sea Surface Temperature of Bering Sea from ERA5 Reanalysis Data Based on Satellite Information

G. V. Shevchenko^{1,2}, Zh. R. Tshay¹, D. M. Lozhkin¹

¹Sakhalin Branch of “VNIRO” (“SakhNIRO”), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Features of spatio-temporal variability of the Bering Sea surface temperature were studied by constructing long-term average distributions for different months and using the method of empirical orthogonal functions based on ERA5 reanalysis data based mainly on satellite information, for the period 1998–2020 (spatial resolution of the data is a quarter of a degree, the time interval is one month). In each spatial cell, for each month, the average long-term values of this parameter were calculated, which showed seasonal changes in thermal conditions in the studied water area. Linear trend coefficients have been determined, which showed a stable tendency to warming of the surface layer of sea waters, most pronounced in summer. Extreme deviations from the average long-term values (anomalies) of the surface temperature of the Bering Sea are considered.

Keywords: sea surface temperature, reanalysis, thermal regime, linear trend, harmonic analysis, method of empirical orthogonal functions, Bering Sea

REFERENCES

Bagrov N. A. Analiticheskoe predstavlenie posledovatel'nosti meteorologicheskikh polei posredstvom estestvennykh ortogonal'nykh sostavlyayushchikh [Analytical representation of a sequence of meteorological fields by means of natural orthogonal components] // Tr. Tsentral'nogo instituta prognozov. 1959. Issue 74. P. 3–24. (In Russian).

Baker M. R., Kivva K. K., Pisareva M. N., Watson J. T., Selivanova Ju. Shifts in the physical environment in the Pacific Arctic and implications for ecological timing and conditions // Deep-Sea Res. II. 2020. V. 177. 104802. DOI: 10.1016/j.dsr2.2020.104802.

Basyuk E. O., Zuenko Yu. I. Beringovo more 2018 – ekstremal'no maloledovityi i teplyi god [Bering sea: 2018 as the extreme low-ice and warm year] // Izv. TINRO. 2019. V. 198. P. 119–142. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142. (In Russian).

- Danielson S.L., Weingartner T.J., Hedstrom K.S., Aagaard K., Woodgate R.A., Curchitser E., Staben P.J. Coupled wind-forced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait through flow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic sea surface height gradient // *Progress in Oceanography*. 2014. V. 125. P. 40–61. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.006>.
- Kawaguchi Y., Nishioka J., Nishino S., Fujio S., Lee K., Fujiwara A., Yanagimoto D., Mitsudera H. and Yasuda I. Cold water upwelling near the Anadyr Strait: Observations and simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. V. 125. e2020JC016238. <https://doi.org/10.1029/2020JC016238>.
- Khen G.V., Basyuk E.O., Sorokin Yu.D., Ustinova E.I., Figurkin A.L. Termicheskie usloviya na poverkhnosti Beringova i Okhotskogo morei v nachale 21-go veka na fone poluvekovoi izmenchivosti [Surface thermal conditions in the Bering and Okhotsk Seas in the early 21 Century against previous semi-centennial changes] // *Izv. TINRO*. 2008. V. 153. P. 254–263. (In Russian).
- Khen G.V., Ustinova E.I., Sorokin Yu.D. Mnogoletnie izmeneniya termicheskikh uslovii na poverkhnosti dal'nevostochnykh morei i SZTO i ikh svyaz' skrupnomasshtabnymi klimaticheskimi protsessami [Long-term changes in thermal conditions on the surface of the Far-Eastern Seas and North-West Pacific and their relationship with large-scale climate processes] // *Izv. TINRO*. 2020. V. 202, Issue 1. P. 187–207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207. (In Russian).
- Krovnin A.S., Kivva K.V., Muryi G.P., Sumkina A.A. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na mezhgodovye kolebaniya zapasov kamchatskoi gorbushi v 2014–2020 gg. [Influence of climatic factors on interannual variations of kamchatka pink salmon stocks in 2014–2020] // *Vopr. rybolovstva*. 2021. V. 22. Iss. 4. P. 35–45. DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-4-35-45.
- Lozhkin D.M., Shevchenko G.V. Trendy temperatury poverkhnosti Okhotskogo morya i prilgayushchikh akvatorij po sputnikovym dannym 1998–2017 gg. [Trends in the surface temperature of the Sea of Okhotsk and adjacent water areas according to satellite data in 1998–2017] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. Iss. 1. P. 55–61.
- Luchin V.A. Srednie mnogoletnie parametry verhnego kvaziodnorodnogo sloya Beringova morya (nizhnaya granica, temperatura, solenost') i ih vnutrigodovaya izmenchivost' [Mean climatic parameters of the upper mixed layer in the Bering Sea (lower boundary, temperature, salinity) and their annual variability] // *Izv. TINRO*. 2019. V. 199. P. 214–230. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-199-214-230.
- Overland J.E. Is the climate of Bering Sea warming and affecting the ecosystem? // *EOS*. 2004. V. 8. Iss. 33. P. 309–316.
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Vorontsov A.A. Tendentsii klimaticheskikh izmenenii termicheskikh uslovii pribrezhnykh akvatoriyaх zapadnoi chasti Beringova morya za poslednie desyatiletia [Tendencies of climatic changes for thermal conditions in the coastal areas of the Okhotsk Sea in last decades] // *Izv. TINRO*. 2018. V. 193. P. 167–182. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182. (In Russian).
- Shevchenko G.V. and Lozhkin D.M. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' potoka dlinnovolnovoy radiatsii na poverkhnosti severo-zapadnoi chasti Tihogo okeana po dannym reanaliza ERA5 [Spatio-Temporal Variability of the Resulting Long-Wave Radiation on the Surface of the Northwestern Pacific Ocean Based on the ERA5 Reanalysis Data] // *Physical Oceanography*. 2023. V. 30, Iss. 3. P. 331–342. DOI: 10.29039/1573-160X-2023-3-331-342. (In Russian, English translation).
- Tskhai Zh. R., Shevchenko G.V. Otsenka temperaturnykh anomalii poverkhnosti Okhotskogo morya i prilgayushchikh akvatorii po sputnikovym dannym [Estimate of Extreme Surface Temperature of the Okhotsk Sea and Adjacent Waters from Satellite Data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2013. Iss. 2. P. 50–61. DOI: 10.31857/S0205961422010079. EDN HRSJAX. (In Russian).
- Tskhai Zh. R., Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. Analiz termicheskikh uslovii v severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana po sputnikovym dannym [Analysis of Thermal Conditions in the Northwest Pacific Ocean from Satellite Data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2022. Iss. 1. P. 30–37. DOI: 10.31857/S0205961422010079. EDN HRSJAX. (In Russian).
- Ustinova E. Extreme events in the thermal state of the Far-Eastern Seas and adjacent waters of the Northwestern Pacific // *PIC-ES-2021 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract*. Victoria, BC, Canada. 2021. P. 26.
- Woodgate R.A., Aagaard K., Weingartner T. Monthly temperature, salinity, and transport variability of the Bering Strait through flow // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. Iss. 4. <https://doi.org/10.1029/2004GL021880>.
- Woodgate, R. A., T. Weingartner, and R. Lindsay (2010), The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat // *Geophys. Res. Lett.*, 2010. V. 37. L01602. DOI: 10.1029/2009GL041621.
- Zaharchuk E.A., Tihonova N.A. Ob intensivnosti techenij raznykh vremennykh masshtabov v Chukotskom more i Beringovom prolive [Intensity of currents of different time scales in the Chukchi Sea and Bering Strait] // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2006. No. 1. P. 58–66. (In Russian, English translation).
- Zhabin I.A., Dmitrieva E.V., Dubina V.A., and Luchin V.A. Izmenchivost' letnego vetrovogo apvellinga u Koryakskogo poberezh'ya v severo-zapadnoi chasti Beringova morya po dannym sputnikovym nablyudenij [Variability of Wind-Driven Upwelling along Koryak Coast in the North-Western Bering Sea Based on the Satellite Data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2022. No. 5. P. 60–73. (In Russian).
- Zhuk V.R., Kubryakov A.A. Vliyanie Vostochno-Sibirskogo techeniya na vodoobmen v Beringovom prolive po sputnikovym dannym [Impact of the Eastern Siberian Current on Water Exchange in the Bering Strait on the Base of Satellite Altimetry Measurements] // *Oceanology*. 2021. V. 61. Iss. 6. P. 781–802. (In Russian, English translation).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ CO₂ НАД КРУПНЫМИ АКВАТОРИЯМИ БОРЕАЛЬНОЙ И СУБАРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ С ИХ ФЕНОЛОГИЧЕСКИМИ ФАЗАМИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫМИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SMOS

© 2024 г. В. В. Тихонов^{1,2,*}, Е. В. Пашинов¹, Д. М. Ермаков^{1,3},
И. В. Хвостов², А. Н. Романов²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

*E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023 г.

Приводятся результаты сравнения данных реанализа о содержании углекислого газа в атмосфере и фенологических фаз крупных пресноводных акваторий, расположенных в бореальной и субарктической зоне, за 2012–2020 гг. В работе использованы данные реанализа CAMS global greenhouse gas reanalysis, которые представляют собой трехмерные поля содержания аэрозолей и химических составляющих в атмосфере, с полным покрытием земного шара. В данном исследовании использовались данные о среднем содержании CO₂ в столбе воздуха над акваториями. Фенологические фазы пресноводных водоемов (водная поверхность, ледяной покров, разрушения льда) определялись по данным микроволнового радиометра MIRAS спутника SMOS. Проведенное сравнение и выполненный анализ показали, что концентрация CO₂ в атмосфере над исследуемыми акваториями имеет сезонный циклический характер. Минимум концентрации соответствует летнему периоду из-за сильного фотосинтеза в акваториях, в результате которого углекислый газ поглощается в толще воды. Максимум концентрации CO₂ над акваториями соответствует периоду разрушения ледяного покрова, приводящего к высвобождению накопленного за зимний период углекислого газа, который “запечатан” во льду и в водной толще подо льдом. У замерзающих озер, находящихся в бореальной зоне, помимо стабильного весеннего максимума CO₂ иногда наблюдается сильный кратковременный выброс углекислого газа, также соответствующий стадии разрушения ледяного покрова. Этот выброс объясняется более высокой биопродуктивностью водоемов бореальной зоны по сравнению с акваториями субарктической зоны.

Ключевые слова: крупные акватории, фенологические фазы, бореальная и субарктическая зона, углекислый газ, спутниковая микроволновая радиометрия, ледяной покров

DOI: 10.31857/S0205961424010064, EDN: GMMDLU

ВВЕДЕНИЕ

Различные пресноводные акватории Северного полушария (озера, пруды, водохранилища, заливы и т.п.) выступают важнейшим компонентом бореальных и субарктических ландшафтов. Они также представляют собой важный элемент регионального баланса углерода. Акватории функционируют как переносчики и преобразователи большого количества углерода, полученного естественным и антропогенным путем. Эти водные объекты служат пассивными каналами переноса углерода от почвы к морю, а также отводят углерод из наземной среды в атмосферу и осаждают его в донные отложения (Engel et al., 2018; Rantala et al., 2016; Tranvik et al., 2009; Wen et al., 2021).

Потепление климата оказывает огромное влияние на функционирование водных экосистем. Важным фактором в этой динамике становится органический углерод, который связан с несколькими жизненно важными функциями экосистемы через влияние на биологическую продукцию и физико-химические свойства акваторий. В работах (Engel et al., 2018; Rantala et al., 2016; Tranvik et al., 2009; Wen et al., 2021) показана тесная связь между водными объектами субарктической и бореальной зоны и наземной средой. Помимо влияния водосбора эти исследования показали, что запасы органического углерода в донных отложениях определяются глубиной водной толщи. Предполагается, что влияние глубины связано с влиянием ослабления света, а также микробных процессов в толще воды

и на границе раздела осадок – вода. Экосистемы высоких широт подвергаются серьезным трансформациям в условиях изменения климата, однако механизмы положительных и отрицательных климатических обратных связей до конца не изучены. Для глобального баланса углерода особенно важна судьба его огромных запасов в северных водно-болотных угодьях. Предполагается, что вынос органического углерода из наземной среды будет увеличиваться в северных регионах с ростом температуры и осадков. Наличие участков вечной мерзлоты может давать дополнительный вклад в вынос углерода при оттаивании. Вследствие тесного взаимодействия водосбор – озеро изменение климата может привести к возникновению положительной обратной связи, которая ускорит перемещение наземного углерода в атмосферу через водную среду. На рис. 1 представлена типичная схема цикла органического углерода в озерах субарктической и бореальной зоны, который определяется различными внешними воздействиями.

Роль озер и водохранилищ в переносе и трансформации растворенного неорганического углерода зависит от характеристик каждого водоема. Например, потребление и производство CO_2 внутри акватории может быть наиболее важным фактором динамики углерода в теплых эвтрофных озерах, в то время как боковой перенос CO_2 может быть очень

значительным в бореальных и субарктических водоемах (Weyhenmeyer et al., 2015).

В высоких широтах уменьшение продолжительности снежного покрова и таяние вечной мерзлоты приводит к увеличению содержания органического углерода в близлежащих акваториях (Zimov et al., 2006). Изменения в продолжительности существования ледяного и снежного покрова, а также деградация вечной мерзлоты влияют на поток углерода с водосбора, оказывая воздействие как на сток, так и на растительность. Продолжительность основного сезона вегетации и стока, определяемая среднегодовой температурой воздуха, представляется хорошим предсказателем изменения концентрации органического углерода во временном и пространственном масштабе (Weyhenmeyer, Karlsson 2009). Содержание CO_2 во внутренних водах часто демонстрирует значительную изменчивость в сезонном масштабе (Wen et al., 2021). По сравнению с другими сезонами года концентрация CO_2 летом, как правило, низкая из-за сильного фотосинтеза фитопланктона в озерах и водохранилищах, который поглощает углекислый газ в толще воды. Период таяния льда – критический временной интервал для выбросов CO_2 из бореальных и субарктических акваторий (Denfeld et al., 2015, 2016; Karlsson et al., 2013), поскольку накопленный CO_2 , заключенный во льду и находящийся в подледной воде, может

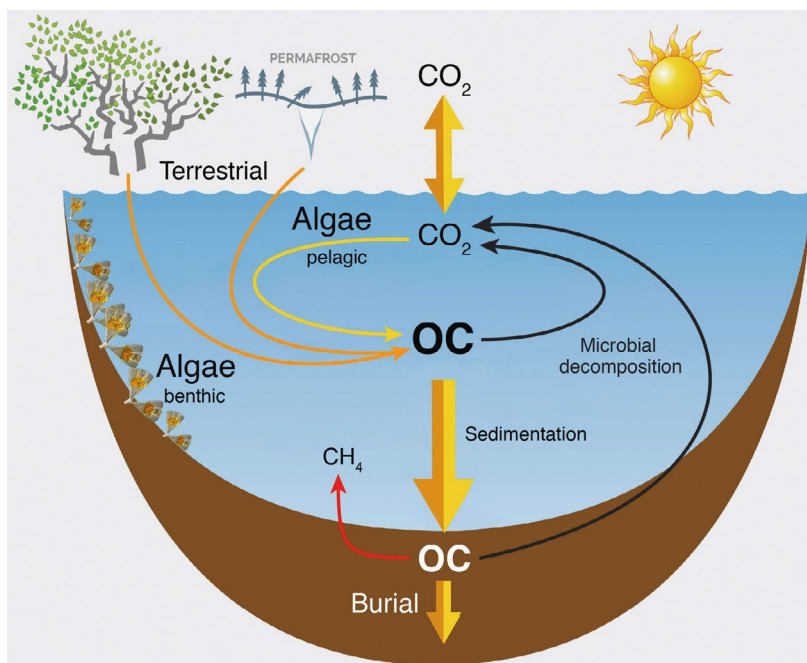


Рис. 1. Цикл органического углерода в озерах субарктической и бореальной зоны (<https://www.arcticcirc.net/research-interests/gudas-lake-carbon-cycles>). Terrestrial – наземный; Algae pelagic – водоросли пелагические (растения или животные, обитающие в толще или на поверхности воды); Algae benthic – водоросли бентосные (совокупность организмов, обитающих на грунте и в грунте дна водоемов); Microbial decomposition – микробное разложение; Sedimentation – осаждение; Burial – захоронение.

быть быстро выброшен в атмосферу во время таяния ледяного покрова. В олиготрофных озерах сезонные колебания концентрации CO₂ могут быть вызваны изменением растворенного неорганического углерода и аллохтонного органического вещества (Wen et al., 2021).

В работе (Denfeld et al., 2016) представлены данные по изменчивости парциального давления углекислого газа (pCO₂) подо льдом для 506 шведских и финских озер, полученных либо прямыми измерениями, либо рассчитанные по значениям общего неорганического углерода, щелочности, pH, температуры воды и высоты над уровнем моря по различным методикам. Эти исследования показали, что химический состав воды и морфометрия озер представляются более важными факторами, определяющими подледное содержание pCO₂ в региональном масштабе, чем климатические переменные (температура воздуха и продолжительность существования ледяного покрова). Накопление CO₂ в подледных озерах происходит за счет микробной минерализации питательных веществ и органического вещества в донных отложениях и поступления CO₂ с водосбора до начала таяния льда. В работе сделан вывод, что в региональном масштабе круговорот углерода в покрытых льдом озерах и последующая эмиссия CO₂ при таянии льда становятся важными составляющими годовой эмиссии углекислого газа. Учитывая возможность значительных экосистемных изменений в озерах, покрытых льдом, исследование периода существования ледяного покрова в глобальной оценке эмиссии CO₂ должно включать в себя мониторинг изменений не только ледового покрова, но и трофического статуса озер.

Анализ процессов, связанных с органическим и неорганическим углеродом в различных акваториях (включая биологическую деятельность, физическое перемешивание, термодинамический процесс и газообмен между воздухом и водой), становится ключом к пониманию их роли в глобальном углеродном цикле, а также климатических изменений, происходящих на нашей планете.

Настоящая работа посвящена оценке взаимосвязи данных реанализа о содержании углекислого газа в атмосфере и данных спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) о фенологических фазах крупных акваторий Северного полушария, расположенных в бореальной и субарктической зоне, за 2012–2020 гг. Целью работы было показать сезонную цикличность концентрации CO₂ над крупными пресноводными акваториями, которая связана с фенологическими фазами водоемов (открытая вода, ледяной покров, разрушение и таяние льда), и продемонстрировать, что для всех подобных акваторий динамика концентрации CO₂ схожа, и ее максимум наблюдается в начале весеннего периода, когда разрушается ледяной покров у замерзающих озер.

ИССЛЕДУЕМЫЕ АКВАТОРИИ

В качестве исследуемых акваторий было выбрано шесть крупных пресноводных, замерзающих водных объектов, расположенных в различных природных зонах Северного полушария: оз. Байкал, Ладожское оз., оз. Гурон, Большое Невольничье и Большое Медвежье озера, а также южная (пресноводная) часть Обской губы (рис. 2). На рис. 2 зеленым цветом выделена область, соответствующая ячейке L1C SMOS (см. разд. “Спутниковые данные”). В табл. 1 указаны регионы и природные зоны, в которых расположены исследуемые акватории, а также координаты центра анализируемых ячеек L1C SMOS.

ДАННЫЕ РЕАНАЛИЗА

Для оценки содержания углекислого газа в атмосфере над исследуемыми акваториями были использованы данные реанализа CAMS (*англ.* Copernicus Atmosphere Monitoring Service) global greenhouse gas reanalysis (EGG4) (Inness et al., 2019). CAMS считается крупнейшим набором данных реанализа о составе атмосферы, предоставляемым Европейским центром среднесрочных прогнозов

Таблица 1. Исследуемые акватории и координаты центра ячеек L1C SMOS

Акватория	Регион / природная зона	Координаты
Оз. Байкал	Южная Сибирь / бореальная зона	54.17° с.ш., 108.91° в.д.
Ладожское оз.	Северо-запад России / бореальная зона	60.88° с.ш., 31.37° в.д.
Обская губа, южная часть	Север Западной Сибири / субарктическая зона	67.21° с.ш., 73.22° в.д.
Оз. Гурон	Великие американские озера / бореальная зона	44.56° с.ш., 82.41° з.д.
Большое Невольничье оз.	Северо-запад Канады / бореальная зона	61.28° с.ш., 114.8° з.д.
Большое Медвежье оз.	Северо-запад Канады / субарктическая зона	65.97° с.ш., 120.5° з.д.

(англ. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF). Он состоит из трехмерных полей данных об аэрозолях и химических составляющих атмосферы с полным покрытием земного шара. В настоящий момент доступны данные за период с 2003 по 2020 г. Реанализ CAMS EGG4 – продукт 4d-var системы ассимиляции, в основе которой лежит модель прогноза ECMWF

IFS CY42R1 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model/ifs-documentation>). Реанализ ассимилирует данные спутникового дистанционного зондирования земли в 12-часовом временном окне с 00:09 до 21:00 UTC (англ. Coordinated Universal Time) и с 21:00 до 09:00 UTC и обеспечивает глобальные поля атмосферных параметров на регулярной сетке коор-

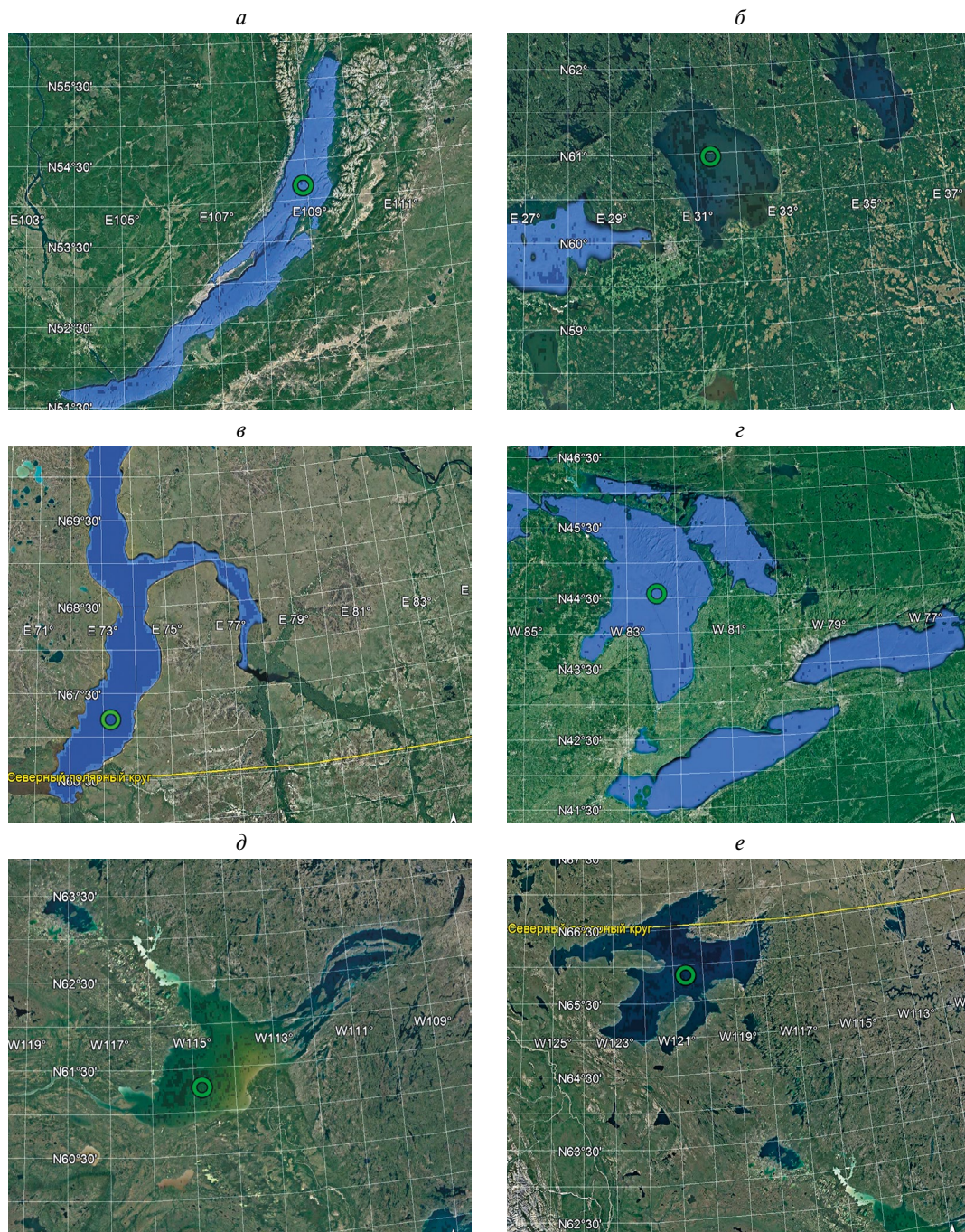


Рис. 2. Исследуемые акватории: *а* – оз. Байкал; *б* – Ладожское оз.; *в* – Обская губа; *з* – оз. Гурон; *д* – Большое Невольничье оз.; *е* – Большое Медвежье оз. Зеленым цветом указана область, соответствующая ячейке LIC SMOS.

динат $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ с временной периодичностью 3 ч. В работе использовались данные CAMS EGG4 о среднем содержании CO₂ в столбе воздуха (в ppm). Ошибки данных реанализа CAMS EGG4 по CO₂ и по данным наземных экспериментов в среднем находятся в пределах 1% в нижних слоях тропосферы (https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2021-04/CAMS84_2018SC3_D5.1.2-2020.pdf). Данные реанализа CAMS EGG4 были получены с сервера <https://atmosphere.copernicus.eu/> и совмещены по пространству и времени с данными по яркостной температуре, полученной из продукта L1C SMOS за период 2012–2020 гг.

СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

Для определения фенологических фаз (водная поверхность, ледяной покров, разрушение ледяного покрова), выбранных для исследования акваторий, были использованы данные продукта L1C SMOS.

Яркостная температура поверхности Земли ТЯ на горизонтальной ТН и вертикальной TV поляризации измеряется в диапазоне углов зондирования 0° – 60° микроволновым радиометром MIRAS (англ. Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) (Kerr et al., 2010). Радиометр MIRAS размещен на спутнике Европейского космического агентства (англ. European Space Agency – ESA) SMOS. Он принимает восходящее излучение на частоте 1.41 ГГц. Максимальный пространственный охват достигается при угле визирования 42.5° , при этом пространственное разрешение составляет

35×65 км (Gutierrez et al., 2017). Данные продукта L1C SMOS привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9, линейный размер ячейки которой составляет порядка 16 км, а площадь – около 195 км^2 (Sahr et al., 2003). Таким образом, значение яркостной температуры для любой ячейки продукта L1C формируется участком подстилающей поверхности площадью 1760 км^2 (по уровню 3 дБ). Сама же ячейка площадью 195 км^2 расположена в центре этого участка (Sahr et al., 2003). Для достижения максимальной достоверности из анализа были исключены следующие измерения:

- 1) значения, связанные с влиянием радиочастотных помех;
- 2) данные с погрешностью определения T_H и T_V более 5 К;
- 3) данные с коэффициентом поляризации (T_H/T_V) вне диапазона 0.01–0.99.

Непрерывный архив данных L1C SMOS с 2012 г. по настоящее время хранится на серверах Европейского космического агентства.

В работах (Тихонов и др., 2017; 2021; Tikhonov et al., 2018; 2022) на основе теоретического моделирования собственного микроволнового излучения пресноводных акваторий (озера, заливы) и анализа яркостной температуры, измеряемой радиометром MIRAS, показана возможность определения сезонных изменений состояния их поверхности. Сопоставление спутниковых данных с модельными расчетами позволило выявить для замерзающих пресноводных акваторий три временные области

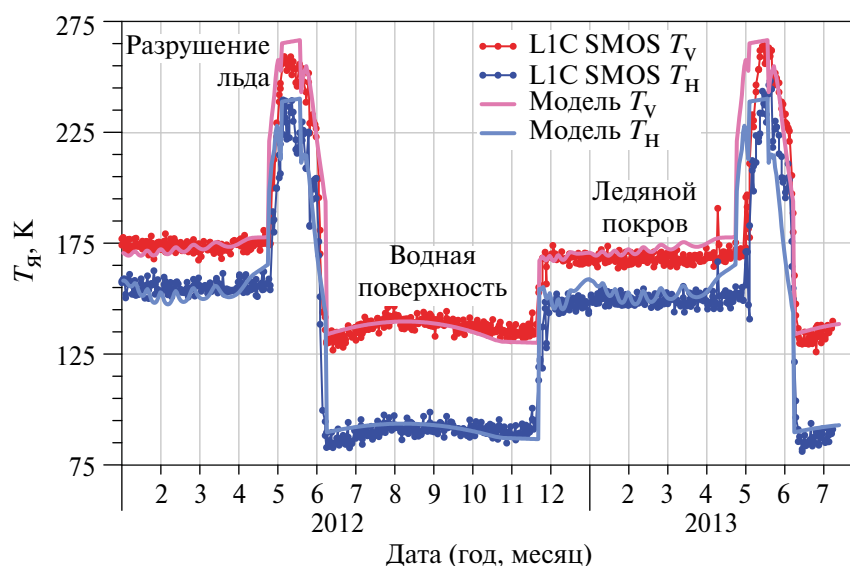


Рис. 3. Сезонные вариации яркостной температуры и соответствующие им фенологические фазы для Большого Невольничьего оз. (северо-запад Канады).

яркостной температуры: первая область связана с излучением свободной ото льда водной поверхности; вторая – с установившимся на поверхности озер ледяным покровом; а третья область, характеризующаяся кратковременным резким возрастанием яркостной температуры на величину порядка 40–90 К, соответствует периоду кардинального изменения в структуре ледяного покрова (период интенсивного разрушения и таяния) (рис. 3).

Сезонная динамика содержания углекислого газа в атмосфере над исследуемыми акваториями была сопоставлена с сезонными изменениями фенологических фаз акваторий, определенных по данным спутника SMOS, за период 2012–2020 гг. Результаты и анализ этого сравнения представлены в следующем разделе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлена динамика яркостной температуры выбранных ячеек (продукт L1C SMOS) для исследуемых акваторий (см. рис. 2) и динамика содержания CO_2 над ними, полученная по данным CAMS EGG4, за 2012–2020 гг. (для Обской губы за 2012–2018 гг.).

Гидрологические данные по исследуемым акваториям (Войнов и др., 2017; Каретников, 2021; Румянцев и др., 2012), а также проведенное сравнение сезонной динамики яркостной температуры и содержания CO_2 позволило разделить их на три вида: редко полностью замерзающие акватории бореальной зоны (Ладожское оз. и оз. Гурон), замерзающие акватории бореальной зоны (оз. Байкал и Большое Невольничье оз.), акватории субарктической зоны (Обская губа и Большое Медвежье оз.).

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 4) в целом показал, что концентрация CO_2 в атмосфере над исследуемыми акваториями имеет сезонный циклический характер. Минимум концентрации соответствует летнему периоду из-за сильного фотосинтеза фитопланктона в акваториях, в результате которого углекислый газ поглощается в толще воды. Максимум концентрации CO_2 над акваториями соответствует окончанию зимнего (холодного) периода. Зимой из-за сильного понижения температуры воды резко уменьшается фотосинтез, что приводит к сильному уменьшению поглощения CO_2 в водной толще, и соответственно увеличению его концентрации в воде, и эмиссии из акваторий. Такая динамика яркостной температуры и концентрации CO_2 характерна для всех исследуемых водных объектов как постоянно замерзающих в зимний период, так и не всегда замерзающих зимой.

Для постоянно замерзающих акваторий максимум концентрации CO_2 над ними соответствует

периоду разрушения ледяного покрова (сильное возрастание яркостной температуры весной), приводящего к высвобождению накопленного за зимний период углекислого газа, который был “запечатан” во льду и в водной толще подо льдом (см. рис. 4а, в, д, е). Такая же динамика характерна и для редко полностью замерзающих водоемов: Ладожское оз. в 2012, 2013 и 2016–2018 гг. (см. рис. 4б); оз. Гурон в 2014 и 2015 гг. (см. рис. 4г). У замерзающих озер, находящихся в бореальной зоне, помимо стабильного весеннего максимума CO_2 иногда наблюдается сильный кратковременный выброс углекислого газа, также соответствующий стадии разрушения ледяного покрова: для оз. Байкал в 2012, 2014, 2015, 2017 и 2019 гг. (см. рис. 4а); для Большого Невольничьего оз. в 2012, 2014, 2015 и 2019 гг. (см. рис. 4д).

На рис. 5 показана сезонная динамика яркостной температуры и концентрации CO_2 для двух озер в более хорошем разрешении за период 2012–2014 гг. На этом рисунке представлены два характерных для бореальной и субарктической зоны озера: Байкал и Большое Медвежье, соответственно. Из рис. 5 видно, что кратковременный выброс углекислого газа у оз. Байкал (см. рис. 5а) соответствует стадии окончания разрушения льда на озере (2012 и 2014 гг.). У Большого Медвежьего озера, расположенного в субарктической зоне, такого выброса не наблюдается (см. рис. 5б). Такой характерный выброс объясняется более высокой биопродуктивностью водоемов бореальной зоны по сравнению с акваториями субарктической зоны и, соответственно, большим накоплением углекислого газа в водной толще за период ледостава. Отсутствие таких выбросов в некоторые годы у замерзающих озер бореальной зоны требует дальнейшего исследования. Вероятно, оно связано с какими-то гидрологическими и биохимическими процессами, происходящими в этих акваториях.

Сравнение двух на первый взгляд похожих озер, расположенных на северо-западе Канады (Большое Невольничье и Большое Медвежье) показало, что они сильно различаются своей биопродуктивностью. Озеро Большое Медвежье, расположенное в субарктической зоне, является ультраолиготрофным. Низкая температура воды, слабая обеспеченность биогенными элементами, отсутствие источников загрязнения обуславливают низкую биологическую продуктивность озера. Для этого озера характерна малая доля растворенных в воде питательных веществ, высшая водная растительность практически отсутствует, рыбная продукция низкая, видовое разнообразие фитопланктона очень мало (Румянцев и др., 2012). Озеро Большое Невольничье, которое расположено на границе бореальной и субарктической зоны, является олиготрофным. В озеро впадает р. Невольничья,

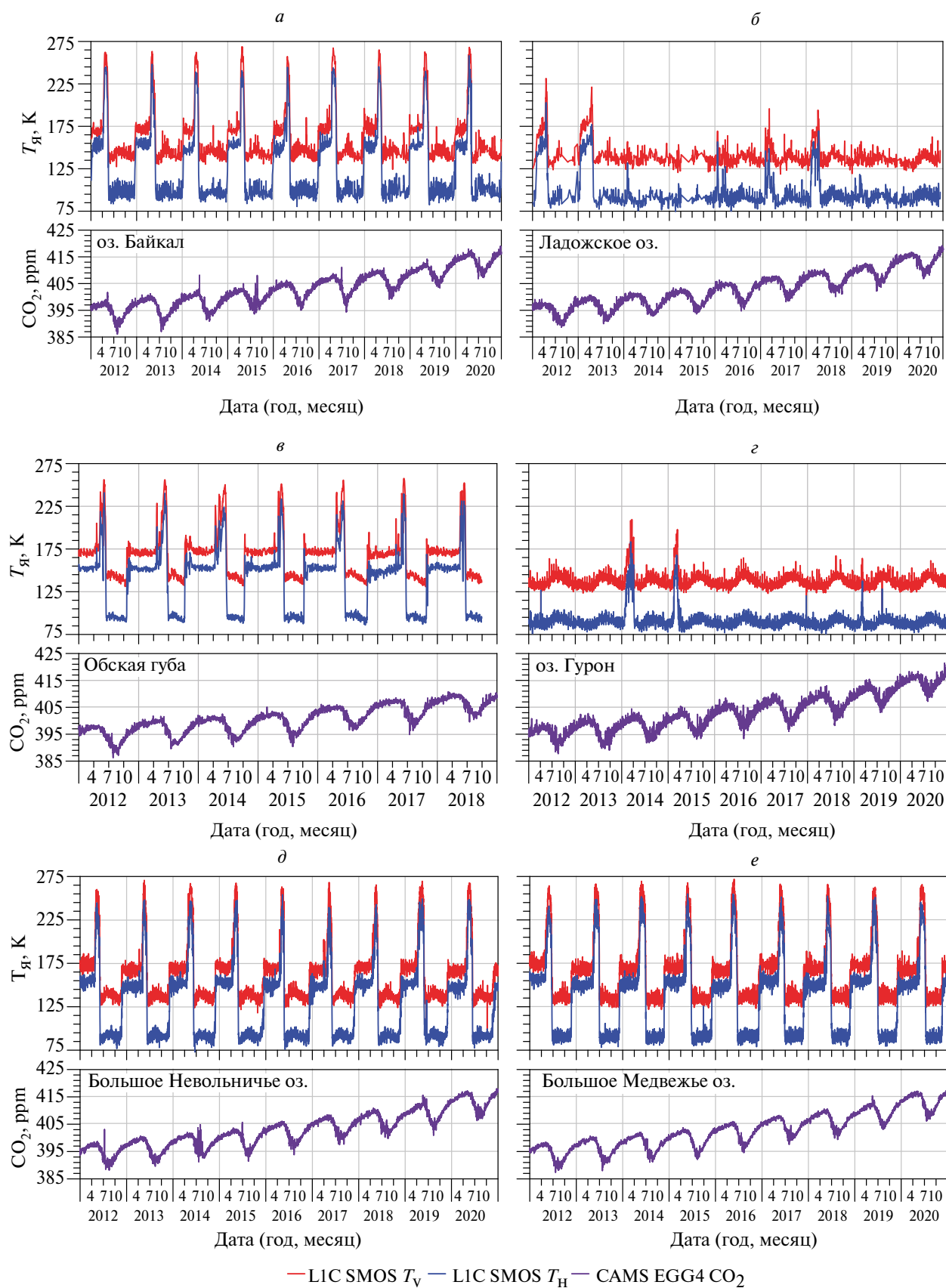


Рис. 4. Сезонная динамика яркостной температуры и концентрации CO₂ для исследуемых акваторий: *а* – оз. Байкал; *б* – Ладожское оз.; *в* – Обская губа; *г* – оз. Гурон; *д* – Большое Невольничье оз.; *е* – Большое Медвежье оз.

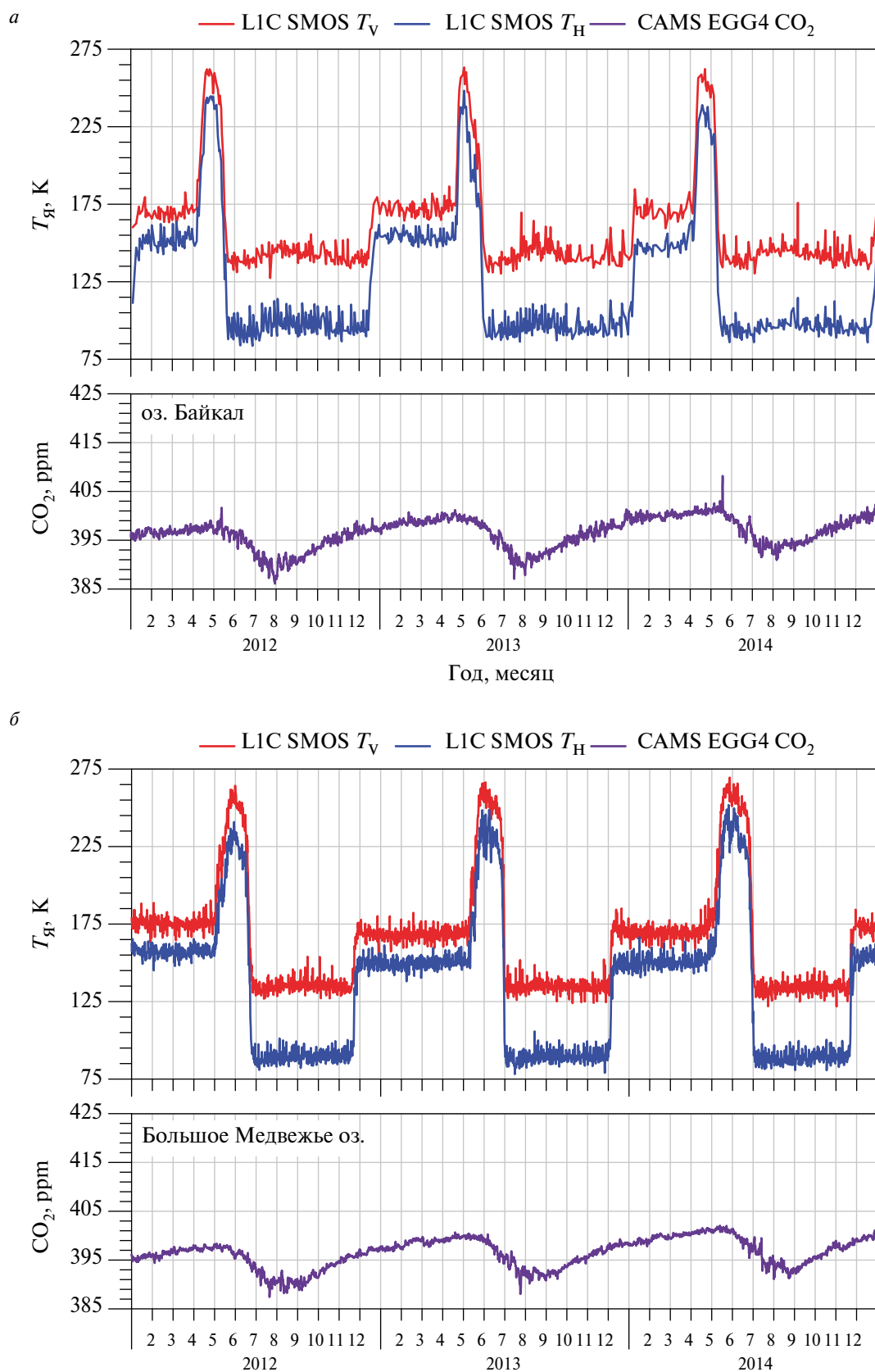


Рис. 5. Сезонная динамика яркостной температуры и концентрации CO₂ за трехлетний период: *a* — для оз. Байкал (бореальная зона); *b* — для оз. Большое Медвежье (субарктическая зона).

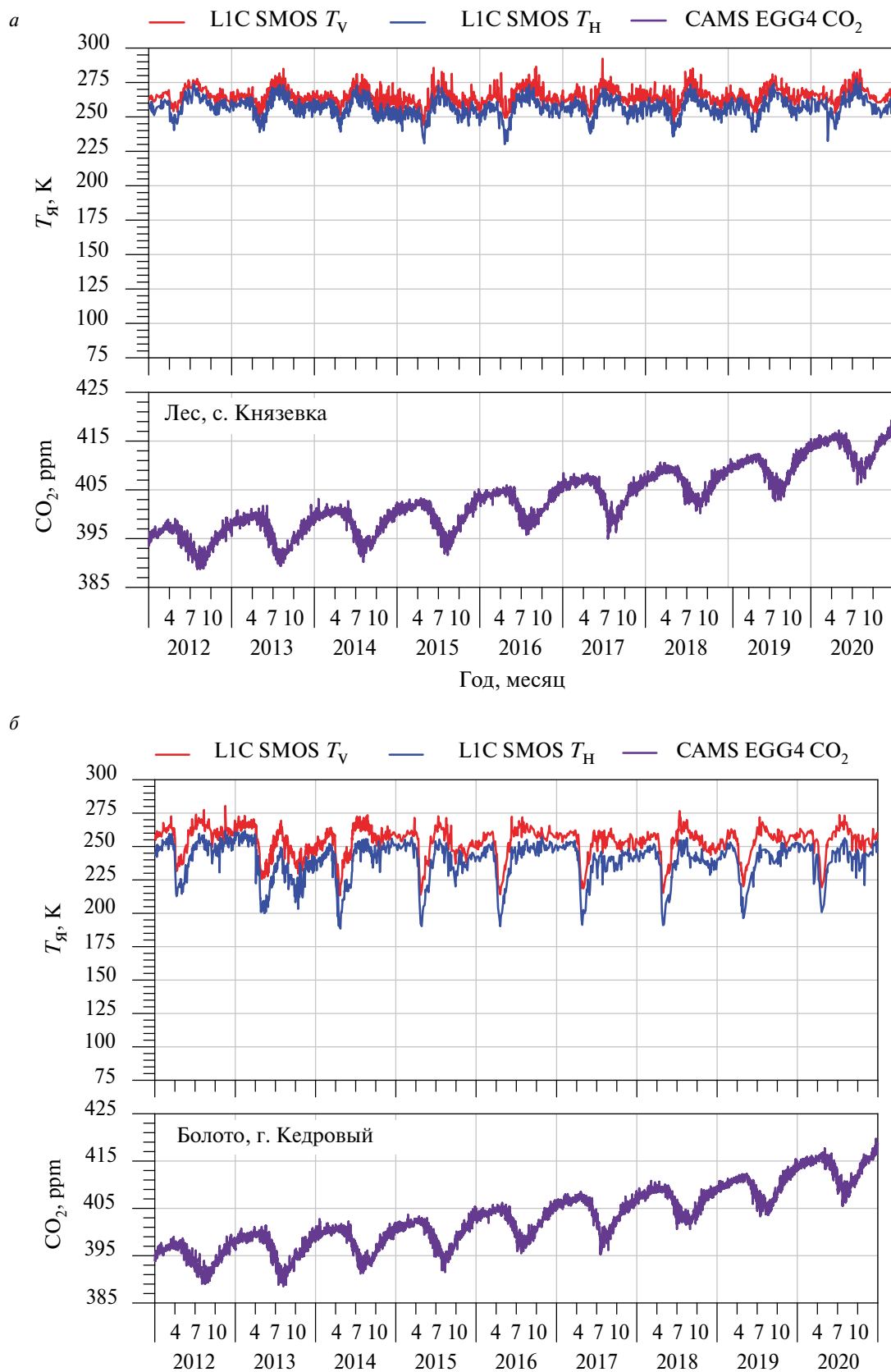


Рис. 6. Сезонная динамика яркостной температуры и концентрации CO₂ для двух тестовых участков с разным ландшафтом: *a* – лес; *b* – болото.

Таблица 2. Тестовые участки ландшафта и координаты центра ячеек L1C SMOS

Участок ландшафта	Населенный пункт, регион	Координаты
Лес	с. Князевка, Омская обл.	54.495° с.ш., 74.065° в.д.
Болото	г. Кедровый, Томская обл.	57.102° с.ш., 79.498° в.д.

приносящая летом 54 тыс. т растворенных минеральных соединений и 36 тыс. т взвешенных веществ. Рыбная продукция озера довольно разнообразна. Биомасса фитопланктона в озере зимой подо льдом чрезвычайно низкая, а летом возрастает от 130 до 340 мг/м³ (Румянцев и др., 2012). Таким образом, биопродуктивность Большого Невольничьего оз. значительно выше, чем Большого Медвежьего, что и показывают кратковременные выбросы углекислого газа в период разрушения ледяного покрова, которые присутствуют на сезонной зависимости концентрации CO₂ для первого озера (ср. рис. 4д и е). Для пресноводной части Обской губы отсутствие выбросов CO₂ в период разрушения ледяного покрова можно объяснить, во-первых, тем, что Обская губа расположена в холодной субарктической зоне в области вечной мерзлоты, а во-вторых, тем, что это эстуарий реки Обь, и даже в зимнее время существует значительный сток Оби, не позволяющий водной массе застаиваться подо льдом (Tikhonov et al., 2022).

В работе использовались данные реанализа CAMS EGG4 о концентрации CO₂ в столбе атмосферы над исследуемыми акваториями. Нас же интересовало сезонное изменение концентрации углекислого газа в приземном (приводном) слое атмосферы и связь его с фенологическими фазами водных объектов. Кратковременные выбросы CO₂ в период разрушения ледяного покрова у водных акваторий, находящихся в бореальной зоне, мы связали с накоплением углекислого газа за зимний период в водной толще подо льдом и в ледяном покрове и последующем выбросом его при весеннем разрушении льда. Однако такие кратковременные повышения концентрации CO₂ могут быть связаны с атмосферным переносом от территорий, имеющих другой ландшафт и значительно удаленных от рассматриваемых акваторий. Для доказательства того, что кратковременные выбросы CO₂ в период разрушения льда связаны именно с данными акваториями, была рассмотрена долговременная сезонная динамика концентрации углекислого газа и яркостной температуры двух тестовых участков, расположенных в бореальной зоне (см. рис. 6). Первый участок расположен в Омской обл. и полностью покрыт лесом, второй представляет собой обширную болотистую местность и находится в Томской обл. В табл. 2 указаны регионы и природные зоны, в которых расположены тестовые участки, а также координаты центра анализируемых ячеек L1C SMOS.

Анализ рис. 6 показал, что сезонные изменения T_y для тестовых участков сильно отличаются от сезонных значений яркостной температуры для пресноводных акваторий как по величине, так и по амплитуде изменений (ср. рис. 4 и 6). Максимальные значения T_y соответствуют середине лета и связаны с максимальным развитием растительности. Далее значения T_y уменьшаются, что обусловлено увяданием растительности и последующим замерзанием поверхности. В зимний период T_y немного увеличивается или остается постоянной. Минимум яркостной температуры соответствует периоду весеннего таяния, когда поверхность становится влажной, а растительность еще не начала развиваться. После минимума происходит резкий рост T_y , связанный с высыханием поверхности и быстрым развитием растительности (Романов и др., 2022). Различия в амплитуде сезонных изменений яркостной температуры для лесного и болотистого участка, особенно в весенний период, связано с большей увлажненностью второго участка, а также, вероятно, с появлением на нем небольших озер. Сезонные изменения концентрации CO₂ в столбе атмосферы над тестовыми участками так же, как и у пресноводных акваторий, носят циклический характер. Минимум концентрации углекислого газа приходится на летний период, соответствующий максимуму фотосинтеза, определяемому буйным развитием растительности. Максимум концентрации CO₂ приходится на весенний период, когда начинается период таяния (освобождения поверхности от снега и льда), а растительность еще не развивается. Кратковременных весенних выбросов CO₂, как у пресноводных акваторий бореальной зоны, на тестовых участках ни в один из сезонов не наблюдается, что становится косвенным доказательством связи этих выбросов с разрушением ледяного покрова пресноводных акваторий бореальной зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты сравнения данных реанализа по концентрации углекислого газа в атмосфере и данных спутниковой микроволновой радиометрии для ряда крупных пресноводных акваторий Северного полушария, расположенных в бореальной и субарктической зоне, за период 2012–2020 гг. Данные спутниковой микроволновой радиометрии (спутник SMOS) были использованы

для определения фенологических фаз исследуемых водоемов: открытая водная поверхность, ледяной покров, разрушение ледяного покрова.

В работе мы стремились показать связь данных спутниковой микроволновой радиометрии, по которым можно отслеживать фенологические фазы крупных пресноводных акваторий бореальной и субарктической зоны, с динамикой концентрации CO₂ в столбе атмосферы над ними. Задача заключалась в том, чтобы продемонстрировать, что для всех подобных акваторий динамика концентрации CO₂ схожа, и максимум наблюдается в начале весеннего периода, когда разрушается ледяной покров у замерзающих озер или когда заканчивается холодный период (минимум биопродуктивности) для незамерзающих озер.

Полученные результаты и их анализ показали, что концентрация CO₂ в атмосфере над исследуемыми акваториями имеет сезонный циклический характер. Минимум концентрации соответствует летнему периоду из-за сильного фотосинтеза фитопланктона, в результате которого углекислый газ поглощается в воде. Максимум концентрации CO₂ над акваториями соответствует окончанию зимнего периода. Зимой из-за сильного понижения температуры воды резко уменьшается фотосинтез, что приводит к сильному уменьшению поглощения CO₂ в водной толще и, соответственно, увеличению его концентрации в воде и эмиссии из акваторий. Для замерзающих озер максимум концентрации CO₂ над акваториями соответствует периоду разрушения ледяного покрова, приводящего к высвобождению накопленного за зимний период углекислого газа, который “запечатан” во льду и в водной толще подо льдом. У замерзающих озер бореальной зоны иногда наблюдается еще и сильный кратковременный выброс углекислого газа, также соответствующий стадии разрушения ледяного покрова. Этот выброс объясняется более высокой биопродуктивностью водоемов бореальной зоны по сравнению с акваториями субарктической зоны.

В настоящей статье мы попытались кратко объяснить причины сезонной цикличности концентрации CO₂ в столбе атмосферы над акваториями, а также наличие или отсутствие кратковременного выброса CO₂ в период разрушения льда у ряда акваторий. Подробное исследование этих причин представляется темой для отдельной большой работы с привлечением многих специалистов, занимающихся исследованием озер, динамикой их вод, биопродуктивностью, физикой атмосферы и т.д. Такую глобальную задачу мы перед собой не ставили. Нам хотелось показать, что у всех подобных акваторий присутствует схожая динамика содержания CO₂ в атмосфере и связана она с фенологическими фазами этих акваторий.

Выполнить контактные измерения сезонной динамики концентрации углекислого газа в атмосфере для всех акваторий субарктической и бореальной зоны практически невозможно. Однако для крупных акваторий можно использовать информацию со спутника SMOS. Таким образом, данные спутниковой микроволновой радиометрии могут быть использованы для косвенной оценки сезонного изменения концентрации CO₂ в атмосфере над крупными пресноводными акваториями бореальной и субарктической зоны.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке темы “Эмиссия” (гос. регистрация № 122101700045-7), темы “Космос-2” (гос. регистрация № 075-01133-22-00), темы “Природные и природно-хозяйственные системы Сибири в условиях современных вызовов: диагностика состояний, адаптивные возможности, потенциал экосистемных услуг” (госзадание № 0306-2021-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод). СПб.: Нестор-История, 2017. 192 с.
- Каретников С.Г. Проявление климатических изменений в ледовом режиме Ладожского озера за последние 55 лет // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 2. С. 241–247. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020085>.
- Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий российской Арктики, Субарктики и северной тайги по данным микроволнового дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 4. С. 12–24. DOI: 10.31857/S020596142204008X.
- Румянцев В.А., Дракובה В.Г., Измайлова А.В. Великие озера мира. СПб.: Лема, 2012. 370 с.
- Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Шарков Е.А. Анализ изменений ледяного покрова пресноводных водоемов по данным SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 46–53. DOI: 10.7868/S0205961417060045.
- Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Алексеева Т.А., Сеницкий А.И., Тихонова М.В., Шарков Е.А., Комарова Н.Ю. Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 185–199. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199.
- Denfeld B.A., Wallin M.B., Sahlée E., Sobek S., Kokic J., Chmiel H.E., Weyhenmeyer G.A. Temporal and spatial carbon dioxide concentration patterns in a small boreal lake in relation to ice-cover dynamics // Boreal Environment Research. 2015. V. 20. No. 6. P. 679–692.
- Denfeld B.A., Kortelainen P., Rantakari M., Sobek S., Weyhenmeyer G.A. Regional Variability and Drivers of Below Ice CO₂ in Boreal and Subarctic Lakes // Ecosystems. 2016. V. 19. P. 461–476. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9944-z>.

- Engel F., Farrell K.J., McCullough I.M., Scordo F., Denfeld B.A., Dugan H.A., de Eyto E., et al. A lake classification concept for a more accurate global estimate of the dissolved inorganic carbon export from terrestrial ecosystems to inland waters // *The Science of Nature*. 2018. V. 105. Art. No. 25. 9 p. DOI: 10.1007/s00114-018-1547-z.
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P., Lopes G., Barbosa J. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. Lisboa: DEIMOS Engenharia, 2017. 83 p.
- Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J.J., et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. No. 6. P. 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.
- Karlsson J., Giesler R., Persson J., Lundin E. High emission of carbon dioxide and methane during ice thaw in high latitude lakes // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. No. 6. P. 1123–1127. DOI: 10.1002/grl.50152.
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
- Rantala M.V., Nevalainen L., Rautio M., Galkin A., Luoto T.P. Sources and controls of organic carbon in lakes across the subarctic treeline // *Biogeochemistry*. 2016. No. 129. P. 235–253. DOI: 10.1007/s10533-016-0229-1.
- Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid System // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. No. 2. P. 121–134.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E. Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. No. 8. P. 2727–2740. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>.
- Tikhonov V.V., Romanov A.N., Khvostov I.V., Alekseeva T.A., Sinit-skiy A.I., Tikhonova M.V., Sharkov E.A., Komarova N. Yu. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // *Российская Арктика (Russian Arctic)*. 2022. № 2(17). P. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71.
- Tranvik L.J., Downing J.A., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore Th.J., Dillon P., Finlay K., et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54. No. 6. Pt. 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.
- Wen Z., Shang Y., Lyu L., Li S., Tao H., Song K. A Review of Quantifying $p\text{CO}_2$ in Inland Waters with a Global Perspective: Challenges and Prospects of Implementing Remote Sensing Technology // *Remote Sensing*. 2021. V. 23. No. 13. Art. No. 4916. 15 p. <https://doi.org/10.3390/rs13234916>.
- Weyhenmeyer G.A., Karlsson J. Nonlinear response of dissolved organic carbon concentrations in boreal lakes to increasing temperatures // *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54. No. 6. Pt. 2. P. 2513–2519. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2513.
- Weyhenmeyer G.A., Kosten S., Wallin M.B., Tranvik L.J., Jeppesen E., Roland F. Significant fraction of CO_2 emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. Iss. 12. P. 933–938. <https://doi.org/10.1038/ngeo2582>.
- Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget // *Science*. 2006. V. 312. P. 1612–1613. DOI: 10.1126/SCIENCE.1128908.

Relation of Changes in CO_2 Concentration over Large Water Areas of the Boreal and Subarctic Zones of the Northern Hemisphere with Their Phenological Phases Determined from SMOS Satellite Data

V. V. Tikhonov^{1,2}, E. V. Pashinov¹, D. M. Ermakov^{1,3}, I. V. Khvostov², A. N. Romanov²

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

²Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

³Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino, Russia

The paper presents the results of comparing the atmospheric carbon dioxide reanalysis data and phenological phases of large freshwater areas located in the boreal and subarctic zone for 2012–2020. The data from the CAMS global greenhouse gas reanalysis, which are three-dimensional fields of aerosols and chemical constituents in the atmosphere, with full coverage of the globe, were used in this work. The data used in this study were the average CO_2 content in the air column over the water areas. The phenological phases of freshwater bodies (water surface, ice cover, ice destruction) were determined using data from the MIRAS microwave radiometer of the SMOS satellite. The comparison and analysis showed that the CO_2 concentration in the atmosphere over the studied water areas has a seasonal cyclic character. The minimum concentration corresponds to the summer period due to strong photosynthesis in water areas, as a result of which carbon dioxide is absorbed in the water column. The maximum concentration of CO_2 over water areas corresponds to the period of destruction of the ice cover, leading to the release of carbon dioxide accumulated during the winter period, which is “sealed” in the ice and in the water column under the ice. In freezing lakes located in the boreal zone, in addition to the stable spring CO_2 maximum, a strong short-term release of carbon dioxide is sometimes observed, also corresponding to the stage of ice cover destruction. This emission is explained by the higher bioproductivity of water bodies in the boreal zone compared to water areas in the subarctic zone.

Keywords: large water areas, phenological phases, boreal and subarctic zone, carbon dioxide, satellite microwave radiometry, ice cover

REFERENCES

- Voykov G. N., Nalimov Yu. V., Piskun A. A., Stanovoy V. V., Usankina G. E. Osnovnye cherty gidrologicheskogo rezhima Obskoi i Tazovskoi gub (led, urovni, struktura vod) [The main features of the hydrological regime of the Ob and Taz bays (ice, levels, water structure)]. Saint Petersburg: Nestor-History, 2017. 192 p. (In Russian).
- Karetnikov S. G. Proyavlenie klimaticheskikh izmenenii v ledovom rezhime Ladozhskogo ozera za poslednie 55 let [Manifestation of climatic change in the ice phenology of Lake Ladoga over the past 55 years] // Ice and Snow, 2021. V. 61. No. 2. P. 241–247. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020085>. (In Russian).
- Romanov A. N., Khvostov I. V., Tikhonov V. V., Sharkov E. A. Assessing Hydrological Changes in Wetland Areas of the Russian Arctic, Subarctic, and Northern Taiga Based on Microwave Remote Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. No. 9. P. 1100–1110. DOI: 10.1134/S0001433822090201.
- Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. Velikie ozera mira [Great Lakes of the World], Saint Petersburg: Lema, 2012. 370 p. (In Russian).
- Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Romanov A. N., Sharkov E. A. Analysis of Changes in the Ice Cover of Freshwater Lakes by SMOS data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. V. 54. No. 9. P. 1135–1140. <https://doi.org/10.1134/S0001433818090384>.
- Tikhonov V. V., Romanov A. N., Khvostov I. V., Alekseeva T. A., Sinitskiy A. I., Tikhonova M. V., Sharkov E. A., Komarova N. Yu. Mezhdodovye variatsii sobstvennogo mikrovolnovogo izlucheniya Obskoi guby v period ledostava i ikh svyaz' s gidrologicheskimi i klimaticheskimi izmeneniyami regiona [Interannual variation of microwave radiation of the Gulf of Ob during the freezing season and relationship to hydrological and climate changes in the region] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. No. 6. P. 185–199. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199. (In Russian).
- Denfeld B. A., Wallin M. B., Sahlée E., Sobek S., Kokic J., Chmiel H. E., Weyhenmeyer G. A. Temporal and spatial carbon dioxide concentration patterns in a small boreal lake in relation to ice-cover dynamics // Boreal Environment Research. 2015. V. 20. No. 6. P. 679–692.
- Denfeld B. A., Kortelainen P., Rantakari M., Sobek S., Weyhenmeyer G. A. Regional Variability and Drivers of Below Ice CO₂ in Boreal and Subarctic Lakes // Ecosystems. 2016. V. 19. P. 461–476. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9944-z>.
- Engel F., Farrell K. J., McCullough I. M., Scordo F., Denfeld B. A., Dugan H. A., de Eyto E., et al. A lake classification concept for a more accurate global estimate of the dissolved inorganic carbon export from terrestrial ecosystems to inland waters // The Science of Nature. 2018. V. 105. Art. No. 25. 9 p. DOI: 10.1007/s00114-018-1547-z.
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P., Lopes G., Barbosa J. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model, Lisboa: DEIMOS Engenharia, 2017. 83 p.
- Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J. J., et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. V. 19. No. 6. P. 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.
- Karlsson J., Giesler R., Persson J., Lundin E. High emission of carbon dioxide and methane during ice thaw in high latitude lakes // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 6. P. 1123–1127. DOI: 10.1002/grl.50152.
- Kerr Y. H., Waldeufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // Proceeding of the IEEE. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
- Rantala M. V., Nevalainen L., Rautio M., Galkin A., Luoto T. P. Sources and controls of organic carbon in lakes across the subarctic treeline // Biogeochemistry. 2016. No. 129. P. 235–253. DOI: 10.1007/s10533-016-0229-1.
- Sahr K., White D., Kimerling A. J. Geodesic Discrete Global Grid System // Cartography and Geographic Information Science. 2003. V. 30. No. 2. P. 121–134.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E. Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // The Cryosphere. 2018. V. 12. No. 8. P. 2727–2740. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>.
- Tikhonov V. V., Romanov A. N., Khvostov I. V., Alekseeva T. A., Sinitskiy A. I., Tikhonova M. V., Sharkov E. A., Komarova N. Yu. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // Russian Arctic. 2022. No. 2(17). P. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71.
- Tranvik L. J., Downing J. A., Loiselle S. A., Striegl R. G., Ballatore Th. J., Dillon P., Finlay K., et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnology and Oceanography. 2009. V. 54. No. 6. Pt. 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.
- Wen Z., Shang Y., Lyu L., Li S., Tao H., Song K. A Review of Quantifying pCO₂ in Inland Waters with a Global Perspective: Challenges and Prospects of Implementing Remote Sensing Technology // Remote Sensing. 2021. V. 23. No. 13. Art. No. 4916. 15 p. <https://doi.org/10.3390/rs13234916>.
- Weyhenmeyer G. A., Karlsson J. Nonlinear response of dissolved organic carbon concentrations in boreal lakes to increasing temperatures // Limnology and Oceanography. 2009. V. 54. No. 6. Pt. 2. P. 2513–2519. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2513.
- Weyhenmeyer G. A., Kosten S., Wallin M. B., Tranvik L. J., Jeppesen E., Roland F. Significant fraction of CO₂ emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs // Nature Geoscience. 2015. V. 8. Iss. 12. P. 933–938. <https://doi.org/10.1038/ngeo2582>.
- Zimov S. A., Schuur E. A. G., Chapin F. S. Permafrost and the global carbon budget // Science. 2006. V. 312. P. 1612–1613. DOI: 10.1126/SCIENCE.1128908.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКОВ ДЛИТЕЛЬНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГРОЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ НА ВОЛНЕ 1.35 СМ

© 2024 г. Г. С. Бордонский¹*, А. А. Гурулев¹, А. О. Орлов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

*E-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

Измерение нетепловых излучений в настоящее время является одним из направлений дистанционного зондирования Земли. Здесь недавно были открыты мощные электромагнитные излучения атмосферы, инициируемые космическими лучами, в интервале от низких частот до гамма-диапазона. Представляет особый интерес исследование таких излучений в микроволновом диапазоне, где хорошо развита техника аэрокосмических исследований. В настоящей работе приведены результаты совместных измерений микроволнового и гамма-излучения атмосферы во время гроз летом 2022 года в Забайкалье. Цель исследования заключалась в поиске относительно длительных (до нескольких минут) электромагнитных излучений вблизи частоты 22.2 ГГц на линии вращательного спектра молекул водяного пара. Предполагалось, что такая особенность может возникать из-за появления лавин убегающих электронов, порожденных космическими лучами. В этом процессе, кроме тормозного гамма-излучения возникает возбуждение газовой среды, что может вызывать ее свечение в микроволновом диапазоне. В случае сильной электризации в полях с напряженностью выше 0.284 МВ/м возможно возникновение уникального явления — самоподдерживающейся фотоядерной реакции в нижней атмосфере в грозовых облаках. При этом процессе электромагнитное свечение может длиться от единиц до десятков минут. В выполненном исследовании обнаружено несколько эпизодов возрастания интенсивности излучения в микроволновом диапазоне, сопровождающихся импульсами гамма-излучения в грозовой атмосфере. Обнаруженное в эксперименте свечение может быть объяснено локальными электрическими разрядами при возрастании электризации облаков. Другое объяснение — возникновение самоподдерживающейся фотоядерной реакции, создающей большой объем возбужденного газа. Обсуждены пути совершенствования методики микроволновых измерений для регистрации высокоэнергетических явлений в нижней атмосфере на большом удалении от измерительной аппаратуры, где гамма-лучи не регистрируются, с использованием ИСЗ.

Ключевые слова: электризация атмосферы, микроволновое излучение, водяной пар, фотоядерные реакции, дистанционное зондирование

DOI: 10.31857/S0205961424010079, **EDN:** GMLJYT

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в атмосфере Земли было обнаружено импульсное электромагнитное излучение с частотным спектром от нулевых до частот гамма-диапазона. Это открытие связано с исследованиями из космоса и подтверждено наземными наблюдениями. Одним из первых систематических измерений являются работы на Тянь-Шаньской высокогорной станции космических лучей (Антонова и др., 2007), где проводились измерения потоков частиц и электромагнитных излучений в широком диапазоне частот, в том числе мегагерцовом (0.1–30 МГц) и на частоте УКВ диапазона (250 МГц). Обнаруженные импульсные из-

лучения были объяснены возникновением лавин “убегающих” электронов (Гуревич, Зыбин, 2001), которые первоначально порождаются космическими частицами, а затем ускоряются в электрических полях атмосферы, не испытывая торможения, до энергий порядка МэВ. При последующем торможении образовавшихся лавин электронов, возникают интенсивные потоки гамма-излучения. На первом этапе исследований полагали, что области генерации излучений расположены на высотах мезосферы и стратосферы, однако в последующих работах было установлено их расположение в тропосфере в грозовых облаках. Были также обнаружены сверхмощные вспышки, на 12 порядков превышающие мощность излучения, чем это представлялось ранее.

Для объяснения возникновения столь мощных излучений в атмосфере был предложен механизм умножения электронов, названный “релятивистской моделью обратной связи” (Dwyer et al., 2012). При напряженности электрического поля выше порогового (0.284 МВ/м) при давлении 0.1 МПа число вторичных электронов экспоненциально возрастает и затравочные электроны ускоряются до энергии в десятки МэВ. При взаимодействии таких электронов с ядрами возникают фотоны гамма-излучения, которые приводят к фотоядерным реакциям. Подтверждение возникновения фотоядерных реакций было получено из спектральных измерений гамма-излучения, в частности, для наблюдавшихся фотонов с энергией 0.511 МэВ, соответствующей электрон-позитронной аннигиляции (Enoto, 2017).

Кроме кратковременных гамма-всплесков, были также обнаружены длительные свечения, названные TGE (Thunderstorm Ground Enhancements), продолжающиеся от нескольких секунд до десятков минут (Dwyer et al., 2012). Причем гамма-свечение может предшествовать молнии или прекращаться после молниевых разряда, которое обычно совпадает с прохождением грозовых туч. Такая самоподдерживающаяся фотоядерная реакция является своеобразным ядерным “реактором” в атмосфере.

Для изучения высокоэнергетических атмосферных событий в 2018 году была начата Миссия монитора взаимодействия атмосферы и космоса (ASIM), осуществляемая Европейским космическим агентством (Neubert et al., 2019). Приборы миссии были установлены на Международную космическую станцию для измерений рентгеновского и гамма-излучений с энергией до 20 МэВ, трех фотометров и двух камер в диапазонах 180–250 нм, 337 нм и 777.4 нм.

В работе (Бабич, 2019) представлен обзор высокоэнергетических событий в земной атмосфере, вызванных космическими лучами. Механизмы TGE остаются еще плохо изученными. Это связано со значительным затуханием гамма-излучения в грозовой атмосфере, что затрудняет регистрацию свечения на расстояниях, превышающих 1 км. Поэтому в работах (Wada et al., 2019; Wada et al., 2021) для регистрации свечения использовали зимние грозы в Японии, для которых типичная высота электризации облаков (~1 км) значительно ниже обычной, что позволяло наблюдать гамма-свечение на уровне моря. Таким образом, имеется порог по интенсивности излучения, ниже которого невозможно регистрировать процесс возникновения области с фотоядерной реакцией на значительном удалении от него (за пределами нескольких километров). Поэтому представляет интерес разработка методик регистрации событий на удалении от их возникновения на десятки-сотни километров и более. Следу-

ет отметить отсутствие исследований импульсных излучений и свечений грозовой атмосферы в микроволновом диапазоне. Ранее считалось, что при пробое на убегающих электронах кратковременные всплески низкочастотных электромагнитных излучений наиболее выражены только на частотах 3–10 МГц (Антонова и др., 2007). Кроме того, важным является подтверждение представления о существовании длительных фотоядерных превращений, при которых в некоторых областях атмосферы могут возникать широкополосные источники излучения большой мощности.

Цель исследования. Идея методики регистрации самоподдерживающейся фотоядерной реакции по длительному электромагнитному излучению предложена в (Бордонский, 2020). Она заключается в измерениях возрастания интенсивности микроволнового излучения вблизи линий вращательного спектра молекул атмосферных газов. При выполнении определенных требований (достаточной заселенности верхних уровней энергии молекул, геометрии возбужденной области) в среде может возникнуть интенсивное излучение по механизму сверхизлучения (Меньшиков, 1999). В случае самофокусировки и просветления среды излучение может распространяться на значительные расстояния. В настоящей работе представлена реализация возможного варианта такой методики и осуществлен поиск микроволнового свечения грозовой атмосферы на линии вращательного спектра водяного пара.

МЕТОДИКА

Еще в 1981 г. П.Л. Капица высказал гипотезу о существовании мощного микроволнового излучения дециметрового диапазона в грозовой атмосфере (Капица, 1981). Такое излучение могло бы порождать светящиеся объекты – шаровые молнии. Однако проведенные исследования не выявили существования достаточно мощных излучений в этом диапазоне длин волн. Тем не менее мощные излучения не искали на значительно более коротких длинах волн в узких спектральных интервалах. Такие длины волн могут соответствовать линиям вращательного спектра атмосферных газов, в среде которых, например, происходят фотоядерные реакции с выделением энергии. Наиболее длинноволновые линии распространенных молекул газовых сред соответствуют гидроксиду 18 см (частота ~1.65 ГГц), водяному пару 1.35 см (частота 22.2 ГГц) и кислороду ~5 мм (полоса в области 60 ГГц). Если мощное излучение генерируется активными областями атмосферы, насыщенной водой, то линия водяного пара в тропосфере может наблюдаться на больших расстояниях от источника. Это связано не только с меньшим значением погонного затухания

на большей длине волны, но и с различием концентрации двух веществ по трассе распространения сигнала. Особенность заключается в том, что вне грозовой облачности концентрация водяного пара в единице объема существенно ниже. Погонное затухание на частоте 22.2 ГГц в стандартной атмосфере при влажности 7.5 г/м^3 относительно невелико и составляет значение $\sim 0.1 \text{ дБ/км}$ (www.itu.int, 2019). В случае линии кислорода на частоте 60 ГГц затухание составляет $\sim 10 \text{ дБ/км}$.

В эксперименте для регистрации интенсивности излучения при грозе использованы радиометры на частоты 22.2 и 13 ГГц в полосе частот 0.6 и 0.8 ГГц соответственно. Измерение на 13 ГГц использовано для оценки состояния облачности. Чувствительность радиометров при постоянной времени 0.1 с – 0.1 К (для 22.2 ГГц) и 0.3 К (для 13 ГГц). Ширина диаграмм направленности антенн $\sim 20^\circ$. В качестве приемника гамма-излучения использовали дозиметр ДРГЗ-02, регистрирующий рентгеновские и гамма-фотоны с энергией до 3 МэВ, имеющий постоянную времени отклика $\sim 1 \text{ с}$. Основа дозиметра сцинтилляционный счетчик с фотоэлектронным умножителем и изотропной пространственной характеристикой детектора излучения. Кроме того, для регистрации молниевых разрядов использовали низкочастотный приемник электромагнитного излучения (на частоты 300–400 кГц) с амплитудным детектором и постоянной времени 0.5 с. Запись сигналов производили при помощи системы сбора информации с интервалом времени 0.17 с. Схема измерительной установки по предлагаемой методике представлена на рис. 1.

Установка для исследования размещалась в здании ИПРЭК СО РАН в г. Чита, на высоте 650 м над

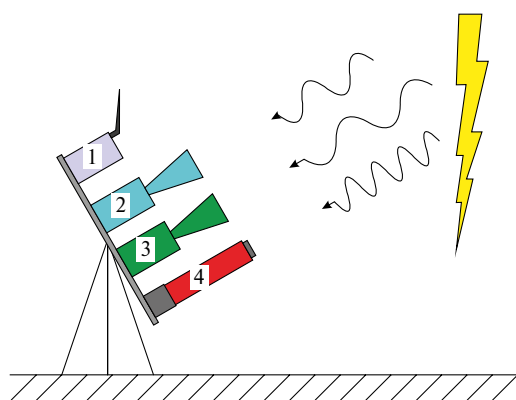


Рис. 1. Схема установки для регистрации предполагаемого электромагнитного излучения, при фотоядерных реакциях. 1 – низкочастотный регистратор молниевых разрядов; 2, 3 – микроволновые радиометры; 4 – гамма-дозиметр.

уровнем моря. Оси антенн радиометров ориентировали в юго-восточном направлении под углом 30° к горизонту. Измерения были выполнены в летнее время с июня по сентябрь 2022 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

За четыре с лишним месяца наблюдений зарегистрировано большое число гамма-вспышек с интенсивностью превышающей 10σ (σ – стандартное отклонение интенсивности фонового излучения). Из них – два эпизода длительного, порядка нескольких минут, возрастания микроволнового излучения на длине волны 1.35 см, сопровождающиеся мощной гамма-вспышкой. Гамма-свечения в эксперименте не наблюдали.

4 августа около 0h30m по местному времени возникла вспышка гамма-излучения, превышающая фоновое излучение, как минимум в 150 раз, что вызвало перегрузку и заклинивание электронного тракта дозиметра и системы регистрации сигналов на время 2 с. При этом наблюдали особенность – возрастание микроволнового излучения на длине волны 1.35 см с максимумом в момент вспышки гамма-излучения с последующим его уменьшением – рис. 2а, б. Выделение возрастания микроволнового излучения на 1.35 см на фоне изменения собственного радиотеплового излучения облаков (рис. 2б) выполнено из сравнения с изменением излучения на волне 2.3 см.

Как следует из полученных данных, экстремум микроволнового излучения совпал с импульсом гамма-излучения в пределах ошибки измерений 0.2 с – рис. 2б. Время свечения в микроволновом диапазоне приблизительно 40 с. Кроме того, после первого эпизода свечения наблюдали второе возрастание микроволнового излучения на время $\sim 3 \text{ мин}$. При втором возрастании микроволнового излучения повышение гамма-излучения не было зарегистрировано.

На рис. 3а, б, в приведены результаты измерений ночью 3 августа 2022 г. Для более четкого выделения изменений на графиках для микроволновых данных выполнено усреднение по 10 точкам. В этом эпизоде перегрузки гамма дозиметра не наблюдали и зарегистрированная интенсивность гамма-вспышки превышала фоновое значение в 4 раза (рис. 3а). Учитывая, что ожидаемая длительность вспышки порядка 0.1 мс, а время отклика дозиметра $\sim 1 \text{ с}$, истинное значение интенсивности гамма-излучения может быть на три-четыре порядка выше.

На рис. 3б приведены результаты измерений на длине волны 2.3 см, показывающие изменение собственного радиотеплового излучения облака.

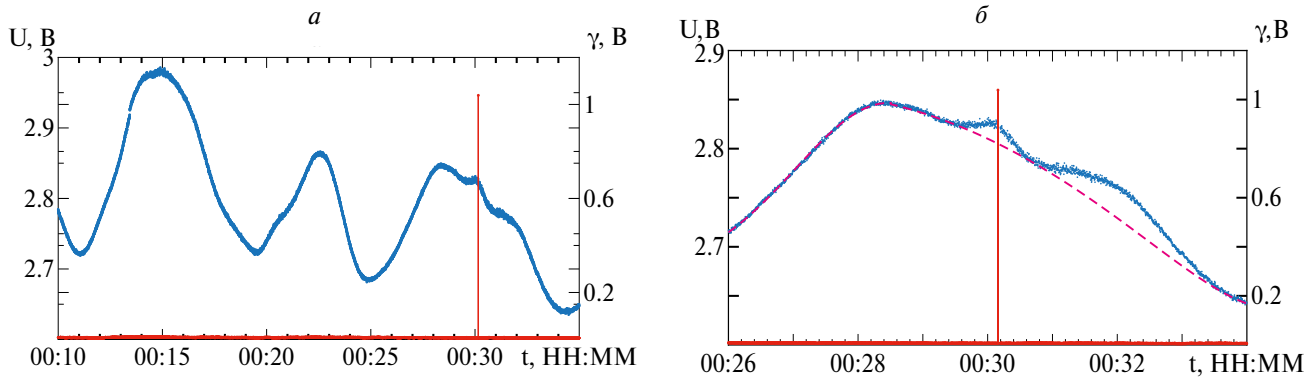


Рис. 2. *a* — запись интенсивности микроволнового излучения и импульса гамма-излучения (в единицах напряжения на выходе приборов) в ночь с 3 на 4 августа 2022 в г. Чита, *б* — график для выделенного участка с мощным гамма-излучением (γ).

На основании этих данных на рис. 3*a* проведена штриховая линия тренда, определяемая только радиотепловым излучением в случае, если отсутствует возбуждение газа на спектральной линии при неравновесном процессе.

Для определения особенностей излучения в грозном облаке на рис. 3*б* представлена разность значений интенсивности излучения на 1.35 см и на линии тренда (по результатам, представленным на рис. 3*a*). По полученным данным длительность первой фазы микроволнового свечения на волне 1.35 см составляла 4 минуты (рис. 3*a*). Максимум первой фазы повышения микроволнового излучения совпал с гамма-вспышкой. Так же, как и для свечения, представленного на рис. 2, обнаружено второе возрастание микроволнового излучения с длительностью ~3 минут без повышения интенсивности гамма-излучения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненные исследования по поиску длительных микроволновых свечений на линии вращательного спектра водяного пара 1.35 см подтвердили его существование на время порядка минуты в грозной атмосфере. При этом свечение достигало максимума с возникновением гамма-вспышки, после которой наблюдали падение интенсивности микроволнового излучения с последующим его возрастанием, но без гамма-излучения, превышающего фоновое. Повторное возрастание активности среды в виде микроволнового свечения можно объяснить восстановлением электризации активной области с меньшим значением напряженности электрического поля в ней. Одно из предположений о характере обнаруженного эффекта можно связать с восстановлением значительной электризации, которая

создает активную среду для микроволнового излучения и возникновения механизма сверхизлучения (Меньшиков, 1999). Такое излучение может распространяться широкими пучками в направлении большей протяженности области возбужденной газовой среды и, при высокой интенсивности, самофокусироваться. В случае, если электрическое поле превышает пороговое значение ~0.3 МВ/м, может возникать лавина убегающих электронов с релятивистской обратной связью и появляться область с самоподдерживающейся фотоядерной реакцией. Такая ситуация будет проявляться относительно длительным гамма-свечением. В этом случае можно ожидать появление мощных пучков микроволнового излучения.

В наших измерениях гамма-свечение не было обнаружено. Возможно, это связано с влиянием затухания при уменьшении мощности гамма-излучения из-за смещения активной области облака при ветре и вариациям направленности излучения (в отличие от микроволнового излучения). Кроме того, в выполненном эксперименте было зарегистрировано малое число наблюдений аномалий в районе проведения эксперимента на одном пункте, что не позволило накопить статистику событий. К примеру, в статье (Wada, 2021) сообщалось, что за 4 года наблюдений в Японии на 10 наземных мониторах в области с активной зимней грозовой деятельностью и низкой облачностью было зарегистрировано 70 длительных свечений в гамма-диапазоне. Использовали чувствительные детекторы с размерами кристаллов $30 \times 5 \times 5$ см и при анализе отбирали данные с уровнем сигналов выше 5σ . При этом соответствующая вероятность регистрации гамма-свечения составляла приблизительно два события, длительностью порядка одной минуты, на детектор за сезон измерений.

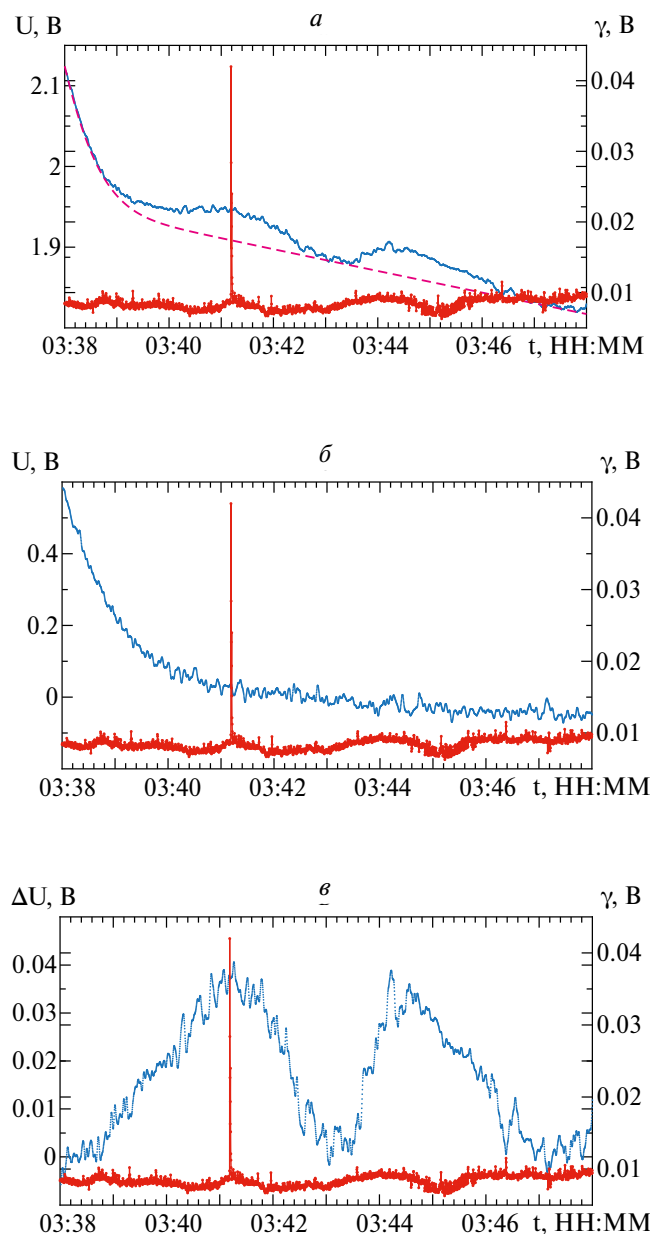


Рис. 3. Запись интенсивности микроволнового излучения и импульса гамма-излучения в ночь со 2 на 3 августа 2022 в г. Чита: *a* — для длины волны 1.35 см; *b* — для длины волны 2.3 см; *v* — приращение сигнала на 1.35 см, вызванное высокоэнергетическими событиями в атмосфере (в единицах напряжения на выходе радиометра).

В наших измерениях было зарегистрировано 2 проявления длительных микроволновых свечений около нескольких минут при уровнях их регистрации $>30\sigma$, сопровождавшихся интенсивными гамма-вспышками. Интересно отметить, что, согласно обзору в (Wada, 2021), гамма-свечение сопровождается сильные электрические поля внутри грозных об-

лаков и не связано непосредственно с молниевыми разрядами. Они также часто гасятся близлежащими разрядами, так как токи молнии могут уменьшить электрические поля. Эти выводы согласуются с нашими результатами.

Также ранее было показано, что низкоэнергетическая часть TGE обусловлена эманацией радона (Rn^{222}) из горных пород, которая в конечном итоге создает гамма-свечение грозных облаков (Bogomolov et al., 2019). В любом случае, предварительные данные дают основание считать, что предлагаемая методика может существенно расширить круг регистрируемых явлений, если понизить порог уверенной регистрации для нетеплового микроволнового излучения, например, до значения 5σ . Для этого следует улучшить выделение сигнала на линии 22.2 ГГц на фоне вариаций радиотеплового излучения атмосферы при изменении характеристик аэрозоля облака. Это можно сделать, например, путем измерений в центре линии и на максимально близком отдалении от него, где сверхизлучение не возникает, с последующим вычислением разности двух сигналов.

Для получения более полной информации можно дополнительно проводить измерения на сильной линии водяного пара на частоте 183.3 ГГц, а также линии гидроксидов и других возможных линиях вращательного спектра, появляющихся при ионизации газов и возникновении ионных комплексов (озона и других).

В плане развития методик измерений представляет значительный интерес установка аппаратуры высоко в горах или на ИСЗ, что существенно расширит горизонт обзора как нижней тропосферы, так и более высоких областей атмосферы. В случае установки аппаратуры на ИСЗ при углах наблюдения около 45 градусов для излучения на частотах вблизи 22 ГГц ожидаемые дополнительные потери по трассе распространения сигнала могут иметь значение не более 10 децибел. В случае положения излучателя в верхней тропосфере регистрация источника более благоприятна. Микроволновые измерения можно использовать и для дистанционных исследований электрической активности грозных планетных атмосфер в случае возникновения в них лавин убегающих электронов.

Исследование кратковременных и продолжительных от секунд до десятков минут излучений высокой мощности представляет как научный интерес, так и практическое значение при разработке более эффективных мероприятий по грозозащите промышленных объектов и разнообразных технических систем (связи, навигации, передачи энергии, транспорта). Их регистрация из космоса позволит более оперативно решать вопросы безо-

пасности природных и технических объектов и эксплуатации инженерных сооружений.

ВЫВОДЫ

1. Измерения микроволнового излучения грозовой атмосферы на длине волны 1.35 см за летний период в г. Чита выявили несколько эпизодов повышения радиояркости на время порядка нескольких минут, которые можно связать с возникновением повышенной электризации облаков. Повышенная электризация проявилась в виде всплеск гамма-излучения (и молниевых разрядов), которые обычно связывают с появлением ускоренных лавин убегающих электронов.

2. Эпизоды наблюдения длительного микроволнового свечения и их совпадения с интенсивными гамма-всплесками указывают на возможную связь наблюдавшегося эффекта с возникновением самоподдерживающихся фотоядерных реакций.

3. Предварительное исследование показало перспективность выполнения измерений длительного микроволнового свечения по предлагаемой методике, например, при наблюдениях на нескольких линиях вращательного спектра молекул (H_2O , O_2 , OH). Установка аппаратуры на ИСЗ для регистрации оптических, рентгеновских и гамма-излучений, включающей микроволновые радиометры, позволит эффективно исследовать высокоэнергетические события также и в нижней тропосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова В. П., Вильданова Л. И., Гуревич А. В., Зыбин К. П., Караштин А. Н., Крюков С. В., Рябов В. А., и др. Изучение взаимосвязи процессов в грозовой атмосфере с высокоэнергичными космическими лучами на Тянь-Шанском экспериментальном комплексе “Гроза” // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 109–114.
- Бабиц Л. П. Грозовые нейтроны // УФН. 2019. Т. 189. № 10. С. 1044–1069. DOI: 10.3367/UFNr.2018.12.038501.
- Бордонский Г. С. Возможные механизмы аномальных электромагнитных излучений атмосферы Земли, вызванные космическими лучами // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 63–73. DOI: 10.31857/S020596142004003X.
- Гуревич А. В., Зыбин К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН. 2001. Т. 171. № 11. С. 1177–1199. DOI: 10.3367/UFNr.0171.200111b.1177.
- Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие. Рекомендации МСЭ-R. 08–2019. Р. 676–12. // www.itu.int. 23.02.2022. 30 p. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-S!!PDF-R.pdf.
- Каница П. Л. О природе шаровой молнии // Эксперимент. Теория. Практика. М.: Наука, 1981. С. 64–71.
- Меньшиков Л. И. Сверхизлучение и некоторые родственные явления // УФН. 1999. Т. 169. № 2. С. 113–154. DOI: 10.3367/UFNr.0169.199902a.0113.
- Bogomolov V. V., Iyudin A. F., Maximov I. A., Panasyuk M. I., Svertilov S. I. Comment on “Long lasting low energy thunderstorm ground enhancements and possible Rn-222 daughter isotopes contamination” // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. № 10. P. 108101. DOI: 10.1103/PhysRevD.99.108101.
- Dwyer J. R., Smith D. M., Cummer S. A. High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena // Space Sci. Rev. 2012. V. 173. № 1–4. P. 133–196. DOI: 10.1007/s11214-012-9894-0.
- Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Okuda K., Makishima K., et al. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge // Nature. 2017. V. 551. № 7681. P. 481–484. DOI: 10.1038/nature24630.
- Neubert T., Ostgaard N., Reglero V., Blanc E., Chanrion O., Oxborrow C. A., Orr A., et al. The ASIM Mission on the International space station // Space Sci. Rev. 2019. P. 215–226. DOI: 10.1007/s11214-019-0592-z.
- Wada Y., Matsumoto T., Enoto T., Nakazawa K., Yuasa T., Furuta Y., Yonetoku D., et al. Catalog of gamma-ray glows during four winter seasons in Japan // Phys. Rev. Research. 2021. V. 3. № 4. P. 043117. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.043117.
- Wada Y., Enoto T., Nakamura Y., Furuta Y., Yuasa T., Nakazawa K., Morimoto T., et al. Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash // Commun. Phys. 2019. V. 2. P. 67. DOI: 10.1038/s42005-019-0168-y.

Preliminary Results of Searches for Long-Term Microwave Radiation of a Thunderstorm Atmosphere at a Wavelength of 1.35 cm

G. S. Bordonskiy¹, A. A. Gurulev¹, A. O. Orlov¹

¹*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia*

Measurement of non-thermal radiation is currently one of the directions of remote sensing of the Earth. Powerful electromagnetic radiation of the atmosphere, initiated by cosmic rays, in the range from low frequencies to the gamma range, has recently been discovered here. Of particular interest is the study of such radiation in the microwave range, where the technique of aerospace research is well developed. This paper presents the results of joint measurements of microwave and gamma radiation of the atmosphere during thunderstorms in the summer of 2022 in Transbaikalia. The aim of the study was to search for relatively long (up to several minutes) electromagnetic radiation near the frequency of 22.2 GHz on the line of the rotational spectrum of water vapor molecules. It was assumed that such a feature could arise due to the appearance of avalanches of escaping

electrons generated by cosmic rays. In this process, in addition to the braking gamma radiation, the gas medium is excited, which can cause its superradiance in the microwave range. In the case of strong electrification in fields with a voltage above 0.284 MV/m, a unique phenomenon may occur - a self-sustaining photonuclear reaction in the lower atmosphere in thunderclouds. In this process, the electromagnetic glow can last from units to tens of minutes. In the performed study, several episodes of increasing radiation intensity in the microwave range were detected, accompanied by gamma-ray pulses in a thunderstorm atmosphere. The glow detected in the experiment can be explained by local electrical discharges with increasing electrification of clouds. Another explanation is the occurrence of a self-sustaining photonuclear reaction that creates a large volume of excited gas. The ways of improving the microwave measurement technique for recording high-energy phenomena in the lower atmosphere at a great distance from the measuring equipment, where gamma rays are not recorded, using the satellite are discussed.

Keywords: atmospheric electrification, microwave radiation, water vapor, photonuclear reactions, remote sensing

REFERENCES

- Antonova V. P., Vildanova L. I., Gurevich A. V., Zybin K. P., Karash-tin A. N., Kryukov S. V., Ryabov V. A., et al.* Izucheniye vzaimosvyazi processov v grozovoy atmosfere s vysokoenergichnymi kosmicheskimi luchami na Tyan'-Shan'skom eksperimental'nom komplekse "Groza" [Studying the relationship of processes in a thunderstorm atmosphere with high-energy cosmic rays at the Tien Shan Experimental Complex "Groza"] // *Journal of Technical Physics*. 2007. Vol. 77. Issue 11. P. 109–114. (In Russian).
- Attenuation by atmospheric gases and related effects. Recommendation ITU-R P. 676–12 (08/2019) // www.itu.int. 23.02.2022. 31 p. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-S!!PDF-E.pdf.
- Babich L. P.* Grozovye neitrony [Thunderstorm neutrons] // *UFN*. 2019. V. 189. № 10. P. 1044–1069. (In Russian). DOI: 10.3367/UFNr.2018.12.038501.
- Bogomolov V. V., Iyudin A. F., Maximov I. A., Panasyuk M. I., Svertilov S. I.* Comment on "Long lasting low energy thunderstorm ground enhancements and possible Rn-222 daughter isotopes contamination" // *Phys. Rev. D*. 2019. V. 99. № 10. P. 108101. DOI: 10.1103/PhysRevD.99.108101.
- Bordonskiy G. S.* Vozmozhnye mekhanizmy anomal'nykh elektromagnitnykh izlucheniye atmosfery Zemli, vyzvannye kosmicheskimi luchami [Possible Mechanisms of Anomalous Electromagnetic Radiation in the Earth's Atmosphere] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2020. № 4. P. 63–73. (In Russian). DOI: 10.31857/S020596142004003X.
- Dwyer J. R., Smith D. M., Cummer S. A.* High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 173. № 1–4. P. 133–196. DOI: 10.1007/s11214-012-9894-0.
- Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Okuda K., Makishima K., et al.* Photonuclear reactions triggered by lightning discharge // *Nature*. 2017. V. 551. № 7681. P. 481–484. DOI: 10.1038/nature24630.
- Neubert T., Ostgaard N., Reglero V., Blanc E., Chanrion O., Oxborrow C. A., Orr A., et al.* The ASIM Mission on the International space station // *Space Sci. Rev.* 2019. P. 215–226. DOI: 10.1007/s11214-019-0592-z.
- Gurevich A. V., Zybin K. P.* Proboi na ubegayushchikh elektronakh i elektricheskie razryady vo vremya grozy [Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms] // *UFN*. 2001. V. 171. № 11. P. 1177–1199. (In Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0171.200111b.1177.
- Kapitsa P. L.* O prirode sharovoi molnii [On the nature of ball lightning] // *Eksperiment. Teoriya. Praktika*. Moscow: Nauka, 1981. P. 64–71. (In Russian).
- Men'shikov L. I.* Sverkhizlucheniye i nekotorye rodstvennyye yavleniya [Superradiance and related phenomena] // *UFN*. 1999. V. 169. № 2. P. 113–154. (In Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0169.199902a.0113.
- Wada Y., Enoto T., Nakamura Y., Furuta Y., Yuasa T., Nakazawa K., Morimoto T., et al.* Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash // *Commun. Phys.* 2019. V. 2. P. 67. DOI: 10.1038/s42005-019-0168-y.
- Wada Y., Matsumoto T., Enoto T., Nakazawa K., Yuasa T., Furuta Y., Yonetoku D., et al.* Catalog of gamma-ray glows during four winter seasons in Japan // *Phys. Rev. Research*. 2021. V. 3. № 4. P. 043117. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.043117.

ПЕРВЫЕ РОССИЙСКИЕ НАУЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2024 г. Л. А. Ведешин¹ *, Д. А. Шаповалов², Л. Г. Евстратова²

¹ФГБОУ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²ФГБОУ Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

*E-mail: vedeshin40@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2023 г.

Информация, получаемая со спутников ДЗЗ в течение многих лет, успешно используется в различных хозяйственных отраслях Российской Федерации. Однако бывают случаи, когда невозможно оперативно получить спутниковые данные наблюдений за состоянием природно-техногенной среды различных районов страны (наличие облачного покрова Земли, непрохождение орбит космических аппаратов в заданном районе в указанное время съемки, различное пространственное разрешение аппаратуры и др.). В этом случае у заказчиков космической съемки возникает необходимость получения подспутниковой информационной продукции в том виде, с которым имеют дело конкретные пользователи (например, состояние и объем биомассы лесных, сельскохозяйственных, экологических экосистем и др. в момент съемки). Поэтому для подспутниковых оперативных наблюдений потребовалось создание системы локального мониторинга на базе малой авиации: беспилотных летательных аппаратов с минимальным набором различной бортовой аппаратуры (черно-белых и цветных панорамных фотокамер, ИК-радиометров, радаров, лазеров и др.) в зависимости от поставленной задачи.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты, мониторинг почв и посевов, древесно-кустарниковая растительность, вегетационные индексы

DOI: 10.31857/S0205961424010081, **EDN:** GMJGCSY

ВВЕДЕНИЕ

Первые беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в основном представляли собой летательные аппараты самолетного типа. Электроника для них в те годы была достаточно дорогой и громоздкой, поэтому создание, обслуживание и использование БПЛА могли себе позволить только крупные промышленные и хозяйственные организации. В связи с появлением доступных и достаточно быстродействующих микропроцессоров и миниатюрных датчиков были разработаны первые проекты недорогих управляемых БПЛА. Вначале эти аппараты были аэродинамически неустойчивыми и требовали постоянной электронной стабилизации в полете. Совершенствование этих аппаратов, в свою очередь, стимулировало создание полетных контроллеров, и к началу 2010-х годов произошло массовое распространение БПЛА среди рядовых потребителей, что привело к их широкому применению в научной и гражданской сфере.

Развитие на рубеже 1990-х годов систем связи и навигации и в первую очередь приемников системы глобального позиционирования (ГЛОНАСС и GPS) вывели БПЛА на новый уровень популяр-

ности. Они стали успешно использоваться в различных физико-географических исследованиях в качестве платформы наблюдения, целеуказания и различных видов съемки, в том числе для получения текущей картографической информации с возможностью ее постоянного обновления.

Ряд важных преимуществ БПЛА перед пилотируемой авиацией привел к более активному развитию этой отрасли как в России, так и в мире, особенно за счет относительно небольшой стоимости, малых затрат на их эксплуатацию, возможности выполнять маневры с перегрузками, превышающими физические возможности человека. В последние годы научные и хозяйственные организации стали широко использовать различные по конструкции и весу типы БПЛА. Они применяются в географических, океанографических, экологических, биологических, сельскохозяйственных и др. научно-методических исследованиях, которые в настоящее время находятся в стадии развития, тестирования и внедрения в различные хозяйственные отрасли. В инженерно-производственной сфере БПЛА также закрепились как эффективный и широко применяемый инструмент (Григорьев, 2022; Шаповалов и др., 2021).

ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ БПЛА

В физико-географических исследованиях существует множество сфер применения данных, получаемых с помощью БПЛА: в первую очередь, это фотографирование и видеосъемка, в биогеографических исследованиях изучается почвенно-растительный покров и почвенная эрозия, проводятся гидрологических изыскания, лесопатологические и лесотаксационные наблюдения. Кроме того, надо отметить выполнение с помощью БПЛА кадастровых и картографо-геодезических работ. Многие из вышеперечисленных видов работ проводятся в Удмуртском государственном университете с помощью БПЛА (DJI Phantom 3). Варианты использования данных после обработки в фотограмметрических программах довольно многочисленны. Например, ортофотоплан может использоваться для межевания, инвентаризации и кадастровой оценки земельных участков, оценки эффективности использования земельных ресурсов, проектирования развития территорий мониторинга земель с целью охраны, экологического мониторинга границ и площадей земель, подверженных изменению, создания трехмерных моделей местности для ГИС (Григорьев, 2022).

Российской академией наук в 2015 г. была принята Программа фундаментальных исследований Президиума РАН по приоритетным направлениям науки (Программа). Среди направлений этой Программы важное место занимает разработка методов цифровой дистанционной инвентаризации и мониторинга земель в агропромышленном комплексе и лесном хозяйстве РФ. В реализации вышеназванной Программы принимают участие научные учреждения РАН, Росгидромета, Роскартографии и ряда других министерств и ведомств РФ.

Для проведения фундаментальных научных исследований по Программе наряду со спутниковыми наблюдениями впервые используются БПЛА. Современный уровень технического развития позволяет рассматривать БПЛА в качестве надежного средства оперативного мониторинга почв и посевов на отдельных полях небольших хозяйств. Возможности использования изображений, полученных с помощью БПЛА, в значительной степени зависят от типа съемочной аппаратуры. Она позволяет получать изображения, по своим свойствам сопоставимые со спутниковыми данными (спектральное и пространственное разрешение). Изображения, получаемые с БПЛА, используются учеными и специалистами при проведении научно-методических исследований, чтобы визуально удаленно оценить каждый объект наблюдений.

Еще одним важным направлением использования данных БПЛА в сельском хозяйстве являет-

ся мониторинг состояния посевов. Высокое пространственное разрешение данных и возможность съемки в заданное время позволяют оценивать состояние посевов (засоренность, разреженность, повреждение вредителями и болезнями, состояние после перезимовки, стадии фенологического развития и т.п.). После географической привязки изображений возможно проведение точной количественной оценки пострадавших посевов и географии их повреждений. Эта информация может быть полезна как для землепользователей, так и для страховых компаний (Златопольский, Яровой, 2020; Шаповалов и др., 2021).

Большое внимание в Программе уделяется процессам совместной обработки информации, получаемой со спутников и БПЛА. Ниже представлен обзор некоторых опубликованных научно-методических работ по Программе в области сельского и лесного хозяйства.

Учеными Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) разработана методика автоматизации определения густоты сельскохозяйственных растений, т.к. до настоящего времени подсчет густоты растений проводился вручную. Знание густоты всходов свеклы необходимо для оценки качества проведенных работ, прогнозирования объема уборки и для того, чтобы избежать излишних затрат при плохих всходах. Разработанная методика предусматривает автоматическое выявление на фотографии поля отдельных растений и подсчет их числа. Для этого участки поля сахарной свеклы вскоре после появления всходов фотографировались с БПЛА (модель Mavic 2 Pro компании DJI (объектив 28 мм (эквивалент формата 35 мм), разрешение 5472 × 3648 (20 MPx)) (<https://www.dji.com/ru/mavic-2/info#specs>) с высоты около 30 м для разработки алгоритма анализа изображения, включающего анализ цвета, пространственную фильтрацию и морфологический анализ. Этот алгоритм позволит делать оценку числа растений с хорошей точностью. Реальное разрешение снимка оценивалось, исходя из расстояния между рядками, которое выдерживается посевной техникой очень точно (Златопольский, Яровой, 2020).

Для повышения эффективности технологий, применяемых при возделывании сельскохозяйственных культур (нормы и сроки внесения удобрений, степень засоренности посевов и т.д.), важно учитывать внутривидовую изменчивость плодородия. Чем выше степень внутривидовой изменчивости, тем целесообразнее применять дифференцированный подход к выращиванию культур на определенном сельскохозяйственном поле.

Коллективом специалистов Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ) (Санкт-Петербург) осуществлена программная ре-

ализация базового алгоритма обнаружения и выделения границ внутривидовой изменчивости по аэрофотоснимкам с БПЛА, космическим снимкам и оптическим критериям посевов, а также его апробация в специализированных полевых исследованиях (Якушев и др., 2022). Исследование базового алгоритма проводилось на посевах яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья. Растения выращивали на поле Меньковского филиала АФИ (Ленинградская обл., Гатчинский район) в 2022 г. Во время основных фаз развития яровой пшеницы (кущение, выход в трубку, колошение, цветение) проводили фотосъемку посевов с БПЛА Matrice 600 Pro (DJI). Цифровые изображения были получены с высоты 80 м гиперспектральной камерой Pika-L (Resoson) в диапазоне от 400 до 1000 нм. Пространственное разрешение изображений – 3 см/пиксель, а спектральное разрешение – 2.14 нм. При обработке оптических характеристик посевов были рассчитаны вегетационные индексы: нормализованный разностный вегетационный индекс (англ. Normalized Difference Vegetation Index NDVI) и индексы отражения, характеризующие активность фотосинтетического аппарата, а именно содержание хлорофилла (англ. Chlorophyll Reflection Index – ChlRI), фотохимическую активность фотосинтетического аппарата (англ. Photochemical Reflectance Index – PRI), содержание воды (англ. Water Ratio Index – WRI), антоцианов (англ. Anthocyanins Reflection Index – ARI) и флавоноидов (англ. Flavonoids Reflectance Index – FRI). Вычисленные индексы применялись для дистанционной оценки физиологического состояния пшеницы и выявления участков посева, в которых сложился дефицит азотного питания при формировании сомкнутого растительного покрова. Их комплексное применение повышает надежность оценки потребности растений в удобрении за счет анализа неспецифических и специфических изменений оптических характеристик растений, возникающих при дефиците азота и воды. В частности, для яровой пшеницы сорта Дарья в фазу кущения определены зоны оптимального развития посева (вносить удобрения не нужно), зоны, требующие подкормки азотными удобрениями в дозе 50% от оптимальной дозы, и зоны, в которых посевы испытывают недостаток влаги и внесение удобрений нецелесообразно (Якушев и др., 2022).

Основной проблемой использования подобных данных для компьютерного анализа рельефа является то, что съемка с БПЛА позволяет получать цифровую модель местности (ЦММ), а не рельефа. Поэтому отражение на этой модели всех объектов наземного покрова (деревьев, зданий, насыпей и т.п.) затрудняет расчеты углов наклона и экспозиции склонов. В настоящий момент недостаточно проработаны методы очистки данных от влияния подобных объектов для перехода к цифровой модели

рельефа (ЦМР). Необходимо отметить, что подобная проблема не может возникнуть при получении данных о рельефе отдельных полей с посевами однолетних сельскохозяйственных культур или луговой растительности. Лишь по краям пахотного поля информация о рельефе может быть искажена из-за влияния близкой к полю естественной растительности или стоящих близко строений. Поэтому возможно построение ЦМР для отдельных полей. Теоретически, по сравнению с обычной геодезической съемкой, использование данных БПЛА должно сильно сократить затратность и трудоемкость работ.

Важным этапом при этом является точная географическая привязка получаемых изображений, а также их геометрическая и тоновая коррекция. Эти операции, как правило, приводят к большим искажениям исходных изображений, и от качества их осуществления во многом зависит точность дальнейшего прикладного анализа. Информативность изображений можно значительно увеличить, используя более специализированные камеры, устанавливаемые на БПЛА. В настоящее время существуют портативные камеры, которые позволяют получать изображения в каналах съемки, идентичных отдельным каналам спутника Landsat, или получать изображения в 12 различных каналах съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Перспективным направлением использования данных БПЛА является мониторинг отдельных свойств почв, в частности их деградированности, или оценка параметров плодородия почв отдельных полей. При этом в качестве индикатора состояния и свойств почв может быть использована индикационная роль растительности на полях по аналогии со спутниковыми методами. Но наиболее перспективной является разработка подходов детектирования свойств почв по состоянию их открытой поверхности, которые ограничены отсутствием миниатюрных камер, позволяющих получать изображения в узких спектральных диапазонах. Решение этой проблемы позволит совместить использование данных аэро- и космической съемки. В настоящее время на основе данных стандартных БПЛА можно решать отдельные задачи картографирования, мониторинга почв и оценки изменения их функций. При этом преимуществом подходов, основанных на БПЛА, по сравнению со спутниковыми технологиями для работы на уровне отдельных полей является возможность получения изображений в любой день, когда поверхность почв открыта для непосредственного наблюдения для картографирования эродированных почв на опытном поле (Ведешин, Шаповалов, 2022; Златопольский, Яровой, 2020; Шаповалов и др., 2021; Якушев и др., 2022).

Специалистами Государственного университета по землеустройству и Кубанского государственного

аграрного университета в 2018 г. на полях ВНИИ риса были проведены работы, связанные с применением дистанционных методов исследований качественных показателей посева риса. Для этих целей на специально выделенных (двух равнозначных) делянках был осуществлен посев некоторых сортов риса разными моделями сеялок. Для дистанционного наблюдения за вегетацией риса использовался БПЛА DJI Phantom 4 PRO. Съемка осуществлялась с высоты 80 м как в видимом диапазоне спектра с разрешением 20 МРх, так и в ближней ИК-зоне, одновременно с наземными методами контрольных измерений высоты и количества растений для проведения дальнейшего сравнительного анализа полученных результатов дистанционного мониторинга. Для определения высоты растительного покрова дистанционными методами использовалась цифровая модель местности, построенная с точностью 2 см в плане и по высоте по материалам аэрофотосъемок с БПЛА. Высокая точность достигнута за счет использования наземных опорных точек (около 30), которые были закреплены маркировочными знаками. Координаты опорных точек определялись с помощью приемника GNSS Ascnovo GX9 с точностью 10 мм в плане и 20 мм по высоте (Труфляк и др., 2019). Продольные и поперечные профили всходов на тестируемых участках заданных направлений были получены в программной среде Global Mapper 19.1. Также при анализе были использованы результаты обработки материалов съемок в программе «КОМПАС-3D». При обработке изображений Plant Health, полученных в программе DroneDeploy для двух участков, применялся алгоритм, выполненный в Mathcad 15, с помощью которого определялось среднее значение кода плотности тона изображения в массиве и количество пикселей, находящихся в выбранном диапазоне. В результате проведенных экспериментов, на основании наземных и дистанционных исследований определено, что после посева сеялкой КЛЕН-1.5П по сравнению с СН-16 количество всходов на 53% выше при одной норме высева семян, высота растений больше на 17% (перед уборкой – на 2%), а длина метелки перед уборкой – на 6%, урожайность выше на 12 ц/га (Труфляк и др., 2019; Шаповалов и др., 2022).

Технологии ДЗЗ также широко применяются при изучении лесов, в том числе для оценки их горизонтальной и вертикальной структуры. Разработаны методы определения сомкнутости и полноты древостоев на основе оптических спутниковых данных. Вертикальная структура полога, к которой можно отнести ярусность и высоту, анализируется обычно на основе данных активного ДЗЗ с помощью радаров и лидаров. Данные о высоте лесов крайне важны для определения их биомассы и бонитета, мониторинга хода роста насаждений. Защитные лесные насаждения (ЗЛН) практически

не охвачены лесоустройством и государственной инвентаризацией лесов и, как следствие, характеризуются недостатком объективных и современных данных об их характеристиках. По этой причине оценка их состояния представляется достаточно актуальной задачей. Сомкнутость полога ЗЛН может быть определена на основе оптических данных ДЗЗ, но вопрос определения высоты защитных лесных насаждений по спутниковым данным пока проработан недостаточно.

Защитные лесные насаждения играют важную роль в предотвращении деградации агроландшафтов. Из-за достижения предельного возраста значительная часть ЗЛН пребывает в неудовлетворительном состоянии. Существующие методы оценки сомкнутости ЗЛН, часто выступающей в качестве критерия их сохранности, очень трудоемки. Они основываются на экспертном дешифрировании данных аэрокосмических съемок сверхвысокого пространственного разрешения, использовании топографических карт, планов и полевом обследовании с помощью приборов спутникового геопозиционирования.

Специалистами ИКИ РАН был выполнен анализ возможностей оценки сомкнутости и определения высоты ЗЛН на основе бисезонного индекса леса BSFI (англ. Bi-Seasonal Forest Index) по данным Sentinel 2, по данным спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 (англ. Advanced Topographic Laser Altimeter System/Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) и материалам аэрофотосъемки (АФС) с БПЛА (Шинкаренко, Барталев, 2023; Шинкаренко и др., 2023). Для проведения исследований выполнялась АФС с БПЛА DJI Mavic Air с высоты 7 м в августе и сентябре 2022 г. в Волгоградской области (общая площадь составила 262.4 га). Аэрофотоснимки получены в видимом диапазоне с продольным и поперечным перекрытием 80%. В результате фотограмметрической обработки данных с БПЛА в программе Agisoft Photoscan получены с пространственным разрешением 2.5 см/пиксель ортофотопланы, также ЦММ и ЦМР – с разрешением 10 см/пиксель. На основе разницы ЦММ и ЦМР определялась высота древесно-кустарниковой растительности (ДКР). За полог ДКР принималась растительность высотой более 1 м (Шинкаренко, Барталев, 2023).

В проекте (Шинкаренко, Барталев, 2023) был выделен полог ДКР по данным с БПЛА, после чего значения сомкнутости полога сопоставлены с данными BSFI. Установлена регрессионная зависимость BSFI и сомкнутости, коэффициент детерминации которой составил 0,86, а среднеквадратичная ошибка равна 14.5%.

Таким образом, на основе аэросъемки с БПЛА в видимом диапазоне и бисезонного индекса леса BSFI, рассчитанного по спутниковым данным

Sentinel-2 высокого пространственного разрешения, предложен достаточно точный подход определения сомкнутости защитных лесных насаждений. Использование полученных результатов на практике позволит существенно сократить объем наземных обследований ЗЛН для определения их сохранности (Шинкаренко, Барталев, 2023).

В другом проекте (Шинкаренко и др., 2023) был выполнен анализ возможностей использования информационного продукта ATL08 по данным спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 для определения высоты защитных лесных насаждений. Отметки высот, соответствующие растительности согласно лидарным данным за 2019–2022 гг., сопоставлялись с результатами обработки материалов аэро съемки с БПЛА (вышеописанных). Установлена значимая связь между средними и максимальными значениями высоты полога, определенными на основе материалов аэро съемки с БПЛА и с использованием данных лазерного сканирования в сегментах 20×14 м, при их покрытии древесно-кустарниковой растительностью более чем на 50%. Сопоставление проективного покрытия по лидарным данным, рассчитанного как отношение числа фотонов определенной ранее пороговой высоты к общему числу фотонов сегмента, и данных аэро съемки показало недостаточно высокую точность этого подхода. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования лидарных данных ATL08 для оценки высоты защитных лесных насаждений, но не для определения проективного покрытия (Шинкаренко и др., 2023).

Эксперимент по определению листовой поверхности LAI (англ. Leaf Area Index) разреженного смешанного березово-елового леса по данным MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на участке площадью $\sim 6,7$ км² был совместно выполнен в июне 2019 г. специалистами ИКИ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова и Института географии РАН. Участок был расположен на южных склонах Хибинского горного массива в центральной части Кольского п-ова (Россия). Исследования проводились в соответствии с методологией масштабирования локальных точечных измерений по данным MODIS (230 м) и Sentinel-2 MSI (англ. Multispectral Instrument) высокого разрешения (10 м). Локальные измерения параметров древесного полога были выполнены с помощью съемки с БПЛА DJI Phantom 4 Advanced и DJI Phantom 4 PRO, оснащенных цифровыми RGB-камерами (20 MPx) с высот 100, 150, 200 м (продольное и поперечное перекрытие не менее 80%). Фотограмметрическая обработка полученных изображений (пространственное разрешение 2,5 см) проводилась в специализированном программном обеспечении Agisoft Metashape Professional v. 1.5.3. В результате были построены

ЦММ, включающая древесный полог, и ЦМР. Цифровая модель древесного полога с пространственным разрешением 10 см и высотным разрешением ~ 1 см была получена как разность двух этих моделей (Шабанов и др., 2021).

Этот подход оказался эффективным в части количественной оценки пространственной вариабельности структуры растительного покрова на больших участках с использованием оценки сомкнутости крон. По данным БПЛА и изображения Sentinel NDVI на основе статистических и полуэмпирических методов была создана карта Sentinel LAI, которая рассматривалась как базовая при сравнении с продуктом ИКИ MODIS LAI (Шабанов и др., 2021).

Специалисты Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН и Томского политехнического университета провели исследования в трех регионах Западной Сибири: Томской, Кемеровской и Новосибирской областях, в которых с 2019 г. наблюдается стремительное усыхание древостоев сосны сибирской кедровой сосны *Pinus sibirica* Du Tour, вызванное новым чужеродным вредителем — союзным короедом *Ips amitinus* Eichh. Успешность мероприятий по борьбе с короедом напрямую зависит от своевременности выявления заселенных им деревьев. Выявить их можно по характерным признакам вершинного усыхания, которое малозаметно при наземном обследовании. Использование БПЛА обеспечивает высокую оперативность наблюдений и получение снимков крон деревьев со сверхвысоким пространственным разрешением. По снимкам с БПЛА начата разработка моделей глубокого обучения U-Net и их исследования при решении задачи семантической сегментации деревьев *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом. Для анализа состояния деревьев экспертами было выделено пять классов жизненного состояния *Pinus sibirica*: “условно здоровое”, “свежезаселенное”, “с усохшей вершиной”, “свежий сухостой” и “старый сухостой”. Деревья других видов и оставшиеся объекты на изображениях относились к классу “фон”. В качестве исходных данных использовались снимки с квадрокоптера DJI Phantom 3 Standard (объектив 20 мм (эквивалент формата 35 мм), разрешение 4000×3000 (12 MPx)), полученные в июле 2019 г. Съемка выполнялась с высоты 350 м, что обеспечило пространственное разрешение около 10 см и высоты 150 м, что соответствует разрешению около 3 см. Для решения задачи сегментации изображений с БПЛА был предложен ряд моделей глубокого обучения: полносверточная сеть U-Net на основе известной модели U-Net и две ее модификации — multihead-U-Net (МН-U-Net) и multihead-residual-U-Net (МН-Res-U-Net). Результаты исследований показали, что все модели успешно классифицируют пиксели пяти классов из шести: модели U-Net

и МН-Res-U-Net хорошо сегментируют все классы, кроме класса “свежезаселенное”, а модель МН-U-Net – все классы, кроме класса “свежий сухостой”. Основную сложность для сегментации представили классы промежуточного состояния деревьев. Однако МН-U-Net справляется с сегментацией промежуточного класса “свежезаселенное”, U-Net – класса “с усохшей вершиной”, а МН-Res-U-Net – класса “свежий сухостой” (Марков и др., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее десятилетие аэросъемка с БПЛА широко применяется для получения крупномасштабных ортофотопланов, карт, ЦММ, ЦМР и реалистичных трехмерных моделей, при верификации результатов спутникового мониторинга и для разработки новых и совершенствования существующих подходов при решении задач в агропромышленном комплексе, лесном хозяйстве и государственном мониторинге земель. Это вызвано многими факторами, при этом ключевыми являются: увеличение показателя продолжительности полета БПЛА; оперативностью подготовки и проведения аэрофотосъемки; разработкой мульти-спектральных сенсорных систем со встроенными глобальными навигационными и инерциальными системами; сравнительно низкой себестоимостью производства работ. Разрабатываются программные обеспечения, которые позволяют быстро обрабатывать изображения, выполнять трехмерную визуализацию, с достоверной информацией о форме, размерах и положении снимаемых объектов, а также вычислять разные индексы растительности. Многовинтовые и с фиксированным крылом БПЛА с мультиспектральными датчиками становятся все более функциональными. Чтобы получить оперативно достоверную информацию о состоянии территории, достаточно использовать установленную производителем камеру на БПЛА и проводить съемку на небольшой высоте, причем можно с углом наклона оптической оси объектива, а не в нади́р. Это позволит быстро выявить участки, которые требуют более детального исследования и разработать план мероприятий для решения проблем. На рынке есть много доступных и простых в управлении БПЛА, которые можно применять для анализа состояния урожая и распыления химических средств.

Выполненный обзор публикаций показал, наблюдается рост количества проектов, выполненных в РФ, а полученные результаты исследований по изучению природной среды свидетельствуют о перспективности применения материалов, получаемые при обработке данных с БПЛА, для информационной поддержки системы принятия управленческих решений в различных хозяйственных отраслях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ведешин Л. А., Шаповалов Д. А.* Первые научно-технические эксперименты по космическому земледелию (к 60-летию начала работ по космической съемке Земли с пилотируемых космических кораблей) // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 5. С. 99–102. DOI: 10.31857/S0205961422050086.
- Григорьев И. И.* Использование данных беспилотных летательных аппаратов в физико-географических исследованиях // Физическая география в современном мире. 14–15 апреля 2022. Ульяновск, 2022. С. 231–232. DOI: 10.33065/978-5-907216-88-4-2022-231-232.
- Шаповалов Д. А., Ключин П. В., Савинова С. В., Лепехин П. П., Ведешин Л. А. и др.* Теория и практика дистанционного зондирования Земли для агропромышленного комплекса России. М., 2021. 443 с.
- Златопольский А. А., Яровой С. А.* Автоматизированный расчет густоты растений по фотографиям с беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 155–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-155-163.
- Якушев В. П., Петрушин А. Ф., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Блохин Ю. И., Матвеев Д. А., Митрофанов Е. П.* Автоматизация процесса обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. № 19 (6). С. 151–162. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-161-162.
- Шаповалов Д. А., Дмитриева Е. Е., Калинова Е. В., Тихонов А. Д.* Интеллектуальная система проектирования рисовых оросительных систем // Цифровизация землепользования и землеустройства: тенденции и перспективы. 14 октября 2022. М., 2022. С. 10–15.
- Труфляк Е. В., Скубиев С. И., Цыбулевский В. В., Малашихин Н. В.* Дистанционный мониторинг посевов риса и алгоритм выявления неоднородностей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 110–124. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-110-124.
- Шинкаренко С. С., Барталев С. А.* Возможности оценки сомкнутости защитных лесных насаждений на основе бисезонного индекса леса и материалов съемки БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 189–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
- Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Богодухов М. А., Жарко В. О.* Оценка возможностей определения высоты и проективного покрытия защитных лесных насаждений по данным ICESat-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 174–183. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-174-183.
- Шабанов Н. В., Михайлов Н. В., Тихонов Д. Н., Тутубалина О. В., Медведев А. А., Тельнова Н. О., Барталев С. А.* Валидация оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS для редкостойных лесов Кольского полуострова с использованием материалов съемок беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 156–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-156-170.
- Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев К. А., Токарева О. С.* Модели U-Net для семантической сегментации поврежденных деревьев сосны сибирской кедровой на снимках с БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 65–77. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-65-77.

First Russian Scientific Experiments on the Natural Environment Study Using Unmanned Aerial Vehicles

L. A. Vedeshin¹, D. A. Shapovalov², L. G. Evstratova²

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

²State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

The information received from remote sensing satellites for many years has been successfully used in various economic sectors of the Russian Federation. However, there are cases when it is impossible to promptly obtain satellite observations data of the natural and man-made environment state of country various regions (the cloud cover presence of the Earth, the non-passage of spacecraft orbits in a given area at shooting specified time, different spatial resolution of the equipment, etc.). In this case, the space survey customers have a need to obtain subsatellite information products in the form that specific users are dealing with (the state and volume of forest biomass, agricultural, ecological ecosystems, etc. at the shooting time). Therefore, for subsatellite operational observations, it was necessary to create a local monitoring system based on small aircraft: unmanned aerial vehicles with various onboard equipment minimum set (black-and-white and color panoramic cameras, IR radiometers, radars, lasers, etc.) depending on the task.

Keywords: remote sensing satellites, unmanned aerial vehicles, soils and crops monitoring, woody and shrubby vegetation, vegetation indices

REFERENCES

- Vedeshin L.A., Shapovalov D.A.* Pervye nauchno-tehnicheskie ehksperimenty po kosmicheskomu zemlevedeniyu (K 60-letiyu nachala rabot po kosmicheskoi s'emke Zemli s pilotiruemymi kosmicheskimi korablami) [First scientific and technical experiments in space geography (On the occasion of the 60th anniversary of the start of work on space photography of the Earth from manned spacecraft)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2022. № 5. P. 99–102. (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961422050086.
- Grigor'ev I. I.* Ispol'zovanie dannykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov v fiziko-geograficheskikh issledovaniyakh [The use of data obtained by unmanned aerial vehicles in physical and geographical research] // *Fizicheskaya geografiya v sovremennom mire*. 14–15 April 2022. Ul'yanovsk, 2022. P. 231–232. DOI: 10.33065/978-5-907216-88-4-2022-231-232. (In Russian).
- Shapovalov D.A., Klyushin P.V., Savinova S.V., Lepekhin P.P., Vedeshin L.A.* i dr. Teoriya i praktika distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya agropromyshlennogo kompleksa Rossii [Theory and practice of the Earth remote sensing for the Russia agro-industrial complex]. M., 2021. 443 p. (In Russian).
- Zlatopol'skii A.A., Yarovoi S.A.* Avtomatizirovannyi raschet gusoty rastenii po fotografiyam s bespilotnogo letatel'nogo apparata [Automated calculation of plant density based on unmanned aerial vehicle photos] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 7. P. 155–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-155-163. (In Russian).
- Yakushev V.P., Petrushin A.F., Yakushev V.V., Blokhina S.YU., Blokhin YU.I., Matveenko D.A., Mitrofanov E.P.* Avtomatizatsiya protsessa obnaruzheniya i vydeleniya granits vnutripolevoi izmenchivosti po aehrokosmicheskim snimkam i opticheskimi kriteriyam [Automatic delineation algorithm for within-field variability zones based on aerospace images and optical criteria] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. № 19 (6). P. 151–162. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-161-162. (In Russian).
- Shapovalov D.A., Dmitrieva E.E., Kalinova E.V., Tikhonov A.D.* Intel'kual'naya sistema proektirovaniya risovykh orositel'nykh system [Intelligent design system for rice irrigation systems] // *Tsifrovizatsiya zemlepol'zovaniya i zemleustroistva: tendentsii i perspektivy*. 14 October 2022. Moskva, 2022. P. 10–15. (In Russian).
- Truflyak E.V., Skubiev S.I., Tsybulevskii V.V., Malashikhin N.V.* Distantsionnyi monitoring posevov risa i algoritm vyavleniya neodnorodnostei [Rice crops remote monitoring and heterogeneities detection algorithm] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 3. P. 110–124. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-110-124. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A.* Vozmozhnosti otsenki somknutosti zashchitnykh lesnykh nasazhdenii na osnove bisezonno indeksa lesa i materialov s'emki BPLA [Possibilities of assessing forest belts canopy closure using Sentinel-2 based Bi-Seasonal Forest Index and UAV data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023. V. 20. № 1. P. 189–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Bogodukhov M.A., Zharko V.O.* Otsenka vozmozhnostei opredeleniya vysoty i proektivnogo pokrytiya zashchitnykh lesnykh nasazhdenii po dannym ICESat-2 [Assessment of possibilities for protective forest belts canopy closure and height estimation based on ICESat-2 data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023. V. 20. № 2. P. 174–183. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-174-183. (In Russian).
- Shabanov N.V., Mikhailov N.V., Tikhonov D.N., Tutubalina O.V., Medvedev A.A., Tel'nova N.O., Bartalev S.A.* Validatsiya otsenki indeksa listovoi poverkhnosti po dannym MODIS dlya redkostoynykh lesov Kol'skogo poluostrova s ispol'zovaniem materialov s'emok bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Validation of the MODIS LAI product over sparse boreal forest of the Kola Peninsula using UAV data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. V. 18. № 2. P. 156–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-156-170. (In Russian).
- Markov N.G., Maslov K.A., Kerchev K.A., Tokareva O.S.* Modeli U-Net dlya semanticheskoi segmentatsii povrezhdennykh derev'ev sosny sibirskoi kedrovoy na snimkakh s BPLA [U-Net models for semantic segmentation of damaged Pinus sibirica trees in UAV imagery] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. V. 19. № 1. P. 65–77. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-65-77. (In Russian).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала “Исследование Земли из космоса” РАН находится по адресу 119991 Москва, Ленинский пр-т, 14, Российская академия наук, e-mail: izk.journal1980@gmail.com; сайт: <http://www.jizk.ru/>. Редколлегия журнала просит авторов при направлении статей в печать руководствоваться изложенными ниже правилами.

Представление рукописей. В журнале публикуются только научные оригинальные исследования, обзоры, хроника, рецензии и краткие сообщения по всем актуальным вопросам дистанционного зондирования Земли.

Все работы, подготовленные отечественными или зарубежными авторами для опубликования в журнале “Исследование Земли из космоса” РАН, следует направлять на электронный адрес редакции: izk.journal1980@gmail.com.

Каждая статья должна быть подписана всеми авторами на ее последней странице. Необходимо также сообщить фамилию, имя и отчество автора, ответственного за связь с редакцией, номер его телефона (служебного/мобильного/домашнего), адрес его электронной почты (на него впоследствии будут высланы корректура статьи, а затем и оттиски в PDF-файлах).

Рукопись статьи следует сопровождать направлением от учреждения и экспертным заключением (актом экспертизы). Направляя статью в редакцию, авторы тем самым передают учредителю и издателю (федеральному государственному бюджетному учреждению “Российская академия наук”) право на ее публикацию, сохраняя при этом за собой все остальные права собственности, в связи с чем им необходимо приложить к своей работе Лицензионный договор. Бланк Лицензионного договора можно скачать на сайте (<http://www.ras.ru/publishingactivity/niso.aspx>).

Электронную версию статьи в редакцию следует представлять в двух форматах — MS Word и PDF — для более быстрого проведения ее рецензирования.

Общие требования. Полный объем статьи не должен превышать 22 стр. (он может быть увеличен лишь в исключительных случаях по специальному решению редколлегии), обзора — 30 стр., кратких сообщений, рецензий, информации и писем в редакцию — 7–10 стр.

Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и изложен с предельной краткостью,

совместимой с ясностью изложения, — для четкого представления о задачах исследования, методике и полученных результатах. Аннотация (на русском и английском языках) должна содержать основные результаты исследований, приводимых на страницах рукописи, а не перечень вопросов, рассматриваемых в ней.

В статье следует избегать терминов и сокращений, употребляемых лишь узкой группой специалистов, или приводить их расшифровку при первом упоминании в тексте. Вместе с тем часто употребляемые термины, состоящие из двух и более слов, следует сокращать до аббревиатур.

Не допускается перегрузка статей формулами, дублированием результатов в таблицах и рисунках. Буквенные обозначения и набранные формулы должны быть четкими и ясными. Следует избегать смешанного употребления русских и латинских индексов в одной статье. Подстрочные примечания допускаются только для очень кратких фактических справок и в минимальном количестве.

Рекомендуется разбивать материал статьи на разделы, начиная его с введения, излагающего постановку задачи, и заканчивая заключением с перечнем основных результатов работы (нумерации разделов следует избегать). В конце текста статьи приводится список используемой литературы.

Оформление рукописей. Оригинал статьи должен быть набран стандартным (12 pt) шрифтом гарнитуры Times New Roman. С левой стороны страницы, сверху и снизу следует оставлять поля 2.5 см, справа — 1 см. Страницы рукописи должны быть пронумерованы по отдельности (номер ставится сверху страницы от центра, первая страница учитывается, но номер на ней не ставится).

Аннотации с ключевыми словами под ними приводятся в начале (русский яз.) и в конце (английский яз.) статьи, таблицы, рисунки и подрисуночные подписи к ним должны быть введены в основной текст на местах, которые авторы считают необходимыми при ссылке на них. Дополнительно рисунки следует вложить отдельными файлами.

На первой странице рукописи в следующем порядке размещаются: заголовки статьи; © год; инициалы и фамилии всех авторов (через запятую); полное название учреждения (или учреждений), в котором выполнялась работа, с указанием города, в котором оно находится; адрес электронной почты одного из авторов (около адреса, как и возле фа-

мии автора, ставится звездочка) для переписки с ним; краткая аннотация на русском языке с ключевыми словами к ней (не рекомендуется вводить в текст аннотации нестандартные аббревиатуры и ссылки на литературу).

Название статьи, инициалы и фамилии всех авторов, названия учреждений, города и текст аннотации на английском языке с ключевыми словами к ней приводятся на последней странице — после текста статьи и Списка литературы. Ключевые слова должны содержать не более 10–15 слов. (*Ключевые слова*: радиометр, радиояркостьная температура, излучательная способность и т.д.), (*Keywords*: radiometer, radiobrightness temperature, radiation, etc.).

Основной текст статьи начинается со второй страницы — после аннотации — с ВВЕДЕНИЯ, излагающего постановку задачи, затем рассматриваются исследуемый регион, данные, методы и средства или описание эксперимента, результаты и их обсуждение; заканчивается статья ЗАКЛЮЧЕНИЕМ с перечнем основных результатов работы.

Литература. Цитируемая в рукописи литература приводится в алфавитном порядке общим списком на отдельной странице в конце статьи под заголовком “СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ” и перед аннотацией на английском языке. Сначала приводятся ссылки на работы, опубликованные на русском языке, с указанием фамилий и инициалов всех авторов. Далее по принципу латинского алфавита следуют ссылки на работы, опубликованные на иностранных языках. Порядковый номер при каждой ссылке не ставится. Работы одного и того же автора приводятся в хронологическом порядке. Работы одного и того же первого автора при наличии соавторов располагаются в алфавитном порядке с учетом фамилии второго, третьего и т.д. авторов.

Цитируемая литература приводится в соответствии со следующими правилами:

а) для *журнальных статей* указываются фамилии и инициалы всех авторов (курсивом), название статьи, через две косые — название журнала, год издания, номер тома, выпуска, первой и последней страниц (название журнала пишется сокращенно, предлоги опускаются, при сокращении названий англоязычных журналов рекомендуется руководствоваться общепринятым списком сокращений);

б) для *книг* — фамилии и инициалы всех авторов (курсивом), полное название книги (если это сборник, то указать через одну косую редакторов: / Под ред. (или Eds.) — и далее инициалы и фамилии всех редакторов), место издания (город), название издательства, год издания и общее количество страниц.

В ссылках на статьи, опубликованные в трудах конференций, необходимо указывать название конференции, затем, через косую, редакторов сборника статей, город, где он издавался, издательство, год

издания, первую и последнюю страницы публикации.

В самом тексте статьи ссылки на цитируемую литературу следует давать в круглых скобках с указанием только фамилии автора (набирать прямо) и года выхода его работы в свет, — например (Кульбак, 1967) или (Peake, Oliver, 1971). Если цитируется несколько работ одного и того же автора, датированных одним и тем же годом, к указываемому году следует добавлять буквы а, б, в, ... (на русском языке) или а, b, c, ... (согласно латинскому алфавиту), — например (Кондратьев, 2000а, 2000б). Если автора два, то указываются оба, через запятую, — например (Козодеров, Егоров, 2003). Если авторов более двух, то указывается лишь первый из них с добавлением слов “и др.” или “et al.”, — например (Раев и др., 2001), (Lee et al., 2003).

Пример написания ссылок в “СПИСКЕ ЛИТЕРАТУРЫ”:

— статья в журнале:

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В. Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.

— статья в зарубежном журнале:

Yang E.S., Cunnold D.M. Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D17309. DOI: 10.1029/2005JD006371.

— монография:

Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.

— статья в сборнике:

Лаврова О.Ю. Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. М.: GRANP Polygraph, 2005. Т. 2. С. 118–123.

— конференция:

Lavrova O. Yu., Sabinin K.D. Surface manifestations of the deep-ocean internal solitons near Kamchatka // Proc. 4th Pacific Ocean Rem. Sens. Conf. (PORSEC'98). 28–31 July 1998. Qingdao, China, 1998. P. 463–465.

Далее, после аннотации на английском языке, следует поместить под заголовком REFERENCES список статей на русском языке из СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ в латинской транслитерации и перевод названия статьи на английский (в квадратных скобках). После выходных данных статьи указать в круглых скобках (In Russian).

Статьи в зарубежных изданиях также приводятся в REFERENCES (без изменений).

Статьи располагаются по порядку в соответствии с английским алфавитом.

Ниже приводим транслитерацию, которую условно можно назвать английской, так как в ее

Рус. А Б В Г Д Е Ё Ж З И Й К Л М Н О П Р С Т У Ф Х Ц Ч Ш Щ Ъ Ы Ь Э Ю Я
Лат. A B V G D E E ZH Z I Y K L M N O P R S T U F H, KH TS CH SH SCH ' Y ' E YU YA

Пример написания ссылок в “REFERENCES”:

— статья в российском журнале:

Kozoderov V.V., Kondranin V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. Innovatsionnaya tekhnologiya obrabotki mnogosppektral'nikh kosmicheskikh izobrazheniy zemnoy poverhnosti [Innovative technology for processing multispectral space images of the Earth's surface] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2008. № 1. P. 56–72. (In Russian).

— статья в зарубежном издании:

Yang E.S., Cunnold D.M. Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D17309. DOI: 10.1029/2005JD006371.

Таблицы. Таблицы, сколько бы их ни было в тексте, нумеруются и размещаются по порядку их упоминания. Все графы в таблицах и сами таблицы должны иметь заголовки, сокращение слов в них не допускается. В заголовках колонок таблиц следует избегать сложных текстовых разъяснений. Если все же они необходимы, нужно ввести символы (обозначения) и объяснить их в тексте статьи. Не представляйте таблицы в виде изображений и фотографий.

Формулы и другие математические выражения также должны приводиться в тексте с учетом требований экономии места. Известные и заимствованные формулы следует приводить в конечном виде, а в случае необходимости — со ссылкой на литературу. Нумеруются только те формулы, на которые в дальнейшем есть ссылки в тексте. Краткие и несложные формулы пишутся в строку в самом тексте. Для обозначения операции деления используется наклонная черта. Нумерация формул дается справа в круглых скобках. Дробная часть десятичного числа отделяется от целой части точкой (пример: 3.57).

Размерность величин следует указывать с применением косой черты (например, см/с, г/см³, но размерность концентрации следует писать см⁻³). В экспоненциальном представлении числа записываются в виде 1.3×10^{-2} , а не 1.3E–2.

Русские и греческие буквы в формулах, математические символы типа sin, Re, exp и т.д., а также химические элементы и цифра “ноль” (0) всегда набираются прямо, все латинские буквы — курсивом, векторы — без стрелки над буквой, прямо, полужирным шрифтом.

Иллюстрации. Статья не должна быть перегружена рисунками (желательно до семи на статью). Рисунки, изображения и фотографии, помимо вве-

дения их в текст для информативности и целостности публикации, обязательно следует представлять еще файлами отдельно от текста, и их качество должно позволять при печати их репродуцирование в журнал в представленном авторами виде. При наличии нескольких связанных друг с другом рисунков они должны быть рационально и экономно скомпонованы. Векторные иллюстрации должны быть предоставлены в стандартном формате файлов графического редактора, в котором они были подготовлены, также принимается формат EPS. Остальные иллюстрации принимаются в стандартных графических форматах, предпочтительно — TIFF, с разрешением не ниже 300 и до 600 dpi. На самом рисунке должно быть минимальное количество словесных обозначений на русском языке, пояснения следует вносить в подрисовочные подписи или в текст статьи. Если фотография либо графический материал заимствованы у других авторов, обязательно следует указать источник получения материала и при необходимости — разрешение на его воспроизводство.

Электронная версия статьи. Как уже отмечалось выше, автор(ы) в обязательном порядке должен представить в редакцию электронную версию своей статьи в двух форматах — MS Word и PDF, — включающих текст с аннотациями, рисунками и таблицами, а также сопроводить их отсканированными сопроводительным письмом (Направление от организации), Лицензионным договором и Актом экспертизы (если это необходимо) — желательно в формате PDF-файлов.

При подготовке иллюстративных файлов помимо основных необходимо придерживаться также приведенных ниже правил.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИЛЛЮСТРАЦИЯМ

1. Общие требования:

1.1. Иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8.5 см (на одну колонку), либо 17–17.5 см (на две колонки);

1.2. Надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому важно располагать их так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

1.3. Для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

1.4. Просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки.

2. Штриховые иллюстрации:

2.1. Графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах;

2.2. Они должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;

2.3. Толщина линий не должна быть меньше 0.5 pt;

2.4. Векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как “Noise”, “Black&white noise”, “Top noise”;

2.5. Для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.

3. Полутоновые иллюстрации:

3.1. Должны иметь разрешение от 300 dpi и выше.

4. Комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:

4.1. Должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

Публикация цветных иллюстраций

1. Во многих случаях при публикации иллюстраций в черно-белом варианте теряется их информативность, поэтому при необходимости для большей наглядности производится публикация цветных иллюстраций, но только в online-версии журнала. Для журналов, работающих с электронной корректурой, как журнал “Исследование Земли из космоса”, такая публикация бесплатная при выполнении следующих условий:

1.1. Выполнение технических требований к иллюстрациям.

1.2. Согласие автора на конечную ч/б печать из цветной версии и выполнение соответствующих требований (п. 3).

2. Дополнительные требования к цветным иллюстрациям:

2.1. Иллюстрации должны содержать только 8-битный цвет;

2.2. Цветовое пространство CMYK.

3. При согласии автора на ч/б печать цветной иллюстрации для бумажной версии без подготовки дополнительной ч/б версии должны выполняться следующие требования:

3.1. Цвета линий и объектов должны выбираться таким образом, чтобы исключить возможную потерю информативности, авторам рекомендуется предварительно распечатывать такие иллюстрации на ч/б принтере для проверки видимости и различимости цветов, а также избегать указаний на цвета

в подрисуночных подписях, заменяя (дополняя) их цифрами;

3.2. Цветные линии графиков желательно размечать обозначениями, цифрами или спецсимволами или делать различающиеся типы линий для каждого цвета;

3.3. Цветные области на иллюстрациях желательно размечать различающимися обозначениями или спецсимволами, а не одинаковыми разных цветов;

3.4. Если цветовое разделение областей находится примерно в одном цветовом тоне, то желательно провести тонкую линию границы между ними;

3.5. При большом количестве цветных областей в схожих цветовых тонах желательно дополнительно обозначить области символами или штриховкой;

3.6. Все надписи и обозначения желательно делать не цветными, а черными или белыми, в зависимости от подложки.

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) статей указан на сайте электронной библиотеки: www.elibrary.ru (там же можно приобрести электронную версию статьи (всего номера журнала) с цветными рисунками).

Работа с электронной корректурой. Авторам высылается по электронной почте PDF-файл верстки статьи, просмотренный корректором. Файлы можно прочитать и отредактировать с помощью программы Acrobat Reader (версии 9 и выше), которую можно бесплатно скачать через интернет: <http://get.adobe.com/reader/>.

Замечания нужно вносить прямо в PDF-файл статьи, используя панель инструментов “Комментарии и пометки” бесплатной программы Adobe Reader версии 9+. Не используйте другие программы для правки PDF-файлов, иначе авторские замечания могут быть потеряны при автоматической обработке ответов. Нельзя изменять название PDF-файла статьи и тему e-mail-сообщения по той же причине.

Рекомендации по внесению исправлений в PDF-файл:

1. Откройте PDF-файл статьи программой Adobe Reader.

2. Если панель инструментов “Комментарии и пометки” не присутствует на экране, ее можно вызвать для быстрого доступа:

2.1. В меню “Инструменты” выбрать “Настроить панели инструментов...”. В открывшемся окне нужно отметить те инструменты, которые Вы собираетесь использовать. Нажать “ОК”.

3. Для использования инструментов правки текста необходимо выбрать нужный фрагмент текста в файле и нажать кнопку соответствующего инструмента:

3.1. Удалить текст: инструмент “Вычеркивание текста” (красный цвет).

3.2. Заменить текст: инструмент “Заменить выделенный текст” (синий цвет).

3.3. Вставить текст: “Вставить текст на место курсора”.

4. Для использования инструментов рисования и вставки заметок необходимо сначала выбрать инструмент, а затем указать место в тексте.

5. Если Вам необходимо вставить или заменить текст со сложным форматированием или специфическим шрифтом, наберите его в MS Word, скопируйте и вставьте в заметку или используйте инструмент “Выносная строка”. Символы, которые при такой вставке теряют форматирование, можно скопировать инструментом “Снимок” и вставить, используя инструмент “Штамп”, нарисовать инструментом “Карандаш” или описать словами.

6. При правке сложных формул и рисунков ссылайтесь на оригинал, используйте инструмент “Карандаш” или копируйте инструментом “Снимок” и вставляйте, используя инструмент “Штамп”.

7. *Правка должна быть понятной и видимой при визуальном просмотре страницы. Не вставляйте объекты поверх существующего текста.*

8. В исключительных случаях, когда правку невозможно внести в PDF-файл статьи (например, замена рисунка), можно приложить к письму нужный файл в соответствующем месте с помощью инструмента “Присоединить файл”. Рядом необходимо разместить комментарий, объясняющий, что на что и по какой причине меняется.

9. Для повторяющихся исправлений используйте поиск (Ctrl + F).

Рецензирование. Статьи, представляемые в журнал “Исследование Земли из космоса” РАН, направляются на отзыв рецензенту. В ряде случаев оказывается необходимым дополнительное рецензирование.

При получении авторами копий рецензий, указывающих на необходимость доработки статьи, их ответ и доработанный материал рукописи должны быть получены редакцией не позднее, чем через один месяц. В противном случае статья считается взятой авторами обратно.

Редколлегия оставляет за собой право отклонения рукописей с краткой мотивировкой причины отказа. Рукописи авторам не возвращаются.

Англоязычная версия. Англоязычная версия настоящего журнала публикуется ежегодно в виде отдельного тома (в годовом объеме всех шести номеров, выпускаемых за год на русском языке) к англоязычному варианту журнала “Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics”, Nos. 9, 12 (English translation of selected articles from “Issledovanie Zemli iz Kosmosa”).

Просим авторов придерживаться указанных Правил и тщательно готовить статьи. Рукописи, оформленные с нарушением Правил, могут быть возвращены авторам. Спасибо всем, кто будет способствовать улучшению нашего журнала, — мы признательны Вам за сотрудничество.

Редколлегия журнала