

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2022

Использование космической информации о Земле

- Сильные природные пожары на территории России в 2021 г.,
обнаруженные по космическим данным
О. С. Воронова, К. А. Гордо, А. Л. Зима, Н. В. Феоктистова 3
- Исследование течения соя в южной части охотского моря
по спутниковым данным
А. Г. Андреев 19
- Анализ термических условий в северо-западной части Тихого океана
по спутниковым данным
Ж. Р. Цхай, Г. В. Шевченко, Д. М. Ложкин 30
- Пространственно-временная изменчивость цветений цианобактерий
на основе их автоматической идентификации по данным MODIS
*П. Н. Лишаев, А. А. Алескерова, А. А. Кубряков,
Н. В. Василенко, С. В. Станичный* 38
-

Физические основы исследования Земли из космоса

- Оценка ковариационной матрицы шума в измерениях бортового
инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2
*Д. А. Козлов, И. А. Козлов, А. Б. Успенский, А. Н. Рублев, Ю. М. Тимофеев,
А. В. Поляков, М. В. Колесников* 53
- Оценка некоторых параметров верхнего слоя почвы по радарным
и оптическим данным спутников Sentinel 1/2 на примере
Новосибирской области
Н. В. Родионова, С. Я. Кудряшова, А. С. Чумбаев 68
-

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

- Использование гиперспектральных спутниковых данных
для идентификации цианобактерий в Чёрном и Азовском морях
Е. А. Морозов 80
-

- Правила для авторов 92
-
-

Contents

No. 1, 2022

Utilization of the Earth Space Data

Strong Wildfires in Russia in 2021 Detected Using Satellite Data <i>O. S. Voronova, K. A. Gordo, A. L. Zima, and N. V. Feoktistova</i>	3
Study of the Soya Current in the Southern Part of the Okhotsk Sea by Satellite Data <i>A. G. Andreev</i>	19
Analysis of Thermal Conditions in the Northwest Pacific Ocean from Satellite Data <i>Zh. R. Tskhay, G. V. Shevchenko, and D. M. Lozhkin</i>	30
Spatio-Temporal Variability of Cyanobacteria Blooms Based on Their Automatic Identification According to Modis Data <i>P. N. Lishaev, A. A. Aleskerova, A. A. Kubryakov, N. V. Vasilenko, and S. V. Stanichny</i>	38

Earth Research from Space Physical Ground

Characterization of the Noise Covariance Matrix of the Infrared Fourier Transform Spectrometer IKFS-2 <i>D. A. Kozlov, I. A. Kozlov, A. B. Uspensky, A. N. Rublev, Y. M. Timofeyev, A. V. Polyakov, and M. V. Kolesnikov</i>	53
Estimation of Some Parameters of the Upper Soil Layer by Radar and Optical Data of Sentinel 1/2 Satellites in Conditions of the Novosibirsk Region <i>N. V. Rodionova, S. Ya. Kudryashova, and A. S. Chumbaev</i>	68

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

Use of Hyperspectral Satellite Data for Cyanobacteria Identification in the Black and Azov Seas <i>E. A. Morozov</i>	80
Notes to the Authors	92

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СИЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПОЖАРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В 2021 Г., ОБНАРУЖЕННЫЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2022 г. О. С. Воронова^а, *, К. А. Гордо^а, А. Л. Зима^а, Н. В. Феоктистова^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

На основании данных космического мониторинга исследованы особенности крупных природных пожаров и обусловленных ими объемов эмиссий CO, CO₂ и PM_{2.5} на территории России и в ее отдельных регионах в период с апреля по октябрь 2001–2021 гг. Установлено, что в июле и августе 2021 г. среднемесячные значения площадей, пройденных огнем на всей территории России, превышали на 25 и 24.5 тыс. км² аналогичные значения, зарегистрированные в эти месяцы за период времени с 2001 по 2020 гг. Выявлены превышения значений площадей, пройденных огнем на территории крупных регионов в 2021 г. по сравнению с 2020 г.: в апреле на территории Европейской части России (на 2.1 тыс. км²), в мае в Уральском (на 6.7 тыс. км²) и в Сибирском (на 8.4 тыс. км²) федеральных округах, в июле и августе на территории Дальневосточного федерального округа (на 18.4 и 27 тыс. км² соответственно). Установлено, что в отдельные месяцы 2021 г. увеличение вклада объемов эмиссий, обусловленных природными пожарами на территориях указанных регионов в общие объемы выбросов по стране достигало 44.9% по сравнению с 2020 г. С использованием спутниковых данных проведен анализ изменения газового состава атмосферы в период сильных пожаров на территории республики Саха (Якутия) в июле 2021 г., в результате которого выявлены области аномально высоких значений концентраций CO, CH₄ и повышение значений аэрозольного индекса AI от 1.4 до 3.7.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космические данные, космический мониторинг, природные пожары, эмиссии, аэрозольный индекс, тепловые аномалии

DOI: 10.31857/S0205961422010080

ВВЕДЕНИЕ

Происходящие в настоящее время глобальные климатические изменения увеличивают риски возникновения природных пожаров. Средняя продолжительность сезона пожаров в мире за период с 1979 по 2013 гг. увеличилась на 18.7% (Jolly et al., 2015). Согласно докладу Росгидромета о климатических рисках на территории Российской Федерации во всех ее регионах, подверженных возникновению природных пожаров, к концу XXI века ожидается увеличение длительности пожароопасного периода на 20–29 сут, а в некоторых регионах на 30–50 сут (Доклад..., 2017).

Для территории России, имеющей значительные площади, покрытые лесами, исследование динамики природных пожаров и их последствий является важной задачей. Согласно работам (Бондур и др., 2021б; Мохов и др., 2020) среднегодовая площадь природных пожаров на территории России для периода времени с 2001 по 2020 гг. составила 199 тыс. км². Этому способствует рост температуры на фоне уменьшения осадков в пожароопасные периоды. В некоторых регионах увеличение плотностей эмиссий углеродсодержа-

щих газов CO и CO₂, а также мелкодисперсных аэрозолей PM_{2.5} превышает рост площадей природных пожаров за исследуемый период времени (Мохов и др., 2006).

Изменение климата в значительной мере влияет на режимы природных пожаров (Bradstock et al., 2008). Исследования изменения глобального потенциала возникновения природных пожаров в условиях изменения климата из-за парникового эффекта с использованием модели общей циркуляции показали, что будущий потенциал возникновения природных пожаров на планете в целом значительно возрастает (Liu et al., 2010). Периоды природных пожаров зависят от метеорологических атмосферных изменений различных временных масштабов, от межгодовых колебаний засухи до суточных колебаний влажности и ветра (Zhong et al., 2020). Возникающие тепловые аномалии, связанные с волнами жары, и уменьшение количества осадков вызывают усиление засушливых условий, значительно повышают вероятность возникновения природных пожаров, а также создают необходимые условия для быстро-

го распространения огня (Бондур, 2011; Crockett et al., 2018; Trauernicht, 2019; Мохов и др. 2003).

В свою очередь природные пожары повреждают растительный покров (Pellegrini et al., 2018; Бондур и др., 2019б; He et al., 2020) и вызывают неконтролируемое сгорание биомассы (Shirazi et al., 2021), в результате которого в атмосферу выбрасывается большое количество продуктов горения, в том числе аэрозольных частиц, а также углеродсодержащих (CO , CO_2) и других малых газовых компонент, что приводит к загрязнению воздушной среды (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016) и оказывает влияние на климат (Certini, 2005; Pellegrini et al., 2018; Liu et al., 2017; Мохов и др., 2020).

Следовательно, в условиях изменяющегося климата, ежегодный мониторинг пожарной активности на Земном шаре, в том числе и на территории Российской Федерации имеет важное значение для изучения динамики этих природных явлений. Для этого формируются различные программы, описанные, например, в работах (Kulmala et al., 2015, 2016; Lappalainen et al., 2016, 2021).

Учитывая огромную площадь территории Российской Федерации, удаленность и часто труднодоступность отдельных территорий, для решения задач мониторинга природных пожаров и оценки влияния сгорания биомассы на состав атмосферы наиболее перспективным подходом является использование методов и технологий дистанционного зондирования Земли (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б, 2020а, 2020б, 2021а, 2021б; Bondur et al., 2021). Использование информации, полученной из космоса, позволяет своевременно выявлять очаги природных пожаров на различных участках, определять площади выгоревших территорий (Бондур, 2011, Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018), а также оценивать объемы вызванных ими эмиссий вредных газовых примесей и аэрозолей (Бондур, 2011, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016).

В настоящей работе представлены результаты космического мониторинга природных пожаров на территории России в 2021 г., который характеризуется особенно сильными пожарами в Сибири. Проанализированы площади, пройденные огнем, а также рассчитаны объемы эмиссий малых газовых компонент (CO , CO_2) и мелкодисперсных аэрозолей ($\text{PM}_{2.5}$) от природных пожаров на территории России с 2001 по 2021 гг. По данным, полученным прибором AIRS (спутник Aqua), проведен анализ изменений температур земной поверхности. Выполнен сравнительный анализ данных общего содержания оксида углерода (CO) в июле 2021 г., полученных с помощью приборов AIRS (спутник Aqua) и TROPOMI (спутник Sentinel-5P). Выявлены концентрации метана CH_4 , а также изменения распространения мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$, обусловленные при-

родными пожарами в июле 2021 г. на территории республики Саха (Якутия) по данным прибора TROPOMI (спутник Sentinel-5P).

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Методика проведения космических исследований для мониторинга очагов природных пожаров и выявления изменений границ площадей, пройденных огнем, разработана ранее и описана в работах (Бондур, 2011; Бондур, 2015; Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018). Расчет площадей, пройденных огнем, производился за пожароопасный период с апреля по октябрь, в который существует наибольшая вероятность возникновения природных пожаров на территории России. Для расчета площадей, пройденных огнем, использовался информационный продукт MOD14 с пространственным разрешением 1 км (Giglio et al., 2016). При этом учитывалась фактически выгоревшая территория за год без учета повторяемости горения одного и того же участка внутри пожароопасного сезона. Анализ значений площадей, пройденных огнем осуществлялся путем сравнения каждого года с использованием скользящего среднего в период с 2001 по 2021 гг.

В соответствии с преобладающим типом почвенно-растительного покрова на исследуемой территории, по данным продукта MCD12Q1 v. 6 (MODIS Land Cover Type 500 m) на основе классификации международной геосферно-биосферной программы (IGBP) (Friedl et al., 2010) были идентифицированы площади, пройденные огнем для дальнейшего расчета объемов эмиссий, выделенных от природных пожаров. Объем эмиссий рассчитывался с использованием метода Сейлера-Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980). Метод учитывает плотность распределения биомассы на данной площади, ее долю сгорания. В формулу расчета также входят значения площадей пожаров, которые в данной работе вычислены с введением поправочного коэффициента, полученного по данным более высокого пространственного разрешения (Бондур, 2015; Бондур, Гордо, 2018).

Вероятность возникновения и скорость распространения природных пожаров начинает увеличиваться при аномальных природно-климатических условиях. Одним из таких условий является наличие тепловых аномалий, сопутствующих возникновению крупных природных пожаров (Tomshin and Solovyev, 2014; Crockett et al., 2018; Bondur et al., 2021).

В данной работе проведены исследования ежемесячных изменений температуры земной поверхности на территории России в пожароопасные периоды с 2003 по 2021 гг. В процессе проведения ис-

следований использовались космические данные, полученные прибором AIRS (спутник Aqua, тематический продукт AIRS3STM v006), с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Tain et al., 2013). Произведены расчеты аномального превышения температуры поверхности за 2021 г. по сравнению со средними температурами с 2003 по 2020 гг.

Основным источником поступления в атмосферу угарного газа CO является неполное сгорание ископаемого топлива или биомассы. Путем фотохимического окисления CO разрушается и является доминирующим поглотителем гидроксильного радикала (OH), что влияет на способность атмосферы к самоочищению (Lelieveld et al., 2016). При реакции с гидроксил радикалом (OH) изменяется и срок существования метана (CH₄) в тропосфере (Prather, 2007). Угарный газ CO является кратковременным загрязнителем климата. Он воздействует на образование углекислого газа (CO₂) и озона, а также на бюджет метана (CH₄) (Muyhre et al., 2014). Его влияние чувствительно к местоположению выбросов (Bowman and Henze, 2012; Buchholz et al., 2021).

Изучение изменения содержания CO₂ в атмосфере, получение данных о количестве выбросов, а также расчет максимально возможной поглощающей способности лесов и других экосистем, является актуальным для России, в том числе и для выполнения условий Парижского соглашения об изменении климата.

Время существования CO в атмосфере составляет от нескольких недель до месяцев (Holloway et al., 2000). Это позволяет выявлять загрязняющие шлейфы, которые постепенно подвергаются атмосферному перемешиванию (Buchholz et al., 2021).

Тропосферный оксид углерода CO доступен для дистанционного зондирования, благодаря его поглощению инфракрасным излучением, и наблюдается с помощью датчиков, установленных на спутниковых инструментах. Многолетние данные об общем содержании CO в тропосферном слое были получены с помощью прибора AIRS (спутника Aqua) с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Tain et al., 2013). Для анализа этих данных было произведено осреднение ежемесячных значений, полученных прибором AIRS для июля месяца в период времени с 2018 по 2020 гг. и их сравнение со значениями 2021 г. для этого месяца. Выбранный период осреднения объясняется наличием аномально высоких площадей природных пожаров на исследуемой территории республики Саха (Якутия) (Бондур и др., 2020б; Воронова и др., 2021). Также был проведен сравнительный анализ общего содержания CO, полученного по данным прибора AIRS (спутника Aqua), с данными прибора TROPOMI (спутник

Sentinel-5P), обеспечивающими улучшенное пространственное разрешение (7 км).

Еще одним индикатором загрязнения атмосферы являются аэрозоли. Мелкодисперсные частицы (PM_{2.5}), оказывают значительное негативное воздействие на здоровье человека (McClure and Jaffe, 2018). В зависимости от типа аэрозоли способны проявлять заметное влияние на климат (Ramanathan and Carmichael, 2008) и на другие загрязнители, такие как озон (Li et al., 2019). Спутниковые наблюдения атмосферного аэрозоля наряду с CO и другими малыми газовыми компонентами (CO₂, CH₄ и др.), могут служить дополнительной информацией при определении источников и понимании их пространственной и временной изменчивости (Edwards et al., 2004).

Анализ содержания метана (CH₄) и мелкодисперсных аэрозолей в атмосфере в период сильных пожаров на исследуемой территории осуществлялся на основании данных прибора TROPOMI (спутник Sentinel-5P). Для измерения содержания CH₄ использовался коротковолновый инфракрасный диапазон (SWIR – 2305–2385 нм) прибора TROPOMI. Чувствительность этого прибора падает при больших зенитных углах Солнца, но имеет лучшее пространственное разрешение по сравнению с данными, получаемыми в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне (MWIR, LWIR). В связи с этим, данные этого прибора использовались для изучения содержания метана над материковой частью бореально-арктической зоны Российской Федерации в летний сезон.

Наличие аэрозоля в атмосфере можно оценить с помощью аэрозольного индекса (AI), который вычисляется как отношение измеренного коэффициента отражения верхней части атмосферы в УФ диапазоне спектра и предварительно рассчитанного теоретического коэффициента отражения для атмосферы, в которой присутствует только рэлеевское рассеяние (Zweers Stein, 2018). Для исследований использовался аэрозольный индекс (AI), рассчитанный на основании измерений на длинах волн 354 и 388 нм с помощью спутниковых данных прибора TROPOMI (спутник Sentinel-5P).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты космического мониторинга природных пожаров на территории России представлялись для пожароопасного сезона (с апреля по октябрь) в период времени с 2001 по 2021 гг. На рис. 1 приведены отклонения суммарных ежемесячных значений площадей, пройденных огнем в пожароопасный период 2021 г., по сравнению с осредненными данными других лет для соответ-

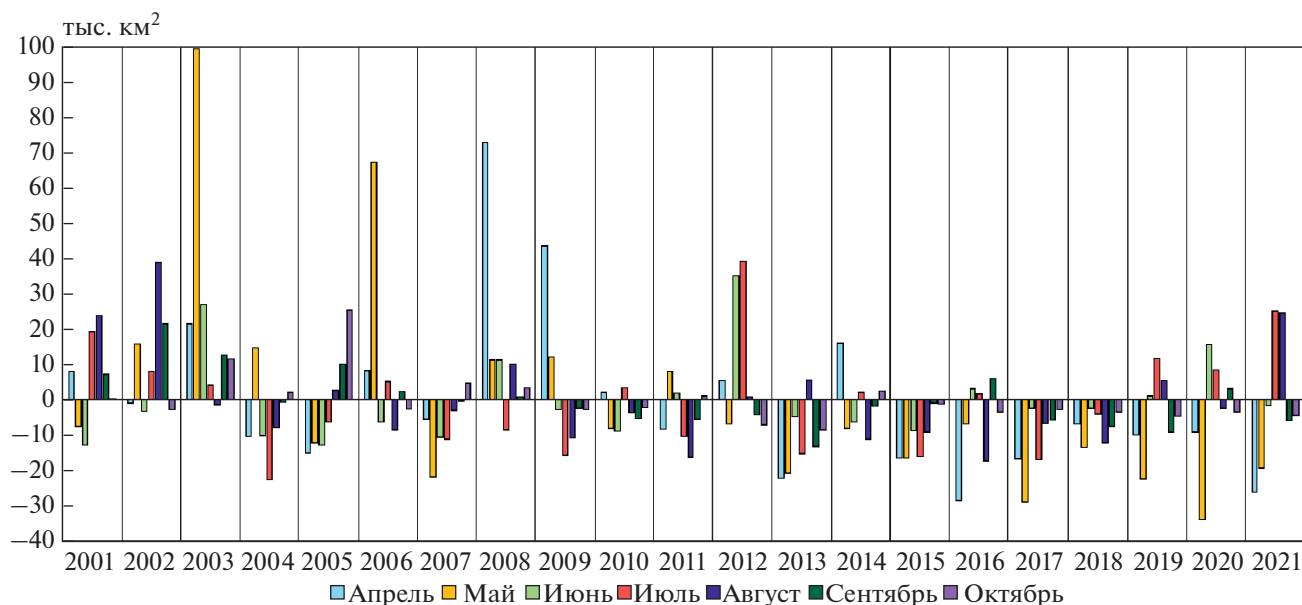


Рис. 1. Отклонения ежемесячных значений площадей, пройденных огнем за пожароопасный период по сравнению с данными за соответствующий месяц для других лет с 2001 по 2021 гг. на территории России.

ствующего месяца за период времени с 2001 по 2021 гг.

Анализ рис. 1 показал, что в период с 2013 по 2018 гг. на территории России выявлена тенденция к снижению площадей, пройденных огнем относительно других лет с апреля по октябрь. В июле 2019 г. выявлены превышения суммарных ежемесячных значений площадей, пройденных огнем на 11.5 тыс. км² по сравнению с данными других лет. В июне 2020 г. суммарные значения площадей, пройденных огнем, увеличились на 15.4 тыс. км² в сравнении с июнем других лет в период с 2001 по 2021 гг.

В июле и августе 2021 г. значения площадей природных пожаров на территории России превысили среднемесячные значения тех же месяцев периода 2001–2021 гг. на 25 и 24.5 тыс. км² соответственно (рис. 1).

Пожароопасный сезон 2021 г. был рассмотрен более детально, проведен сравнительный анализ с результатами 2020 г. На рис. 2, а приведены результаты сравнения значений площадей, пройденных огнем в пожароопасный период (с апреля по октябрь) 2021 г. с соответствующими данными за 2020 г. на территории крупных регионов России, таких как Европейская часть России, Уральский, Сибирский и Дальневосточный федеральные округа.

Анализ результатов на рис. 2, а показал, что по сравнению с 2020 г. площадь, пройденная огнем в 2021 г. увеличилась: в апреле на территории ЕЧР (на 2.1 тыс. км²), в мае на территории УрФО (на

6.7 тыс. км²) и СФО (на 8.4 тыс. км²), в июле и августе в районе ДФО (на 18.4 и 27 тыс. км² соответственно).

На рис. 2, б приведены распределения вклада регионов ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО в общероссийские объемы эмиссий CO, CO₂, PM_{2.5}, обусловленные сгоранием биомассы, в апреле–октябре 2021 г. по сравнению с 2020 г.

Анализ результатов на рис. 2, б для каждого месяца, показал, что в апреле 2021 г. вклад эмиссий на территории СФО в ежегодные общие выбросы от природных пожаров снизился на 32% по сравнению с 2020-м г., в то время как в ЕЧР в 2021 г. произошло увеличение вклада эмиссий в общие по стране на 21%. В мае 2021 г. на территории УрФО были зафиксированы сильные природные пожары, вклад эмиссий от которых в общие объемы пожарных выбросов по России вырос на 44.9% по сравнению с 2020 г.

Для территории СФО характерна тенденция к снижению объемов эмиссий, зарегистрированных в 2021 г., по сравнению с 2020 г., исключением стал только июнь, когда вклад объемов выбросов CO, CO₂, PM_{2.5} в общероссийские вырос на 23.5% по сравнению с 2020 г.

Вклад эмиссий CO₂, обусловленных сгоранием биомассы на территории ДФО, в общероссийские объемы выбросов от природных пожаров в 2021 г. с июля по октябрь возрос на 9–28%, а объемов эмиссий CO и PM_{2.5} на 2–27.4% в сравнении с 2020 г.

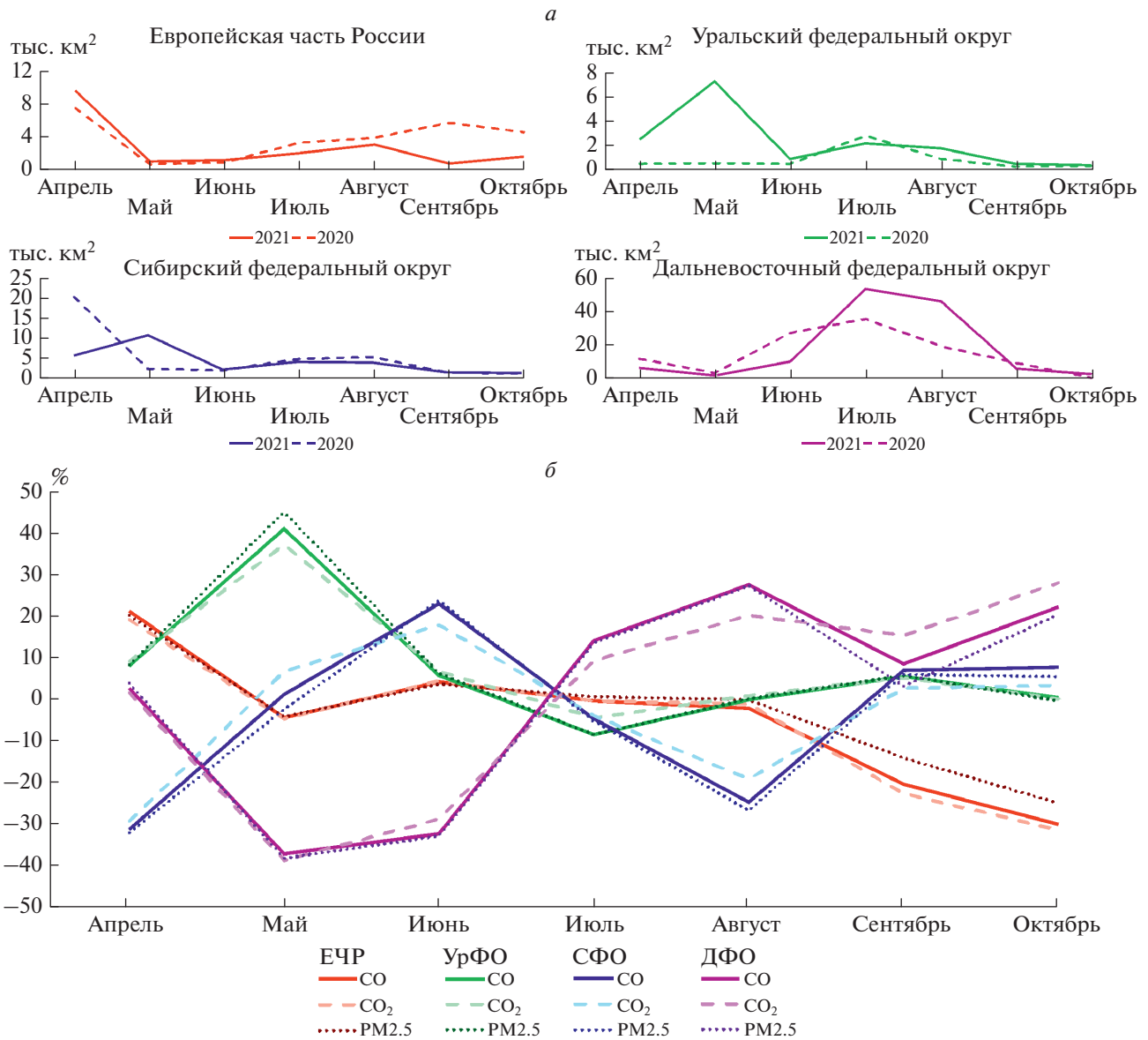


Рис. 2. Результаты космического мониторинга площадей природных пожаров на территории России: *а* – площадь, пройденная огнем на территории крупных регионов в период апрель–октябрь 2021 г. по сравнению с 2020 г.; *б* – распределение вклада регионов ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО в общероссийские эмиссии CO, CO₂, PM2.5 в 2021 г. по сравнению с 2020 г.

В настоящей работе по данным прибора AIRS (спутник Aqua) получены среднемесячные температуры земной поверхности на территории России за период времени с марта по июнь 2021 г., которые сравнивались с осредненными значениями температуры с 2003 по 2020 гг. этих же месяцев. Пространственные распределения зарегистрированных таким образом температурных аномалий земной поверхности представлены на рис. 3.

На основании результатов анализа таких температурных аномалий установлено, что в марте–апреле 2021 г. на территории ЕЧР превышения многолетних значений температур по сравнению

с 2003–2020 гг. доходили до 3.5–4 К (см. рис. 3, *а*, 3, *б*). Такая температурная аномалия способствовала возникновению природных пожаров в апреле 2021 г. на территории ЕЧР, что также повлияло на увеличение общей площади пожаров по сравнению с апрелем 2020 г. (рис. 1, *а*).

В апреле–мае 2021 г. (рис. 3, *б*, 3, *в*) на территории УрФО зафиксированы аномально высокие температуры земной поверхности по сравнению со среднемесячными значениями температуры за период времени 2003–2020 гг. Превышения температур достигали 7–8 К. Повышение температур в апреле содействовало возникновению сильных

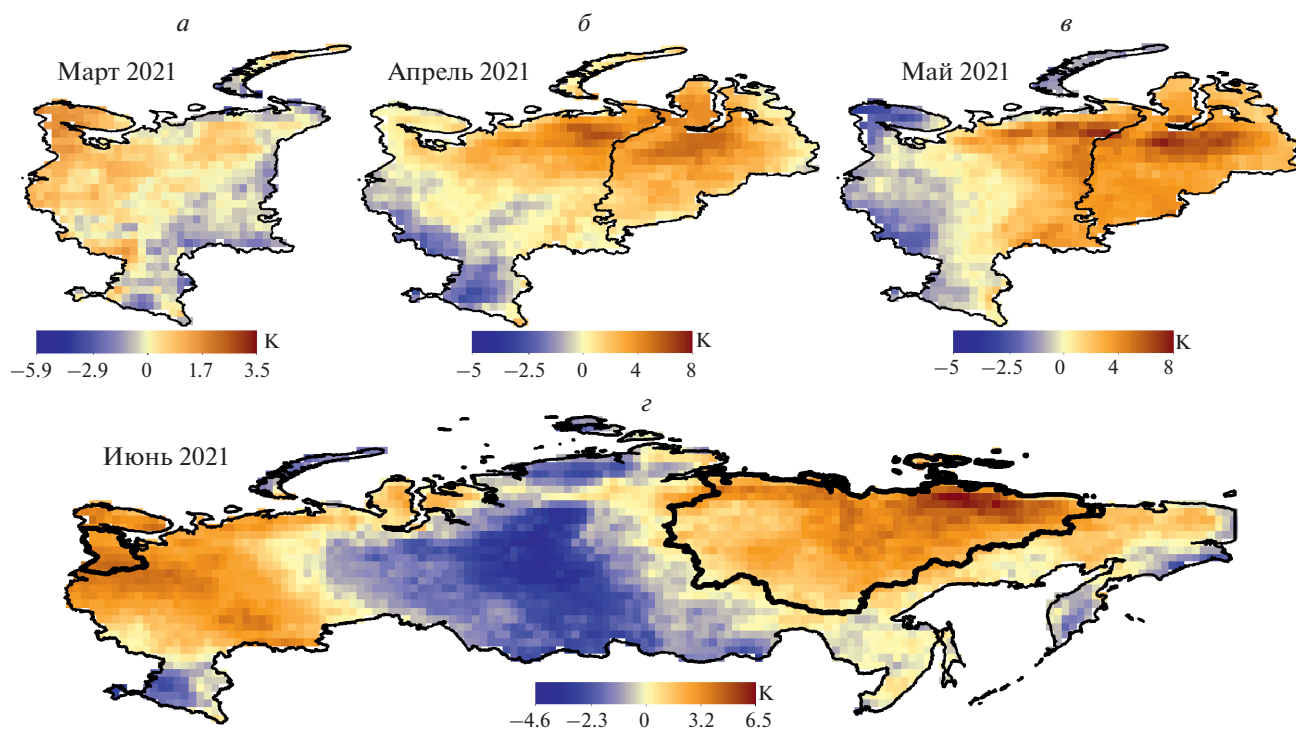


Рис. 3. Аномалия температуры земной поверхности (К) в 2021 г. по сравнению со средними температурами того же месяца в период времени 2003–2020 гг.: *a* – Европейская часть России; *б, в* – Европейская часть России и Уральский федеральный округ; *г* – Территория России с выделенными областями республики Карелия и Республики Саха (Якутия).

пожаров в мае 2021 г. на территории УрФО, которые по площадям превысили значения не только 2020 г. (рис. 1, *a*), но и прошлых лет, начиная с 2012 г. (Воронова и др., 2021).

На рис. 3, *г* приведена карта изменения температур, построенная по данным прибора AIRS (спутник Aqua). Анализ этой тепловой карты позволил выявить на территории ЕЧР и ДФО аномалии температуры земной поверхности в июне 2021 г. по сравнению со средними температурами 2003–2020 гг. В связи с засушливой погодой, установившейся в июне 2021 г. в республике Карелия, в июле 2021 г. были зафиксированы интенсивные природные пожары. По данным МЧС из-за сильного задымления от лесных пожаров и ухудшения видимости в Карелии вечером 18 июля 2021 г. на несколько часов закрывали федеральную трассу Р-21 “Кола” в районе Сегежи (<https://10.mchs.gov.ru/>).

Аномальные температуры, зарегистрированные в июне 2021 г. на территории ДФО, способствовали усилению пожароопасной ситуации, что привело к увеличению площадей, действующих пожаров, а также нарастанию их в июле и августе 2021 г. (рис. 1, *a*). Воздействию природных пожаров сильнее всего подверглась территория республики Саха (Якутия), на которой зафиксированы наиболее высокие значения площадей,

пройденных огнем в июле и августе 2021 г. за всю историю спутниковых наблюдений с использованием аппаратуры MODIS (спутники Terra/Aqua) с 2001 г. (см. рис. 4).

Республика Саха (Якутия) входит в состав ДФО, обладает наибольшей площадью лесного покрова среди всех субъектов Российской Федерации и на территории которой наблюдается высокая частота природных пожаров. Пожары на территории Якутии вызывают различные локальные воздействия как загрязнение воздуха, так и влияют на глобальное изменение климата (Narita et al., 2020).

Природные пожары являются одним из источников эмиссий загрязнителей воздуха, оказывающих негативное влияние на здоровье человека. Выбросы оксида углерода (СО) сохраняются в атмосфере от нескольких недель до месяцев и являются хорошим индикатором загрязнения воздуха (Ding et al., 2015). Поэтому важно определить пространственные закономерности, временные вариации и долгосрочные тенденции концентраций СО в атмосфере. С 2003 г. прибор AIRS, установленный на спутнике Aqua, обеспечивает глобальные и долгосрочные измерения атмосферного СО.

В настоящей работе приведены результаты исследования пространственного распределения

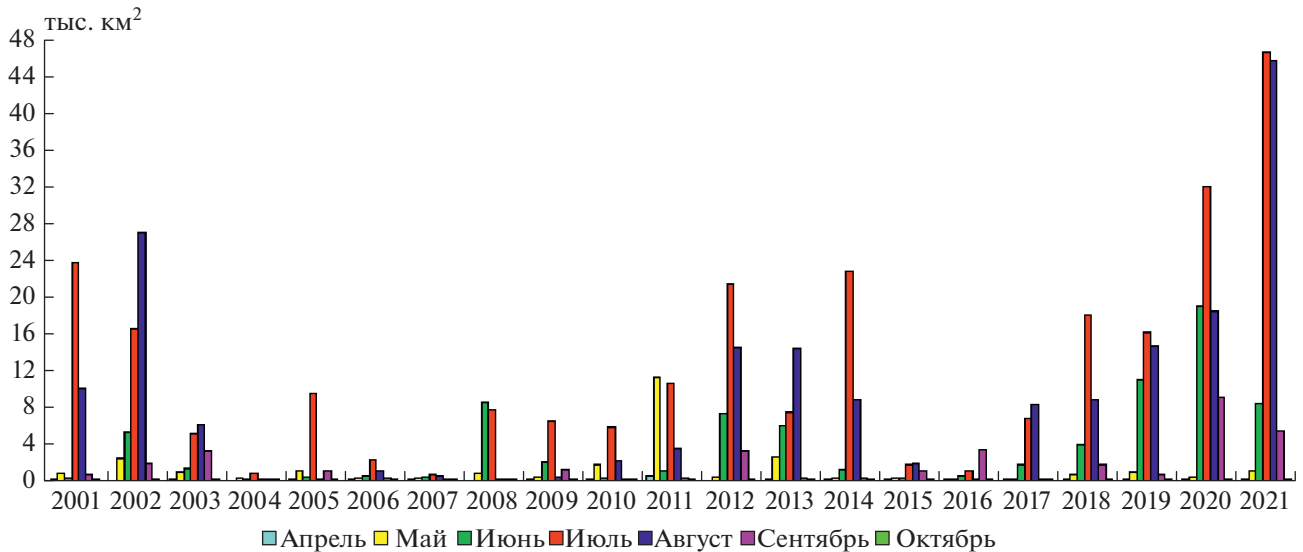


Рис. 4. Площади природных пожаров по данным информационного продукта MOD14 на территории республики Саха (Якутия) с апреля по октябрь 2001–2021 г.

концентраций CO в период сильных пожаров на территории республики Саха (Якутия) в июле 2021 г. По данным прибора AIRS получены среднемесячные концентрации CO, зарегистрированные в июле 2021 г., и проведено их сравнение с осредненными значениями для этого же месяца за 2018–2020 гг. Результаты превышения концентраций оксида углерода на территории республики Саха (Якутия) представлены на рис. 5, а. Анализ результатов, представленных на рис. 5, а показал, что на территории Якутии в июле месяце с 2018 по 2021 гг. природные пожары носили аномально высокий характер (рис. 4). Анализ рис. 5, а позволил выделить три зоны аномального превышения концентраций CO. Наибольшее превышение концентрации CO над территорией Оймяконского улуса (район) в июле 2021 г. составило на 3.9×10^{17} molec/cm² по сравнению с 2018–2020 гг. Причиной этого явились интенсивные природные пожары, не происходившие в данной области в период с 2018–2020 гг. Территория Верхоянского района и Якутской области также попала в зону превышающих концентраций по сравнению с июлем 2018–2020 гг.

Пространственное распределение площадей, пройденных огнем, построенное по данным MOD14 (Terra/Aqua), приведено на рис. 5, б. Анализ рис. 5, б показал, что в июле 2021 г. на исследуемой территории площадь, пройденная огнем, достигла аномальных значений (46.6 тыс. км²) и явилась причиной увеличенного выброса CO.

Анализ общего содержания оксида углерода, полученного по данным прибора AIRS (рис. 5, в) и прибора TROPOMI (рис. 5, г) продемонстрировал различную чувствительность к их изменениям

от сжигания биомассы в июле 2021 г. Например, над территорией Оймякона, по данным AIRS значения концентрации CO доходили до 2×10^{18} molec/cm², а по данным TROPOMI общее содержание CO в тропосфере не превышало 2.6×10^{18} molec/cm². В то же время значения концентраций CO над территорией Верхоянского района по данным AIRS были наоборот выше, чем по данным TROPOMI. Минимальное количество природных пожаров в июле 2021 г., зарегистрированных в Верхоянском районе, позволяет сделать вывод о том, что высокие значения концентраций CO не связаны со сжиганием биомассы в данном районе, а вероятно связано с ошибками в алгоритме восстановления данных прибора AIRS.

Различия в данных об общем содержании CO, полученные с помощью приборов AIRS и TROPOMI, требуют более детального изучения с применением результатов численного моделирования и данных наземных наблюдений для исключения ложных аномалий.

Республика Саха (Якутия) ежегодно подвергается воздействию природных пожаров, которые продолжают длительное время (недели, даже месяцы). Некоторые участки территории подвергались сжиганию повторно. Сезоны пожаров 2019 и 2020 гг. были особенно экстремальными в тундровых регионах Якутии, к северу от Полярного круга, тогда как в 2021 г. природные пожары распространялись южнее. Природные пожары не просто распространяются по ландшафту, но и участвуют в процессах подтаивания вечной мерзлоты, прожигают слои торфа в некоторых областях и высвобождают запасы углерода и метана,

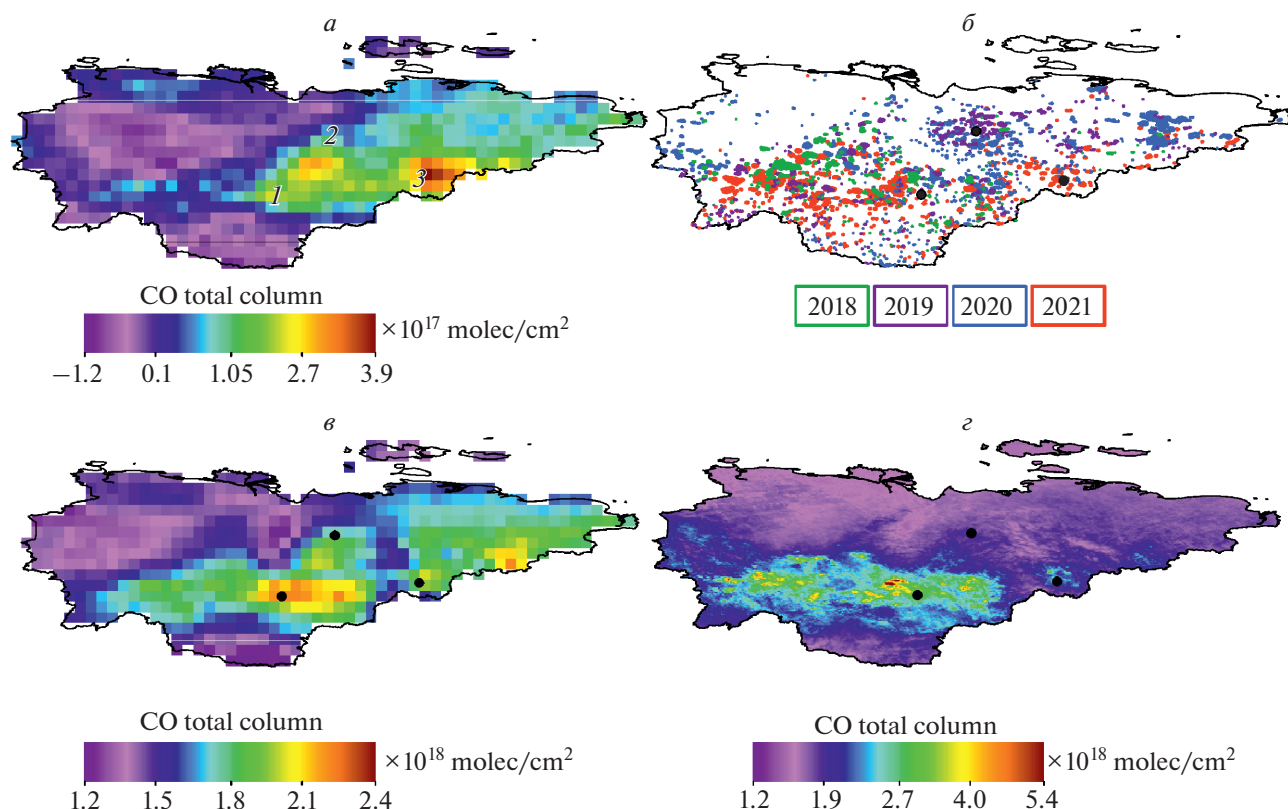


Рис. 5. Изменения концентрации оксида углерода (CO) на территории республики Саха (Якутия): *а* – превышение содержания оксида углерода (CO) в июле 2021 г. (по сравнению с 2018–2020 гг.), где 1 – Якутск, 2 – Верхоянск, 3 – Оймякон; *б* – пространственное распределение площадей, пройденных огнем в июле 2018–2021 гг.; *в* – содержание CO по данным Aqua (AIRS) в июле 2021 г.; *г* – содержание CO по данным Sentinel-5P (TROPOMI) в июле 2021 г.

которые накапливались годами (Черепанова и др., 2020; Froitzheim et al., 2021).

Пространственное распределение крупных площадей природных пожаров, полученных по данным анализа информационных продуктов MOD14 в июле 2021 г. на территории западной части республики Саха (Якутия), представлено на рис. 6, *а*. По данным TROPOMI зафиксирована концентрация метана над территорией Якутии в период сильных пожаров в июле 2021 г. (рис. 6, *б*).

Анализ пространственного распределения среднемесячных концентраций метана, полученных по спутниковым данным TROPOMI (рис. 6, *б*) в июле 2021 г. позволил выявить устойчивые области повышенных концентраций метана до 1895 ppb над выгоревшими площадями (рис. 6, *а*).

Наряду с CO и CH₄, в процессе природных пожаров выделяются и аэрозоли, но распространяются на большие расстояния и имеют более короткий срок существования в атмосфере. Комбинированный анализ тенденций измерения CO и аэрозольного индекса по космическим данным помогает диагностировать факторы региональных различий в тренде CO.

Вариации индекса аэрозоля (AI) анализировались по космическим данным прибора TROPOMI (Sentinel-5P) с пространственным разрешением 7 км. Аэрозольный индекс, регистрируемый TROPOMI, указывает на присутствие в атмосфере поглощающих аэрозолей. Произведено осреднение композитов аэрозольного индекса (AI) за период 8 и 6 дней (рис. 7), которое продемонстрировало более полную картину распространения аэрозолей по сравнению с использованием суточных спутниковых данных.

Анализ результатов, представленных на рис. 4 показал, что июль 2021 г. на территории республики Саха (Якутия) характеризовался аномально высокими площадями, пройденными огнем, которые явились источником выброса в атмосферу большого количества мелкодисперсных частиц, в связи с чем повышенные значения AI сохранялись на протяжении всего месяца пожарной активности в данном регионе, а в период с 25 по 31 июля 2021 г. достигли максимальных 3.7.

Анализ изменения AI (см. рис. 5) на территории республики Саха (Якутия) показал, что крупномасштабные природные пожары являлись основным фактором, определяющим простран-

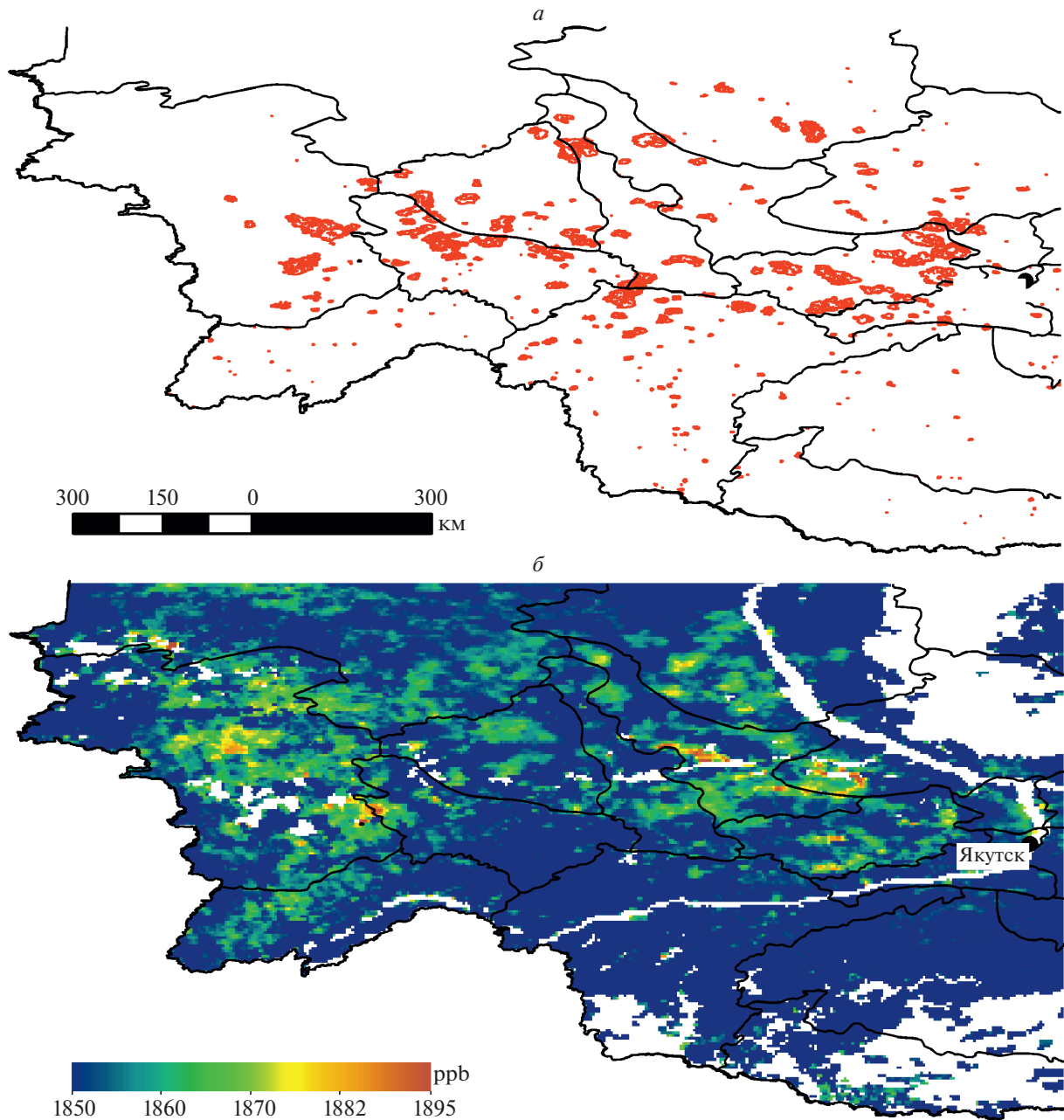


Рис. 6. Территория западной части республики Саха (Якутия) в период сильных пожаров в июле 2021 г.: *а* – пространственное распределение площадей, пройденных огнем по данным MODIS (Terra/Aqua); *б* – концентрация метана по данным TROPOMI (Sentinel-5P).

ственное и временное распределение индекса аэрозоля. Крупномасштабные природные пожары приводят к массовому загрязнению воздуха с высокими значениями AI, что означает высокое содержание вредных для окружающей среды и здоровья человека веществ в атмосфере.

Образование крупномасштабных неоднородностей в распределении AI возможно при соответствующих метеорологических условиях (низкое давление, низкая скорость ветра и т.д.), кото-

рые приводят к образованию областей застоя, где накапливаются аэрозольные частицы (Tomshin and Solovyev, 2014). Эти районы с высокими значениями AI могут существовать в течение примерно недели после прекращения природных пожаров. Аэрозольное загрязнение от сильных лесных пожаров может переноситься на большие расстояния от места пожара (Бондур, 2015; Бондур и др., 2021a Tomshin and Solovyev, 2014; Bondur et al., 2021; Воронова и др., 2021). В частности,

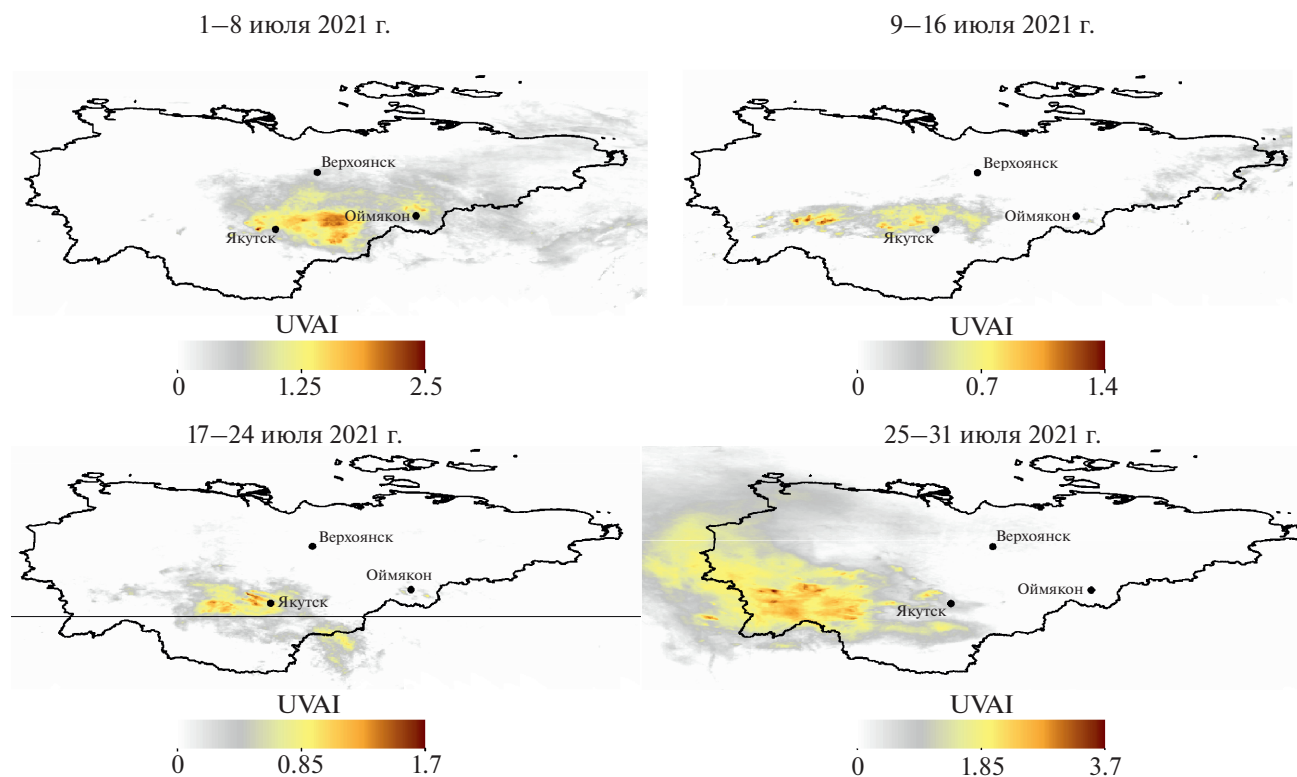


Рис. 7. Распределение среднесуточных значений аэрозольного индекса на территории республики Саха (Якутия) в июле 2021 г. по данным Sentinel-5P (TROPOMI).

аэрозольные облака, образовавшиеся в результате природных пожаров, произошедших на территории ДФО в июле 2020 г. распространились в восточном направлении и достигли за 8 дней территории Аляски (Воронова и др., 2021). Также в период сильных пожаров на территории австралийского штата Новый Южный Уэльс в декабре 2019 г. и январе 2020 г., аэрозольное облако достигло Новой Зеландии, преодолев расстояние более чем 3000 км. (Bondur et al., 2021; Бондур и др., 2021a).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов космического мониторинга природных пожаров, происходивших на территории России в 2021 г., проанализированы пространственные распределения очагов возгорания, площади, пройденные огнем, и объемы эмиссий углеродсодержащих газов от них на всей территории континента и его отдельных регионов относительно пожароопасного сезона 2020 г. Выявлены превышения суммарных площадей, пройденных огнем на территории крупных регионов Российской Федерации в 2021 г. по сравнению с 2020 г.: в апреле на территории Европейской части России (на 2.1 тыс. км²), в мае на территории Уральского федерального округа (на 6.7 тыс. км²) и

Сибирского федерального округа (на 8.4 тыс. км²), в июле и августе в районе Дальневосточного федерального округа (на 18.4 и 27 тыс. км²).

Был проведен анализ вклада объемов эмиссий CO, CO₂, PM_{2.5}, обусловленных сгоранием биомассы на территориях крупных регионов в статистику общероссийских выбросов по всем месяцам пожароопасного периода с апреля по октябрь, а также произведено сравнение данных 2021 г. с прошлым 2020 г. Выявлено, что в апреле 2021 г. вклад эмиссий на территории СФО в ежегодные общие выбросы от природных пожаров снизился на 32%, в то время как в ЕЧР произошло увеличение вклада эмиссий в общероссийские на 21%. В мае 2021 г. на территории УрФО вклад эмиссий вырос на 44.9%. Для территории СФО в 2021 г. характерна тенденция к снижению объемов эмиссий, исключением стал июнь, когда вклад объемов выбросов вырос на 23.5%. Вклад эмиссий на территории ДФО в июле и августе 2021 г. вырос на 9–27% в сравнении с прошлогодним пожарным периодом.

В результате анализа изменений температур земной поверхности, зарегистрированных по данным прибора AIRS (спутник Aqua) с марта по июнь 2021 г., выявлены тепловые аномалии, для которых превышения значений температур на

территории УрФО достигали 8 К, а в районе республики Саха (Якутия) до 6.5 К по сравнению с данными 2003–2020 гг. Такие высокие температуры, преобладавшие на данной территории, привели к аномальному увеличению числа очагов природных пожаров и их быстрому распространению в мае на территории УрФО и в июле-августе на территории республики Саха (Якутия), что в свою очередь свидетельствует о взаимосвязи тепловых аномалий с обострением пожароопасной ситуации.

Анализ данных общего содержания СО по данным прибора AIRS и прибора TROPOMI показал различную чувствительность к изменениям СО от сжигания биомассы в июле 2021 г., требующую более детальное изучение с применением численного моделирования и данных наземных наблюдений.

По данным TROPOMI выявлены значения концентраций метана в период сильных пожаров (июль 2021 г.) на территории республики Саха (Якутия) до 1895 ppb.

Вариации индекса аэрозоля (AI) по данным прибора TROPOMI в июле 2021 г. на территории республики Саха (Якутия) позволили обнаружить наличие и распространение мелкодисперсных частиц, выброшенных в атмосферу в результате горения биомассы.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности использования космических данных для оценки пространственно-временной динамики очагов возгорания, площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных газов от природных пожаров, а также для проведения исследований изменения газового состава атмосферы в период распространения сильных пожаров и их влияния на климат планеты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность академику РАН В.Г. Бондур за научное руководство, полезные обсуждения и советы при проведении исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.

Бондур В.Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6.

С. 21–35.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>

Бондур В.Г., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л. Космический мониторинг изменчивости площадей природных пожаров и эмиссий вредных примесей в атмосферу на территории различных регионов России за 20-летний период // Докл. АН. 2021 (6). Т. 500. № 2. С. 106–112.

<https://doi.org/10.31857/S2686739721100042>

Бондур В.Г., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л., Феоктистова Н.В. Космический мониторинг многолетних природных пожаров и объемов вызываемых ими эмиссий вредных примесей в воздушную среду Австралии // Исслед. Земли из космоса. 2021(а). № 1. С. 1–16.

<https://doi.org/10.31857/S0205961421010048>

Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2020(а). № 4. С. 3–17.

<https://doi.org/10.31857/S0205961420040028>

Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Докл. АН. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477.

<https://doi.org/10.7868/S0869565216040186>

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 // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55.

<https://doi.org/10.7868/S020596141803003X>

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 // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.

<https://doi.org/10.7868/S0205961416060105>

Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А. Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Докл. АН. 2020(б). Т. 492. № 1. С. 99–106.

<https://doi.org/10.31857/S2686739720050047>

Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Кладов В.Л., Гордо К.А. Аномальная изменчивость пространственно-временных распределений природных пожаров и эмиссий вредных примесей на территории Европы по данным космического мониторинга // Докл. АН. 2019(а). Т. 485. № 6. С. 745–749.

<https://doi.org/10.31857/S0869-56524856745-749>

Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В. Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2019(б). № 3. С. 13–32.

<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>

Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л. Исследование динамики природных пожаров на территории Российской Федерации с 2001 по 2020 гг. с учетом воздействия климатических факторов // Исслед. Земли из космоса.

2021. № 4. С. 1–15
<https://doi.org/10.31857/S0205961421040072>
- Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации* / Климатический центр Росгидромета. СПб. 2017. 106 с.
- Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С.* Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокировками // Докл. РАН. Науки о Земле 2020. Т. 495. № 2. С. 61–66.
<https://doi.org/10.31857/S2686739720120087>
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч.* Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. АН, Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 150–165.
- Мохов И.И., Чернокульский А.В., Школьник И.М.* Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // Докл. АН. 2006. Т. 11. № 6. С. 808–811.
- Черепанова Е.В., Феоктистова Н.В., Чудакова М.А.* Анализ по космическим данным ТРОПОМИ аномалий концентраций метана над выгоревшими в 2018–2019 гг. территориями бореально-арктической зоны Восточной Сибири // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 63–77.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050048>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L.* Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia // Front. Earth Sci. 2021. 8:617252.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.617252>
- Bowman K., Henze D.K.* Attribution of direct ozone radiative forcing to spatially resolved emissions // Geophys. Res. Lett. 2012. 39 (22), L22704.
<https://doi.org/10.1029/2012GL053274>
- Bradstock R., Davies I., Price O., Cary G.* Effects of Climate Change on Bushfire Threats to Biodiversity, Ecosystem Processes and People in the Sydney Region. Final Report to the New South Wales Department of Environment and Climate Change: Climate Change Impacts and Adaptation Research Project 50831. 2008, p. 65.
- Buchholz R.R., Worden H.M., Park M., Francis G., Deeter M.N., Edwards D.P., ... Kulawik S.S.* Air pollution trends measured from Terra: CO and AOD over industrial, fire-prone, and background regions // Remote Sensing of Environment. 2021. 256, 112275.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112275>
- Certini G.* Effects of fire on properties of forest soils: a review // Oecologia 143, 1–10 (2005).
<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Crockett J.L., Leroy Westerling, A.* Greater temperature and precipitation extremes intensify Western, U.S. droughts, wildfire severity, and sierra Nevada tree mortality // J. Clim. 2018, 31, 341–354.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0254.1>
- Ding K., Liu J., Ding A., Liu Q., Zhao T.L., Shi J., Han Y., Wang H., Jiang F.* Uplifting of carbon monoxide from biomass burning and anthropogenic sources to the free troposphere in East Asia. Atmos. Chem. Phys. 2015, 15, 2843–2866.
<https://doi.org/10.5194/acp-15-2843-2015>
- Edwards D.P., Emmons L.K., Hauglustaine D.A., Chu D.A., Gille J.C., Kaufman Y.J., Pétron G., Yurgano, L.N., Giglio V.L., Deeter M.N., Yudi V., Ziskin N.D.C., Warner J., Lamarque J.-F., Francis G.L., Ho S.P., Mao D., Chen J., Grech E.I., Drummond O.J.R.* Observations of carbon monoxide and aerosols from the terra satellite: northern hemisphere variability // J. Geophys. Res.-Atmos. 2004. 109 (D24) /
<https://doi.org/10.1029/2004JD004727>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. P. 168–182.
- Froitzheim N., Majka J., Zastrozhnov D.* Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021; 118 (32): e2107632118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2107632118>
- Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41.
<https://doi.org/10.1071/WF03054>
- He Y., Chen F., Jia H., Wang L., Bondur V.G.* Different drought legacies of rain-fed and irrigated croplands in a typical Russian agricultural region // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 11. P. 1700.
<https://doi.org/10.3390/rs12111700>
- Holloway T., Levy II, H., Kasibhatla P.* Global distribution of carbon monoxide // J. Geophys. Res. 2000. 105 (D10), 12, 123–12, 147.
<https://doi.org/10.1029/1999JD901173>
- Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., Holden Z.A., Brown T.J., Williamson G.J., Bowman D.M.J.S.* Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 // Nat. Commun. 2015, 6, 1–11.
<https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
- Kulmala Markku, Hanna K. Lappalainen, Tuukka Petäjä, Veli-Matti Kerminen, Yrjö Viisanen, Gennady Matvienko, Vladimir Melnikov, Alexander Baklanov, Valery Bondur, Nikolay Kasimov, Sergej Zilitinkevich.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Program: grand challenges in the Arctic-Boreal context // Geography. Environment. Sustainability. 2016. № 2(9). P. 5–18.
https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_01
- Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kurten T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Hari P., Sorvari S., Bäck J., Bondur V., Kasimov, N., Kotlyakov V., Matvienko G., Baklanov A., Guo H.D., Ding A., Hansson H.-C., Zilitinkevich S.:* Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative // Atmos. Chem. Phys., 2015.15, 13085–13096.
<https://doi.org/10.5194/acp-15-13085-2015>
- Lappalainen Hanna K., Tuukka Petäjä, Timo Vihma, ..., Valery Bondur, Marina Tsidilina, ...* Overview: Recent advances on the understanding of the Northern Eurasian environments and of the urban air quality in China – Pan Eurasian Experiment (PEEX) program perspective // Preprint Atmos. Chem. Phys., ACP-2021-341.
<https://doi.org/10.5194/acp-2021-341>
- Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., Kurten T., Baklanov A., Shvidenko A., ... Bondur V., Zilitinkevich S., Kulmala M.:* Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a

- holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the Northern Eurasian region, *Atmos. Chem. Phys.*, 2016. 16, 14421–14461.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-14421-2016>
- Lelieveld J., Gromov S., Pozzer A., Taraborrelli D.*, Global tropospheric hydroxyl distribution, budget and reactivity // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. 16, 12477–12493.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-12477-2016>
- Li K., Jacob D.J., Liao H., Shen L., Zhang Q., Bates K.H.* Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2019. U. S. A. 116, 422–427.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1812168116>
- Liu W., Lu F., Luo Y. et al.* Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China. *Ecol. Evol.* 2017; 7: 6220–6230.
<https://doi.org/10.1002/ece3.3188>
- Liu Y., Stanturf J., Goodrick S.* Trends in global wildfire potential in a changing climate. *For. Ecol. Manag.* 2010, 259, 685–697.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.002>
- McClure C.D., Jaffe D.A.* US particulate matter air quality improves except in wildfire-prone Areas // *P. Natl. Acad. Sci.* 2018. USA 115 (31), 7901–7906.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1804353115>
- Myhre G., Shindell D., Br'eon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Narita D., Gavrilyeva T., Isaev A.* Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem // *Polar Science.* 2020. 100573.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100573>
- Pellegrini A., Ahlström A., Hobbie S. et al.* Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature* 553, 194–198 (2018).
<https://doi.org/10.1038/nature24668>
- Prather M.J.*, Lifetimes and time scales in atmospheric chemistry // *Phil. Trans. R. Soc. A* 2007. 365, 1.705–1.726.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2040>
- Ramanathan V., Carmichael G.* Global and regional climate changes due to black carbon // *Nat. Geosci.* 2008. 1, 221–227.
<https://doi.org/10.1038/ngeo156>
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change.* 1980. V. 2. № 3. P. 207–247.
- Shirazi Z., Wang L. and Bondur V.G.* Modeling Conditions Appropriate for Wildfire in South East China – A Machine Learning Approach. *Front. Earth Sci.* 2021. 9:622307.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.622307>
- Tian B., Manning E., Fetzer E.J., Olsen E., Wong S., Susskind J., Iredell L.* 2013: AIRS/AMSU/HSB version 6 level 3 product user guide. NASA JPL Tech. Rep., 40 pp.
https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v6_docs/v6releasedocs-1/V6_L3_User_Guide.pdf
- Tomshin O.A., Solov'yev V.S.* Aerosol index variations caused by severe forest fires in Siberia // 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2014.
<https://doi.org/10.1117/12.2074610>
- Trauernicht C.* Vegetation–Rainfall interactions reveal how climate variability and climate change alter spatial patterns of wildland fire probability on Big Island, Hawaii. *Sci Total Environ.* 2019 Feb 10;650(Pt 1): 459–469.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.347>
- Zhong S., Yu L., Heilman W.E. et al.* Synoptic weather patterns for large wildfires in the northwestern United States—a climatological analysis using three classification methods // *Theor Appl Climatol.* 2020. 141, 1057–1073.
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03235-y>
- Zweers Stein D.C.* Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor of the UV Aerosol Index // SRON. 2018. 30 p.

Strong Wildfires in Russia in 2021 Detected Using Satellite Data

O. S. Voronova¹, K. A. Gordo¹, A. L. Zima¹, and N. V. Feoktistova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

The features of large wildfires and CO, CO₂, and PM_{2.5} emissions due to them in Russia on the whole and in its individual regions were studied on the base of satellite monitoring data for the periods from April to October in 2001–2021. It has been found that in July and August 2021 monthly average values of the burnt areas for the whole territory of Russia exceeded similar values registered for those months for the period between 2001 and 2020 by 25 and 24.5 thousand km², respectively. The areas of burned-out territories in large Russian regions in 2021 were greater than those in 2020 as follows: April - in the European part of Russia (by 2.1 thous. km²); May - in the Ural (by 6.7 thous. km²) and Siberian (8.4 thous. km²) federal regions, June and July - in the Far East Federal Region (by 18.4 and 27 thous. km², respectively). It has been found that in some months of 2021 an increase in the contribution of emissions caused by wildfires in the territories of these regions into the total emissions in the country reached 44.9% compared to 2020. An analysis of the atmospheric composition during strong wildfires in the Sakha Yakutia Republic in July 2021 was carried out using satellite data. This analysis have allowed us to detect the regions of extra high CO and CH₄ concentrations as well as of AI aerosol index increase from 1.4 to 3.7.

Keywords: remote sensing, satellite data, satellite monitoring, wildfires, emissions, aerosol index, thermal anomalies

REFERENCES

- Bondur V.G.* Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 1078–1091.
<https://doi.org/10.1134/S0001433816090103>
- Bondur V.G.* Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1039–1048.
<https://doi.org/10.1134/S0001433811090040>
- 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. V. 466. № 2. P. 148–152.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X16020045>
- 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. V. 54. № 9. P. 955–965.
<https://doi.org/10.1134/S0001433818090104>
- 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. V. 53. № 9. P. 859–874.
<https://doi.org/10.1134/S0001433817090055>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L.* Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia // *Front. Earth Sci.* 2021. 8: 617252.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.617252>
- Bondur V.G., Mokhov I.I., Voronova O.S., Sitnov S.A.* Satellite Monitoring of Siberian Wildfires and Their Effects: Features of 2019 Anomalies and Trends of 20-Year Changes // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 492. № 1. P. 370–375.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X20050049>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Cherepanova E.V.* Satellite monitoring of wildfire impacts on the conditions of various types of vegetation cover in the federal districts of the Russian Federation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 9. P. 1238–1253.
<https://doi.org/10.1134/S000143381909010X>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Kladov V.L., Gordo K.A.* Irregular Variability of Spatiotemporal Distributions of Wildfires and Emissions of Harmful Trace Gases in Europe Based on Satellite Monitoring Data // *Doklady Earth Sciences*, 2019. V. 485. Part 2. P. 461–464.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X19040202>
- Bondur V.G., Voronova O.S., Cherepanova E.V., Tsidilina M.N., Zima A.L.* Spatiotemporal Analysis of Multi-Year Wildfires and Emissions of Trace Gases and Aerosols in Russia, Based on Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020. V. 56. № 12. P. 1457–1469.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820120348>
- Bondur V.G., Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L.* Satellite Monitoring of the Variability of Wildfire Areas and Emissions of Harmful Gas Components into the Atmosphere for Various Regions of Russia over a 20-Year Period // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 500. Part 2. P. 890–894.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X21100044>
- Bondur V.G., Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L., Feoktistova N.V.* Kosmicheskiy monitoring mnogoletnikh prirodnykh pozharov i obyemov vyzhyvayemykh imi emissiy vrednykh primesey v vozdushnuyu sredu Avstralii (Satellite Monitoring of Multiannual Wildfires and Related Harmful Trace Gas Emissions into the Air Environment of Australia) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2021. № 1. P. 25–40.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421010048> (In Russian)
- Bowman, K., Henze, D.K.* Attribution of direct ozone radiative forcing to spatially resolved emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2012. 39 (22), L22704.
<https://doi.org/10.1029/2012GL053274>
- Bradstock R., Davies I., Price O., Cary G.* Effects of Climate Change on Bushfire Threats to Biodiversity, Ecosystem Processes and People in the Sydney Region. Final Report to the New South Wales Department of Environment and Climate Change: Climate Change Impacts and Adaptation Research Project 50831. 2008, p. 65.
- Buchholz R.R., Worden H.M., Park M., Francis G., Deeter M.N., Edwards D.P., ... Kulawik S.S.* Air pollution trends measured from Terra: CO and AOD over industrial, fire-prone, and background regions // *Remote Sensing of Environment*. 2021. 256, 112275.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112275>
- Certini G.* Effects of fire on properties of forest soils: a review // *Oecologia* 143, 1–10 (2005).
<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Cherepanova E.V., Feoktistova N.V., Chudakova M.A.* Analysis of Methane Concentration Anomalies over Burned Out Territories of the Boreal and Arctic Zone of Eastern Siberia in 2018–2019 Based on TROPOMI Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. № 12. P. 1470–1481.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820120385>
- Crockett J.L., Leroy Westerling A.* Greater temperature and precipitation extremes intensify Western, U.S. droughts, wildfire severity, and sierra Nevada tree mortality // *J. Clim.* 2018, 31, 341–354.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0254.1>
- Ding K., Liu J., Ding A., Liu Q., Zhao T.L., Shi J., Han Y., Wang H., Jiang F.* Uplifting of carbon monoxide from biomass burning and anthropogenic sources to the free troposphere in East Asia. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15, 2843–2866.
<https://doi.org/10.5194/acp-15-2843-2015>
- Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii (Report on Climate Risks in the Territory of the Russian Federation) / Klimaticheskii tsentr Rosgidrometa.* SPb. 2017. 106 p.
- Edwards D.P., Emmons L.K., Hauglustaine D.A., Chu D.A., Gille J.C., Kaufman Y.J., Petron G., Yurgano L.N., Giglio V.L., Deeter M.N., Yudi V., Ziskin N.D.C., Warner J., Lamarque J.-F., Francis G.L., Ho S.P., Mao D., Chen J., Grech E.I., Drummond O.J.R.* Observations of carbon monoxide and aerosols from the terra satellite: northern hemisphere variability // *J.*

- Geophys. Res.-Atmos. 2004. 109 (D24).
<https://doi.org/10.1029/2004JD004727>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. P. 168–182.
- Froitzheim N., Majka J., Zastrozhnov D.* Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021; 118 (32): e2107632118
<https://doi.org/10.1073/pnas.2107632118>
- Giglio L., Schroeder W., Justice C O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41.
<https://doi.org/10.1071/WF03054>
- He Y., Chen F., Jia H., Wang L., Bondur V.G.* Different drought legacies of rain-fed and irrigated croplands in a typical Russian agricultural region // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 11. P. 1700.
<https://doi.org/10.3390/rs12111700>
- Holloway T., Levy II, H., Kasibhatla P.* Global distribution of carbon monoxide // J. Geophys. Res. 2000. 105 (D10), 12, 123–12, 147.
<https://doi.org/10.1029/1999JD901173>
- Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., Holden Z.A., Brown T.J., Williamson G.J., Bowman D.M.J.S.* Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 // Nat. Commun. 2015, 6, 1–11.
<https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
- Kulmala Markku, Hanna K. Lappalainen, Tuukka Petäjä, Veli-Matti Kerminen, Yrjö Viisanen, Gennady Matvienko, Vladimir Melnikov, Alexander Baklanov, Valery Bondur, Nikolay Kasimov, Sergej Zilitinkevich.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Program: grand challenges in the Arctic-Boreal context // Geography. Environment. Sustainability. 2016. № 2(9). P. 5–18.
https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_01
- Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kurten T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Hari P., Sorvari, S., Bäck J., Bondur V., Kasimov N., Kotlyakov V., Matvienko G., Baklanov A., Guo, H.D., Ding A., Hansson H.-C., Zilitinkevich S.* Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative // Atmos. Chem. Phys., 2015.15, 13085–13096.
<https://doi.org/10.5194/acp-15-13085-2015>
- Lappalainen Hanna K., Tuukka Petäjä, Timo Vihma, ..., Valery Bondur, Marina Tsidilina,* Overview: Recent advances on the understanding of the Northern Eurasian environments and of the urban air quality in China – Pan Eurasian Experiment (PEEX) program perspective // Preprint Atmos. Chem. Phys., ACP-2021-341.
<https://doi.org/10.5194/acp-2021-341>
- Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., Kurten T., Baklanov A., Shvidenko A., ... Bondur V., Zilitinkevich S., Kulmala M.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the Northern Eurasian region, Atmos. Chem. Phys., 16, 14421–14461.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-14421-2016>, 2016
- Lelieveld J., Gromov S., Pozzer A., Taraborrelli D.* Global tropospheric hydroxyl distribution, budget and reactivity // Atmos. Chem. Phys. 2016. 16, 12477–12493.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-12477-2016>
- Li K., Jacob D.J., Liao H., Shen L., Zhang Q., Bates, K.H.* Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China // Proc. Natl. Acad. Sci. 2019. U. S. A. 116, 422–427.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1812168116>
- Liu W., Lu F., Luo Y. et al.* Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China. Ecol Evol. 2017; 7: 6220–6230.
<https://doi.org/10.1002/ece3.3188>
- Liu Y., Stanturf J., Goodrick S.* Trends in global wildfire potential in a changing climate. For. Ecol. Manag. 2010, 259, 685–697.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.002>
- McClure C.D., Jaffe D.A.* US particulate matter air quality improves except in wildfire-prone Areas // P. Natl. Acad. Sci. 2018. USA 115 (31), 7901–7906.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1804353115>
- Mokhov I.I., Bondur V.G., Sitnov S.A., Voronova O.S.* Satellite Monitoring of Wildfires and Emissions into the Atmosphere of Combustion Products in Russia: Relation to Atmospheric Blockings // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 495. Part 2. P. 921–924.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X20120089>
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch.* Estimates of possible regional hydrologic regime changes in the 21st century based on global climate models // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2003. T. 39. № 2. C. 130–144.
- Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Shkolnik I.M.* Regional model assessments of fire risks under global climate changes. Doklady Earth Sciences. 2006. 411(2), 1485–1488.
<https://doi.org/10.1134/s1028334x06090340>
- Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Narita D., Gavrilyeva T., Isaev A.* Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem // Polar Science. 2020. 100573.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100573>
- Pellegrini A., Ahlström A., Hobbie S. et al.* Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. Nature 553, 194–198 (2018).
<https://doi.org/10.1038/nature24668>
- Prather M.J.* Lifetimes and time scales in atmospheric chemistry // Phil. Trans. R. Soc. A 2007. 365, 1.705–1.726.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2040>
- Ramanathan V., Carmichael G.* Global and regional climate changes due to black carbon // Nat. Geosci. 2008. 1, 221–227.
<https://doi.org/10.1038/ngeo156>

- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change*. 1980. V. 2. № 3. P. 207–247.
- Shirazi Z., Wang L. and Bondur V.G.* Modeling Conditions Appropriate for Wildfire in South East China – A Machine Learning Approach. *Front. Earth Sci.* 2021. 9:622307. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.622307>
- Tian B., Manning E., Fetzer E.J., Olsen E., Wong S., Susskind J., Iredell L.* 2013: AIRS/AMSU/HSB version 6 level 3 product user guide. NASA JPL Tech. Rep., 40 p., https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v6_docs/v6releasedocs-1/V6_L3_User_Guide.pdf.
- Tomshin O.A., Solovyev V.S.* Aerosol index variations caused by severe forest fires in Siberia // 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2074610>
- Trauernicht C.* Vegetation–Rainfall interactions reveal how climate variability and climate change alter spatial patterns of wildland fire probability on Big Island, Hawaii. *Sci Total Environ.* 2019 Feb 10; 650(Pt 1): 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.347>.
- Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L.* Issledovaniye dinamiki prirodnykh pozharov na territorii Rossiyskoy Federatsii s 2001 po 2020 gody s uchotom vozdeystviya klimaticheskikh faktorov (Studying the Dynamics of Wildfires in Russia in 2001–2020 Taking into Account Climatic Factors) // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2021. № 4. P. 1–15 <https://doi.org/10.31857/S0205961421040072>.
- Zhong S., Yu L., Heilman W.E. et al.* Synoptic weather patterns for large wildfires in the northwestern United States—a climatological analysis using three classification methods // *Theor Appl Climatol.* 2020. 141, 1057–1073. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03235-y>
- Zweers Stein D.C.* Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor of the UV Aerosol Index // *SRON*. 2018. 30 p.L

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СОЯ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2022 г. А. Г. Андреев*

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток, Россия

**E-mail: andreev@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

Течение Соя формируется трансформированными субтропическими водами Цусимского течения, поступающими из Японского моря через пролив Лаперуза, распространяется вдоль северного побережья о-ва Хоккайдо и поступает в Тихий океан через проливы Екатерины и Кунашир. Проведен анализ спутниковых данных (1993–2019 гг.) по уровню моря, скорости геострофических течений, температуры поверхностных вод и концентрации хлорофилла в южной части Охотского моря, в зоне пролива Лаперуза (Японское море) и в южном прикурильском районе Тихого океана. Установлено, что увеличение разности уровня моря между Японским морем и Тихим океаном приводит к усилению течения Соя. Основной вклад в изменение разности уровня между Тихим океаном и Японским морем в осенний период вносят антициклонические вихри и меандры Субарктического фронта в Тихом океане. Увеличение (снижение) проникновения трансформированных субтропических вод через пролив Лаперуза сопровождается повышением (понижением) температуры поверхностного слоя вод в южной части Охотского моря ($r = 0.67$, 2000–2019 гг.) и понижением (повышением) концентрации хлорофилла в прикурильском районе Тихого океана ($r = -0.70$, 1998–2019 гг.) в сентябре–октябре.

Ключевые слова: уровень моря, температура морской воды, концентрация хлорофилла, течение Соя, Охотское море

DOI: 10.31857/S0205961422010031

ВВЕДЕНИЕ

Прибрежное течение Соя в южной части Охотского моря формируется трансформированными субтропическими водами Цусимского течения, поступающими из Японского моря через пролив Лаперуза (рис. 1). В качестве движущей силы течения рассматривается разность уровней моря между Японским и Охотским морями (Ohshima et al., 2017). В период максимального развития течения Соя (август–октябрь) теплые и соленые воды прослеживаются у побережья о-ва Хоккайдо и у южных Курильских островов (The Okhotsk Sea..., 1995). Из зоны южных Курильских островов воды течения Соя могут проникать в центральную часть Курильской котловины Охотского моря в виде поперечных струй (стримеров) по периферии антициклональных вихрей (Жабин, Лукьянова, 2011). Теплые воды Соя обеспечивают многообразие морских биоресурсов в зоне южных Курильских островов (Буслов, 2013). Охлаждение высокосоленных вод течения Соя в зимний период приводит к прямой вентиляции глубинных вод и повышению концентрации растворенного кислорода в промежуточном слое Охотского моря (Андреев, Жабин, 2000).

В данной работе проведен анализ спутниковых данных по уровню моря, скорости геострофических течений, температуре вод и концентрации хлорофилла в южной части Охотского моря, в зоне пролива Лаперуза (Японское море) и в южном прикурильском районе Тихого океана. Показано влияние вод течения Соя на температуру поверхностного слоя вод и концентрацию хлорофилла в исследуемом районе в осенний период.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наши исследования основываются на информации по уровню моря и скоростям геострофических течений с пространственным разрешением 0.25 на 0.25 град (для исследуемого района: ~30 км по долготе и ~20 км по широте) и временным разрешением 1 день, полученной по данным спутниковых измерений (база данных “Коперникус”, <http://marine.copernicus.eu>) с 1993 по 2019 г. Объединенный массив “Коперникус” включает в себя скорректированные альтиметрические данные, полученные со спутников Cryosat-2, Jason-1, Jason-2, Envisat, TOPEX/Poseidon, GFO-1, ERS-1 и ERS-2. Для коррекции альтиметрических данных применяется глобальная приливная модель. По-

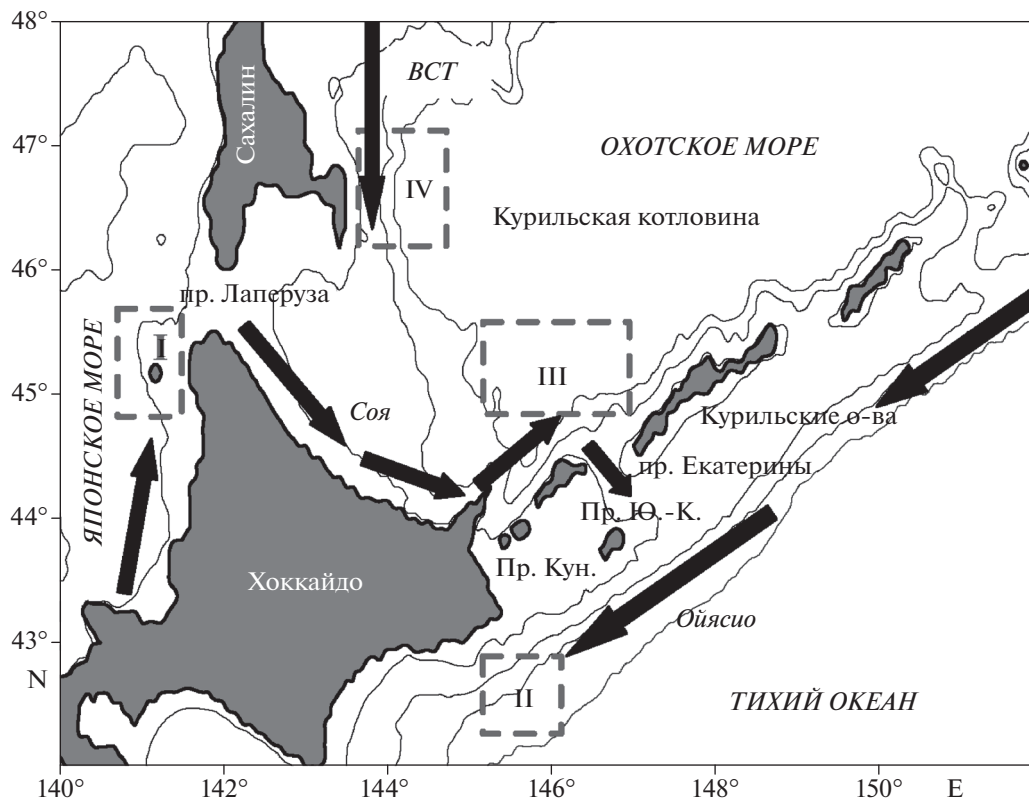


Рис. 1. Схема течений в исследуемом районе. I–IV – зоны, где исследовалось изменение уровня моря (SSH); пр. Ю.-К. – пролив Южно-Курильский, пр. Кун. – пролив Кунаширский.

правки на изменения уровня моря, вызванные изменением атмосферного давления, рассчитываются по уравнению обратного барометра. При расчете геострофических течений используется средняя динамическая топография океана MDT CNES-CLS-09. Величина ошибки спутниковых данных по уровню моря (SSH) составляет 1–2 см на расстоянии, превышающем 20 км от берега (Ablain et al., 2015).

При анализе пространственно-временной изменчивости температуры поверхностных вод (SST) использованы спутниковые снимки с пространственным разрешением 1 км, полученные с сайта GHRSSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature) (PO.DAAC – GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis). Данные GHRSSST основываются на спутниковых данных, полученных с микроволнового сканирующего радиометра EOS (AMSR-E), микроволнового радиометра WindSat и спектро-радиометра MODIS Aqua/Terra. Для нахождения связи между поступлением трансформированных субтропических вод через пролив Лаперуза и температурой поверхностного слоя вод в южной части Охотского моря использовались SST данные Центра диагностики климата (<http://www.esrl.noaa.gov>) с пространственным разрешением 1.9 на 1.9 град

(~220 км по долготе и ~150 км по широте). Наблюдалось хорошее согласие между SST данными Центра диагностики климата и GHRSSST. По данным Центра диагностики климата температура поверхностного слоя вод в зоне (44.8–46.7 °N, 142.5–144.4 °E) была равна 9.9°C (12.7°C) в середине октября 2017 г. (2018 г.). По данным GHRSSST в середине октября 2017 г. (2018 г.) температура вод была равна 9.2°C (12.0°C) в центре и 10.3°C (13.0°C) по краям зоны. При анализе пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла использованы данные спутникового спектро-радиометра MODIS Aqua/Terra с пространственным разрешением 4 км (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>).

ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ МОРЯ И СКОРОСТИ ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

В исследуемом районе наибольшая внутригодовая изменчивость уровня моря (SSH) наблюдалась в Японском море к западу от пролива Лаперуза (16 см, 1993–2019 г.), а наименьшая в юго-восточной части Охотского моря и в Южно-Курильском районе Тихого океана (7 см) с минимальными (максимальными) величинами SSH в

марте—апреле (августе—октябре) (рис. 2, *а*). Значительное повышение SSH в Японском море в августе—октябре сопровождалось увеличением скорости геострофических течений в зоне пролива Лаперуза (45.4° – 46.1° N, 141.6° – 141.9° E) (рис. 2, *б*). В октябре—декабре под воздействием ветров северных румбов усиливается, направленное на юг вдоль восточного побережья о-ва Сахалин, Восточно-Сахалинское течение, переносящее воды Амурского лимана с низкой соленостью и плотностью (Андреев, 2017). Это приводит к повышению SSH в юго—западной части Охотского моря (рис. 2, *а*).

Теплые воды Соя ($SST = 14$ – 18°C) наблюдались вблизи северного побережья о-ва Хоккайдо и в зоне южных Курильских островов в сентябре—октябре 2019 г. (рис. 3, *а*, 3, *б*). В ноябре 2019 г. поступление вод Восточно-Сахалинского течения в южную часть Охотского моря значительно понизило SST вблизи северного побережья о-ва Хоккайдо до 2 – 4°C (рис. 3, *в*). В октябре—ноябре 2019 г. воды Соя проникали из зоны южных Курильских островов в центральную часть Курильской котловины Охотского моря по южной периферии антициклонических вихрей, центры которых были расположены вблизи точек с координатами 46.3° с.ш., 147.4° в.д. и 46.0° с.ш., 144.6° в.д. На границе теплых вод Соя и холодных вод Восточно—Сахалинского течения наблюдалась грибовидная структура вод (рис. 3, *в*). Зона “гриба” характеризовалась повышенной SST (8 – 9°C) и пониженным SSH (30 – 33 см). Вблизи границ грибовидной структуры наблюдались холодные воды ($SST = 2$ – 3°C) с SSH равными 43 – 50 см. Из-за значительных горизонтальных градиентов SSH, скорости геострофических течений на западной, северной и южной периферии грибовидной структуры вод достигали 25 см/с. Ранее наличие грибовидных структур в южной части Охотского моря по данным спутниковых снимках в видимом диапазоне, рассматривая в качестве трассера лед, было показано в работе (Гинзбург, Федоров, 1994).

Анализ спутниковых данных показал, что скорости геострофических течений (U) в зоне пролива Лаперуза в осенний период определяются разностью в SSH между Японским морем и южным прикурильским районом Тихого океана (SSH (Яп. море) – SSH (Тихий океан)). Для сентября (рис. 2, *в*) и октября коэффициент корреляции между U и SSH (Яп. море) – SSH (Тихий океан) равен соответственно 0.67 и 0.60 (1993–2019 гг.).

Межгодовые изменения в разности уровня моря между Японским морем и Тихим океаном в сентябре и октябре, в основном, определяются изменениями SSH в Тихом океане (рис. 2, *в*). Для сентября—октября SSH в Японском море, юго-восточной части Охотского моря и в прикурильском

районе Тихого океана был равен соответственно 12.1 ± 3.9 (std) см, 6.5 ± 3.2 см и 7.9 ± 7.0 см (1993–2019 гг.). Стандартное квадратичное отклонение SSH в Тихом океане значительно выше, чем в Японском море и юго-восточной части Охотского моря.

Межгодовые изменения SSH в прикурильском районе Тихого океана были обусловлены меандрами Субарктического фронта и антициклоническими вихрями (АЦ), мигрирующими вдоль восточного побережья о-ва Хоккайдо и южных Курильских островов (Kusakabe et al., 2002). Меандры и АЦ вихри повышают SSH (рис. 4, *б*) и SST (рис. 5, *б*) вблизи восточного побережья о-ва Хоккайдо и в зоне южных Курильских проливов (42 – 44° N, 144 – 148° E) и, как следствие, понижают разность уровней моря между Японским морем и Тихим океаном, что уменьшает приток субтропических трансформированных вод в Охотское море. В сентябре—октябре 2014–2017 гг. АЦ вихри и меандры Субарктического фронта (высокие величины SSH) (рис. 4, *б*) блокировали вдоль склоновое течение Ойясио, переносящее воды прикурильского района Тихого океана с низкими величинами SST в юго-западном направлении (рис. 5, *а*), и способствовали появлению северо-восточного потока вод (положительные величины меридиональной и зональной компоненты геострофических течений) (рис. 4, *в*) вдоль восточного склона о-ва Хоккайдо. Это привело к повышению SST в зоне южных Курильских островов осенью 2014 г. (рис. 5, *б*).

ВЛИЯНИЕ ТЧЕНИЯ СОЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ХЛОРОФИЛЛА И ТЕМПЕРАТУРУ ВОД

Трансформированные субтропические воды течения Соя характеризуются повышенной температурой и низкими концентрациями биогенных элементов (азота, фосфора и кремния) (Андреев, Жабин, 2000). Увеличение/уменьшение притока вод течения Соя должно повышать/понижать температуру вод и снижать/увеличивать концентрацию хлорофилла (показатель биомассы автотрофного планктона) в южной части Охотского моря и в зоне южных Курильских островов в осенний период. На рис. 6, *а* показаны межгодовые изменения скорости геострофических течений в зоне пролива Лаперуза и концентрации хлорофилла в зоне южных Курильских островов в сентябре. Повышение/снижение разности SSH между Японским морем и Тихим океаном и, как следствие, увеличение/уменьшение притока субтропических трансформированных вод через пролив Лаперуза в Охотское море и из Охотского моря в Тихий океан приводит к уменьшению концентрации хлорофилла в южном прикурильском районе Тихого океана ($r = -0.70$, 1998–2019 гг.).

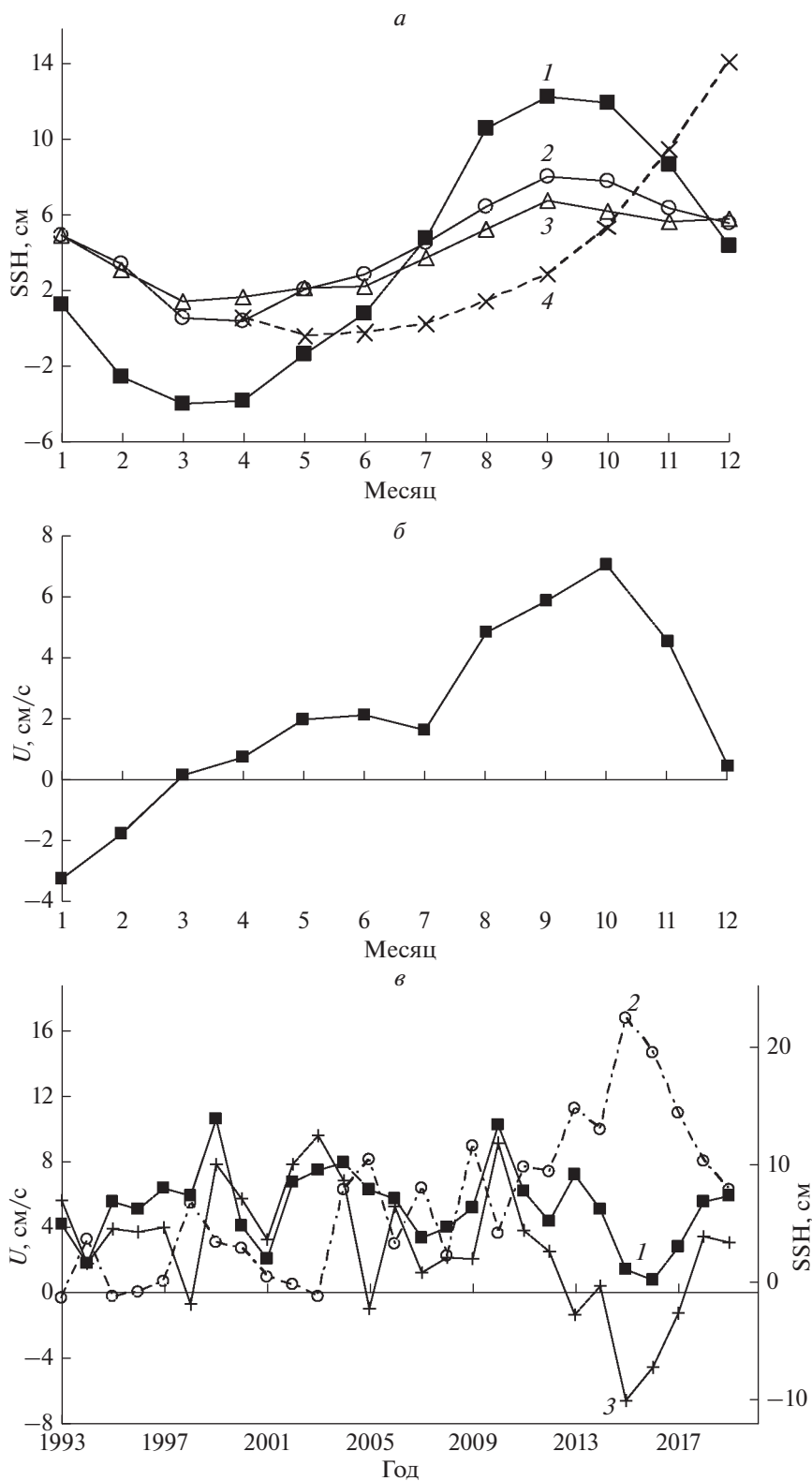


Рис. 2. *а* – внутригодовая изменчивость SSH по данным AVISO (1993–2019 гг.): 1 – Японское море (западнее пр. Лаперуза), 2 – Тихий океан (зона течения Ойясио), 3 и 4 – юго-восточная и юго-западная части Охотского моря (рис. 1); *б* – внутригодовая изменчивость зональной составляющей скорости геострофических течений (U) в зоне пролива Лаперуза; *в* – межгодовая изменчивость U в зоне пролива Лаперуза, SSH в Тихом океане и разности SSH между Японским морем и Тихим океаном в сентябре: 1 – U , 2 – SSH, 3 – разность SSH.

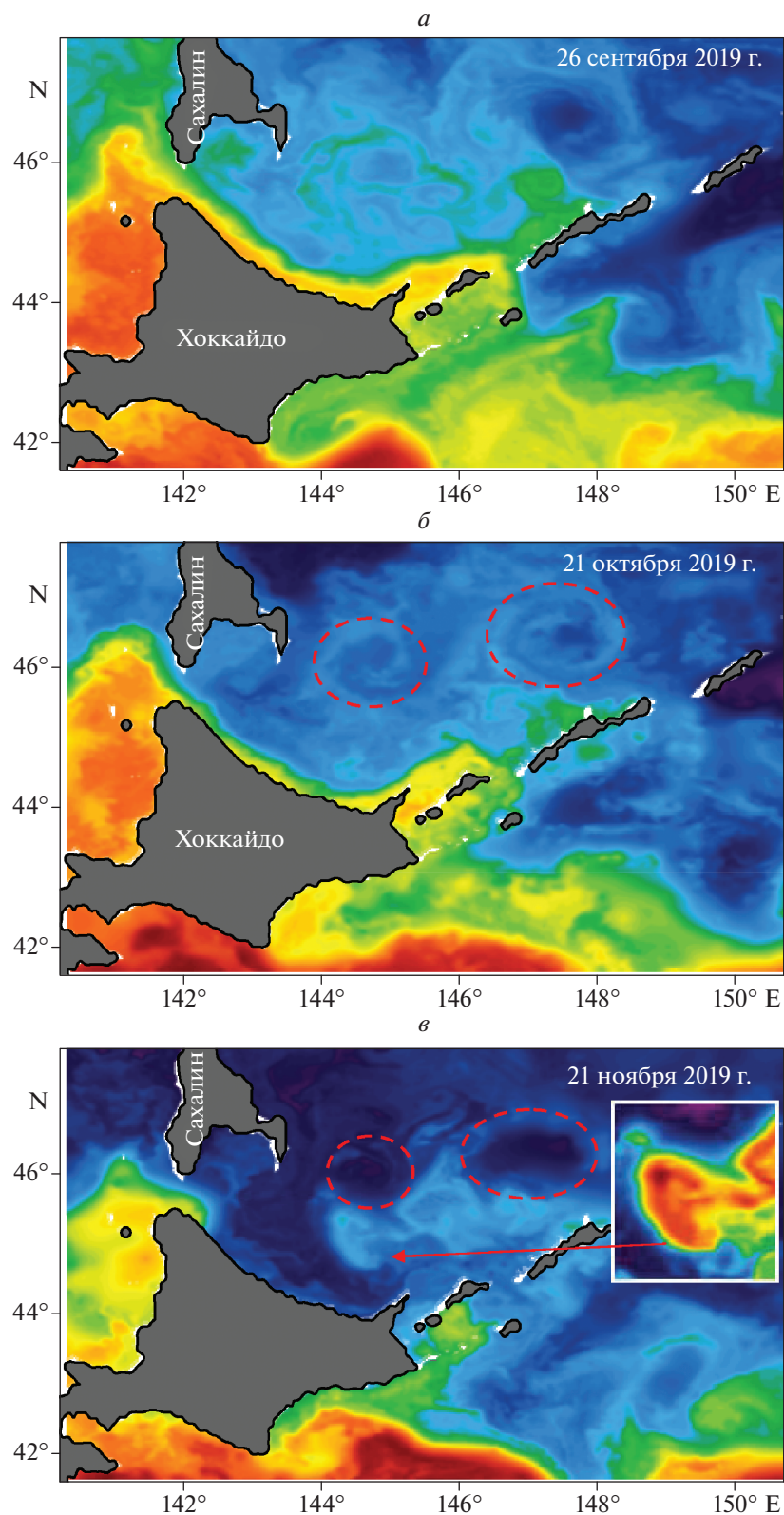


Рис. 3. *a–в* – распределение температуры в поверхностном слое вод по данным GHRSSST в сентябре, октябре и ноябре 2019 г. Холодным водам соответствует синий цвет, теплым водам – красный. Диапазон температур: 5°–20°C (*a, б*), 0°–15°C (*в*). Красной пунктирной линии выделены антициклонические вихри.

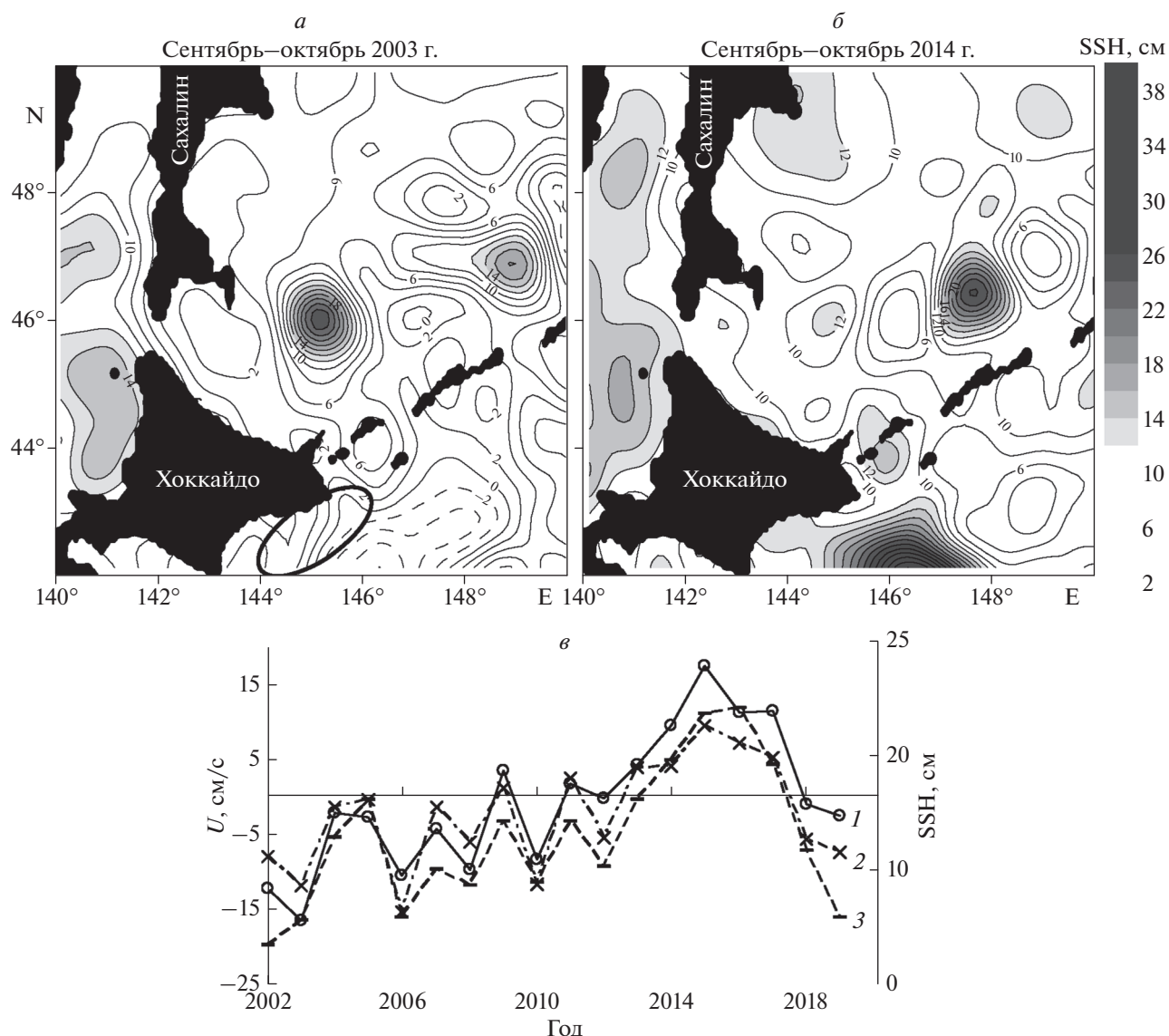


Рис. 4. *а, б* – распределение SSH в сентябре–октябре 2003 г. и в сентябре–октябре 2014 г.; межгодовые изменения SSH, меридиональной (*V*) и зональной (*U*) составляющих геострофических течений в Тихом океане вблизи восточного побережья о. Хоккайдо (район выделен на рис. 4, *а*): 1 – SSH, 2 – *V*, 3 – *U*.

Увеличение поступления вод через пролив Лаперуза в сентябре–октябре повышает SST в южной части Охотского моря в октябре ($r = 0.67$, 2000–2019 гг.) (рис. 6, *б*). В периоды повышенных величин SSH вблизи восточного побережья Хоккайдо и южных Курильских островов (2014–2017 гг.) (рис. 4, *в*) наблюдались повышенные концентрации хлорофилла (1,4 мкг/л) в южном прикурильском районе Тихого океана в сентябре (рис. 6, *а*) и низкая SST в южной части Охотского моря (10°C) в октябре (рис. 6, *б*).

Мезомасштабная циркуляция вод оказывает влияние на распределение вод течения Соя в южной части Охотского моря. Согласно результатов

(Жабин, Лукьянова, 2011), воды течения Соя проникают в область Курильской котловины Охотского моря из зоны южных Курильских островов в виде поперечных струй (стримеров) по периферии антициклональных вихрей. Распределения SST и карты векторов абсолютных геострофических течений (рис. 7, *а–в*), построенные по данным спутниковой альтиметрии, подтверждает этот вывод для конца сентября 2010 г. (рис. 7, *б*). В этот период времени воды течения Соя проникали в область глубоководной котловины от южных Курильских островов вдоль южной периферии антициклонических вихрей. В сентябре 2003 г. (рис. 7, *а*) воды Соя поступали от северо-восточ-

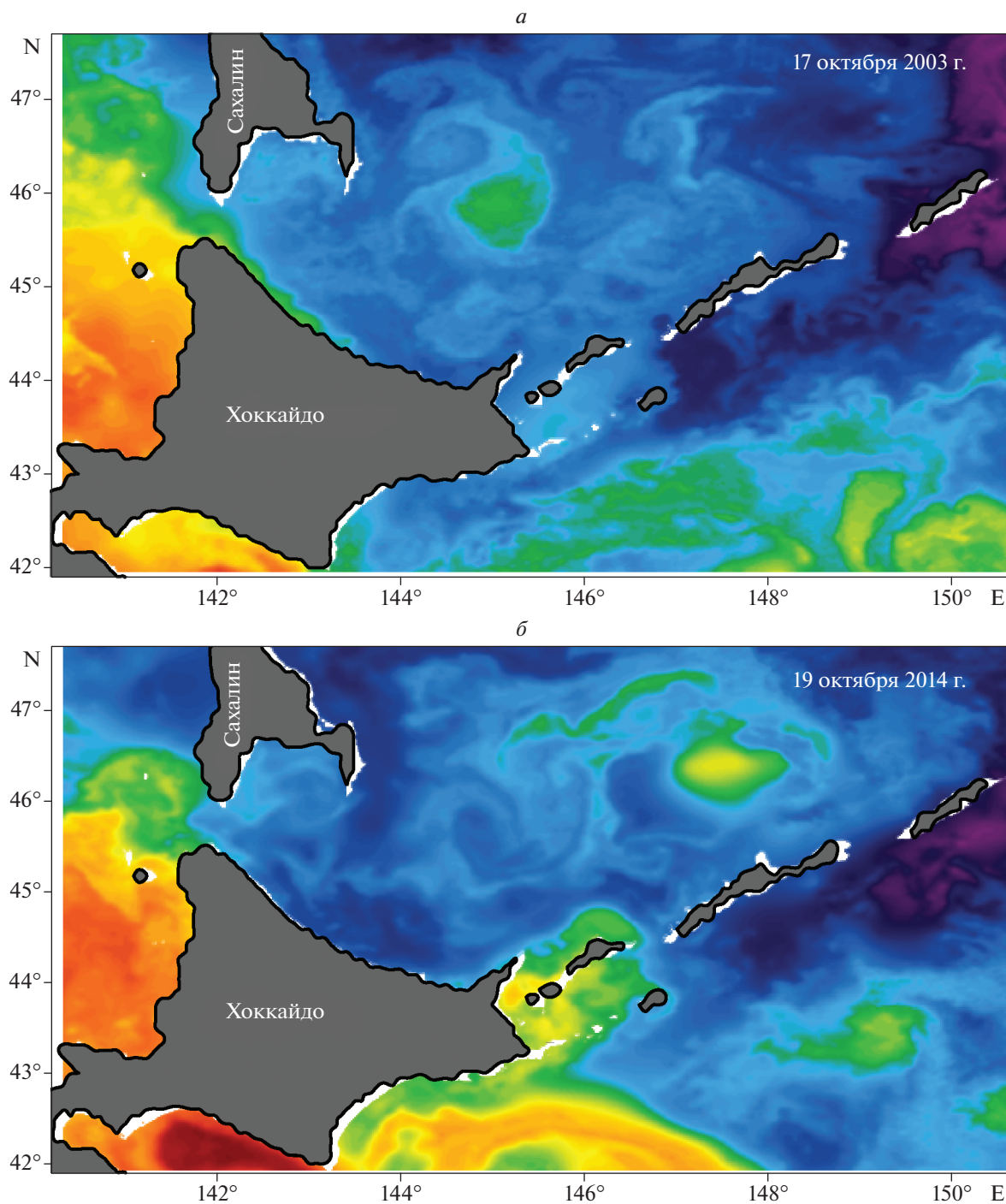


Рис. 5. а, б – распределение температуры в поверхностном слое вод по данным GHRSSST в октябре 2003 г. и октябре 2014 г. Диапазон температур: 5°–16°С.

ной оконечности о-ва Хоккайдо в северном направлении и затем захватывались АЦ вихрем с центром расположенным вблизи точки с координатами 45.8° с.ш., 145.3° в.д. В этот период зона южных Курильских островов со стороны Охотского моря характеризовалась циклонической

циркуляцией вод и низкими значениями SST (10–12°С).

В конце сентября 2014 г. (рис. 7, в) адвекция вод Соя шла от северо-восточной оконечности о-ва Хоккайдо в северо – восточном направлении вдоль юго-восточной периферии мезомасштаб-

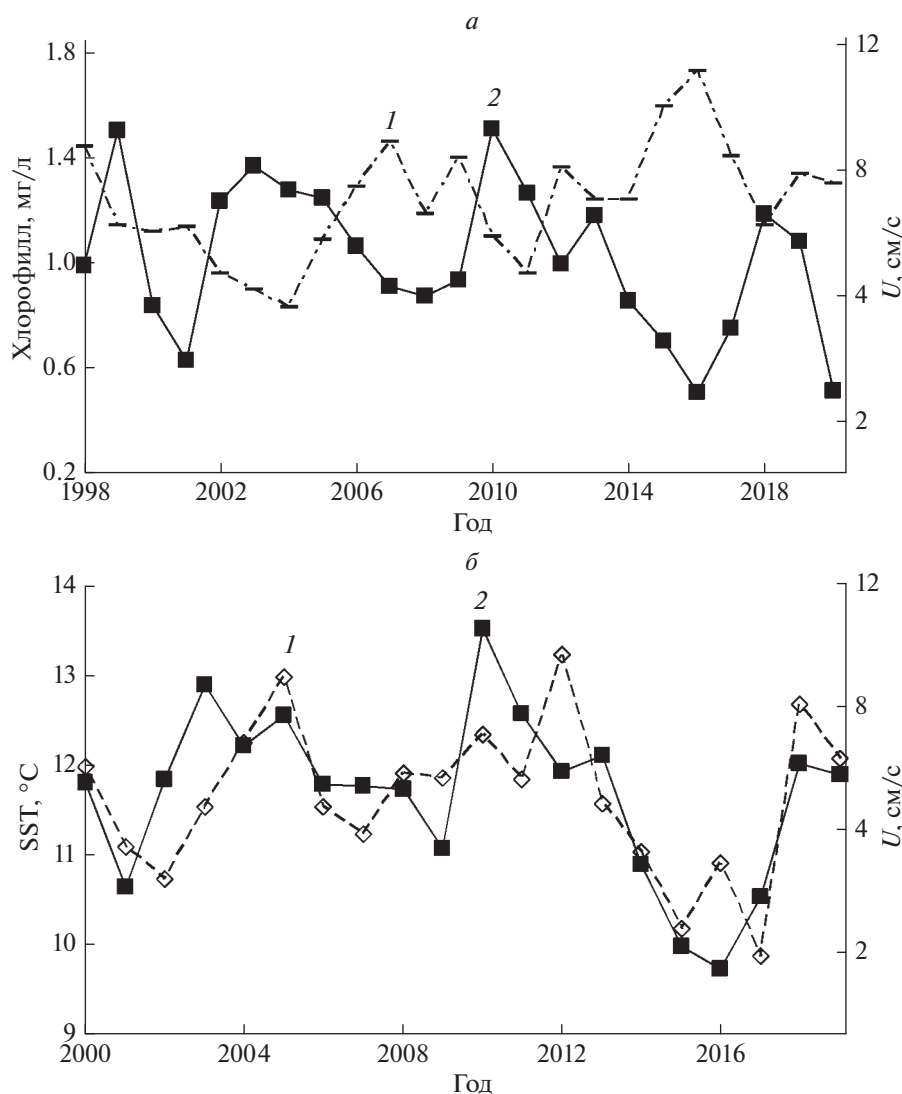


Рис. 6. *a* – межгодовые изменения концентрации хлорофилла в южном прикурильском районе Тихого океана (43° – 44° с.ш., 146° – 147° в.д.) и скорости геострофических течений (U) в зоне пролива Лаперуза в сентябре: 1 – концентрация хлорофилла, 2 – U ; *б* – межгодовые изменения SST в южной части Охотского моря (44.8° – 46.7° с.ш., 142.5° – 144.4° в.д.) в октябре и скорости геострофических течений (U) в зоне пролива Лаперуза в сентябре–октябре: 1 – SST, 2 – U .

ного циклонического круговорота вод с центром расположенным вблизи точки с координатами 45.8° с.ш., 145.3° в.д.

Наблюдалась зависимость мезомасштабной циркуляции вод в южной части Охотского моря (45° – 46° с.ш., 145° – 146° в.д.) от разности в SSH между Японским морем и Тихим океаном. Уменьшение разности в SSH сопровождалось формированием циклонической циркуляции вод (2005 г., 2012–2017 гг.), с отрицательными зональными скоростями течений на северной периферии (46° с.ш.) и положительными скоростями на южной периферии (45° с.ш.) мезомасштабной циркуляционной ячейки (рис. 7, *в*). Повышение разности в SSH и, как следствие, увеличение по-

ступления вод через пролив Лаперуза сопровождалось формированием мезомасштабной антициклонической циркуляции вод (2003, 2010, 2018 гг.), что согласуется с результатами модельных расчетов (Uchimoto et al., 2007).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ спутниковых данных (1993–2019 гг.) по уровню моря, скорости геострофических течений, температуры поверхностных вод и концентрации хлорофилла в южной части Охотского моря, в зоне пролива Лаперуза (Японское море) и в южном прикурильском районе Тихого океана. Увеличение разности уровня моря между Японским морем и Тихим океаном приводит к

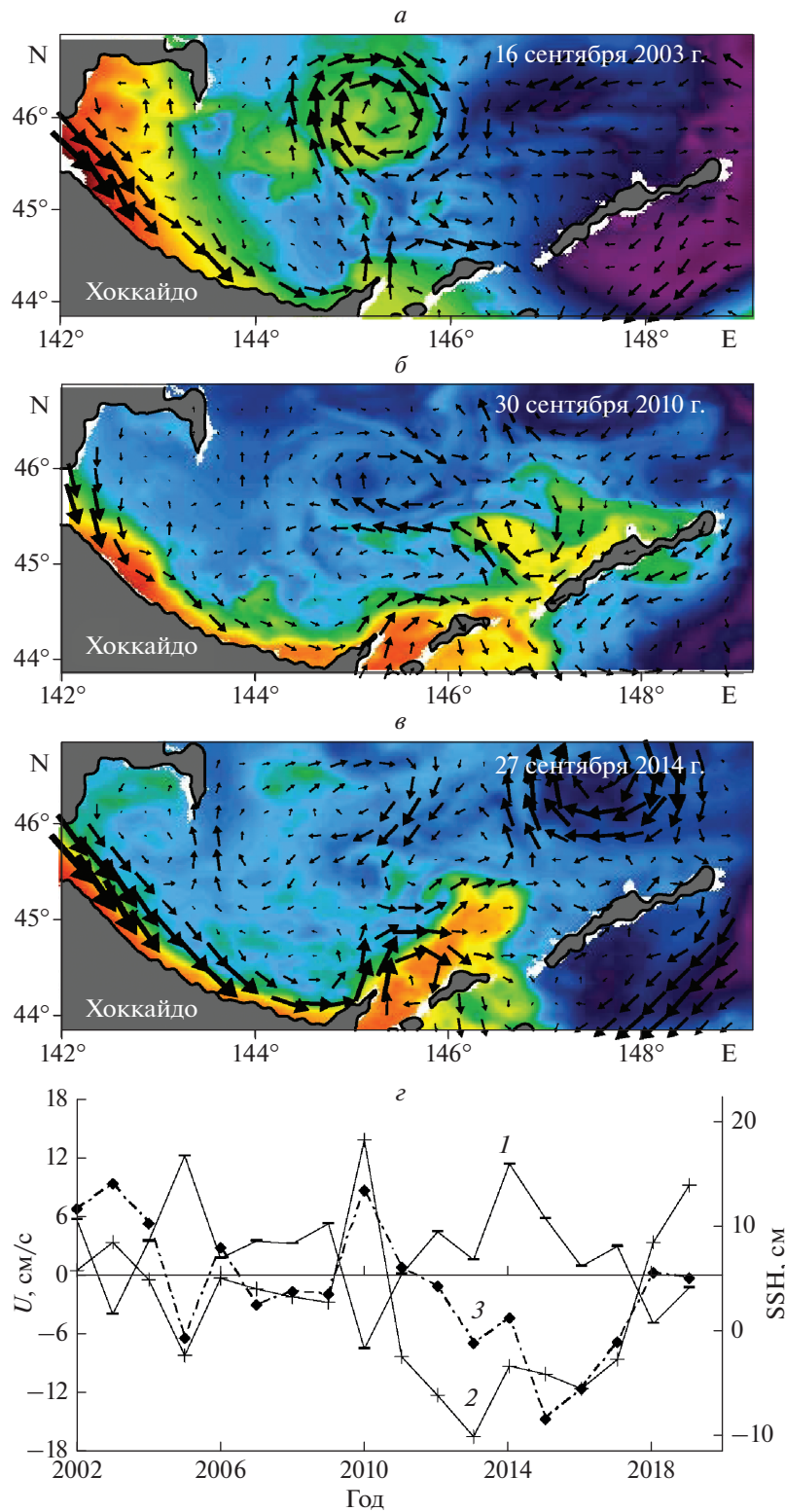


Рис. 7. *a–в* – поле поверхностных геострофических течений по данным AVISO и распределение SST (8°–19°C) в сентябре 2003 г., сентябре 2010 г. и сентябре 2014 г.; *z* – межгодовые изменения зональной составляющей геострофических течений (U) в южной части Охотского моря и разности SSH между Японским морем и Тихим океаном в сентябре: 1 – U (45.1° с.ш., 145.1°–145.4° в.д.), 2 – U (46.1° с.ш., 145.1°–145.4° в.д.), 3 – разность SSH.

усилению течения Соя осенью. Основной вклад в изменение разности уровня между Тихим океаном и Японским морем в осенний период вносят антициклонические вихри и меандры Субарктического фронта в Тихом океане.

Распределение вод Соя в южной части Охотского моря определяется мезомасштабной циркуляцией вод. Увеличение/уменьшение разности уровня моря между Японским морем и Тихим океаном сопровождалось формированием мезомасштабной антициклонической/циклонической циркуляции вод в южной части Охотского моря (45° – 46° с.ш., 145° – 146° в.д.). Увеличение (снижение) проникновения трансформированных субтропических вод через пролив Лаперуза приводит к повышению (понижению) температуры поверхностного слоя вод в южной части Охотского моря ($r = 0.67$, 2000–2019 гг.) и понижению (повышению) концентрации хлорофилла в прикурильском районе Тихого океана ($r = -0.70$, 1998–2019 гг.) в сентябре–октябре.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения госбюджетной темы НИРТОИ ДВО РАН (AAAA-A17-117030110038-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев А.Г. Мезомасштабная циркуляция вод в районе Восточно-Сахалинского течения (Охотское море) // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 3–12.

Андреев А.Г., Жабин И.А. Распределение фреонов и растворенного кислорода в промежуточных водах Охотского моря // Метеорология и гидрология. 2000. № 1. С. 61–69.

Буслов А.В. Промысел биоресурсов в водах Курильской гряды: современная структура, динамика и основные элементы. Южно-Сахалинск: СахНИРО. 2013. 264 с.

Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Некоторые закономерности развития грибовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 6. С. 3–13.

Жабин И.А., Лукьянова Н.Б. Взаимодействие антициклонических вихрей с течением Соя в южной части Охотского моря по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. С. 86–90.

Ablain M., Cazenave A., Larnicol G. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 67–82.

Kusakabe M., Andreev A., Lobanov V. et al. The effects of the anticyclonic eddies on the water masses, chemical parameters and chlorophyll distributions in the Oyashio Current region // J. Oceanography. 2002. V. 58. P. 691–701.

The Okhotsk Sea and Oyashio region // PICES Sci. Rep. № 2. 1995. 227 p.

Ohshima K. I., Simizu D., Ebuchi N., Morishima S., Kashiwase H. Volume, Heat, and Salt Transports through the Soya Strait and Their Seasonal and Interannual Variations // J. Phys. Ocean. 2017. V. 47. P. 999–1019.

Uchimoto K., Mitsudera H., Ebuchi N., Miyazawa Y. Anticyclonic eddy caused by the Soya Warm Current in an Okhotsk OGCM // J. Oceanogr. 2007. V. 63. № 3. P. 379–391.

Study of the Soya Current in the Southern Part of the Okhotsk Sea by Satellite Data

A. G. Andreev

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

The Soya Current, carrying transformed subtropical waters, inflow to the Okhotsk Sea from the Japan Sea through the La Perouse (Soya) Strait, extends along the northern coast of Hokkaido and enters the Pacific Ocean through the Catherine and Kunashir straits. The analysis of satellite data on sea level, geostrophic currents, seawater temperature and chlorophyll concentration in the southern Okhotsk Sea, in the La Perouse Strait area (Japan Sea) and in the southern Kuril region of the Pacific Ocean is carried out. It has been established that an increase in sea level between the Japan Sea and the Pacific Ocean leads to an intensification of the Soya current. It is shown that the main contribution to the change in the sea level difference between the Pacific Ocean and the Japan Sea in fall is due to an appearance of anticyclonic eddies and meanders of the Subarctic front in the Pacific Ocean. An increase (decrease) in the penetration of Soya Current water through the La Perouse Strait is accompanied by an increase (decrease) in the temperature of the surface water in the southern Okhotsk Sea and a decrease (increase) in the chlorophyll concentration in the southern Kuril region of the Pacific Ocean in September–October.

Keywords: sea surface height, seawater temperature, chlorophyll concentration, Soya current, Okhotsk Sea

REFERENCES

Ablain M., Cazenave A., Larnicol G. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the

Climate Change Initiative project // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 67–82.

Andreev A.G. Mezomasshtabnaya tsirkulyatsiya vod v raione Vostochno-Sakhalinskogo techeniya (Okhotskoe more)

- [Mesoscale water circulation in the East Sakhalin Current (Sea of Okhotsk)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2017. № 2. P. 3–12. (In Russian).
- Buslov A. V.* Promysel bioresursov v vodakh Kuril'skoy gryady: sovremennaya struktura, dinamika i osnovnyye elementy [Fishing of biological resources in the waters of the Kuril ridge: modern structure, dynamics and basic elements]. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhNIRO. 2013. 264 p.
- Ginzburg A.I., Fedorov K.N.* Nekotoryye zakonomernosti razvitiya gribovidnykh techeniy v okeane, vyyavlennyye putem analiza sputnikovykh izobrazheniy [Some regularities in the development of mushroom currents in the ocean, identified by analyzing satellite images] // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 1984. № 6. P. 3–13. (In Russian)
- Kusakabe M., Andreev A., Lobanov V. et al.* The effects of the anticyclonic eddies on the water masses, chemical parameters and chlorophyll distributions in the Oyashio Current region // *J. Oceanography*. 2002. V. 58. P. 691–701.
- The Okhotsk Sea and Oyashio region // *PICES Sci. Rep.* № 2. 1995. 227 p.
- Ohshima K. I., Simizu D., Ebuchi N., Morishima S., Kashiwase H.* Volume, Heat, and Salt Transports through the Soya Strait and Their Seasonal and Interannual Variations // *J. Phys. Ocean.* 2017. V. 47. P. 999–1019.
- Uchimoto K., Mitsudera H., Ebuchi N., Miyazava Y.* Anticyclonic eddy caused by the Soya Warm Current in an Okhotsk OGCM // *J. Oceanogr.* 2007. V. 63. № 3. P. 379–391.
- Zhabin I.A., Luk'yanova N.B.* Vzaimodeystviye antitsiklonicheskikh vikhrey s techeniyem Soya v yuzhnoy chasti Okhotskogo morya po dannym sputnikovykh nablyudeniy [Interaction of anticyclonic eddies with the Soya Current in the southern part of the Sea of Okhotsk according to satellite observations] // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2011. № 1. P. 86–90.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2022 г. Ж. Р. Цхай^{а, *}, Г. В. Шевченко^{а, b}, Д. М. Ложкин^а

^аСахалинский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («СахНИРО»), Южно-Сахалинск, Россия

^bИнститут морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: tshay@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.05.2021 г.

Проанализированы среднемесячные значения температуры поверхности океана с января 1998 г. по август 2020 г. в районе, включающем акваторию дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Показано, что временная функция первой моды, описывающей более 95% дисперсии изучаемого параметра, имела значительные положительные отклонения от средних многолетних величин в январе–апреле 2020 г. в южной части изучаемого района, где расположены традиционные места нагула горбуши. Возможно, именно эти аномально высокие температуры сказались на условиях выживания рыб и послужили причиной ее слабых нерестовых подходов к берегам Дальнего Востока России летом 2020 г. Весной (в мае–июне) выраженность аномалий в южной части изучаемого района снизилась, но при этом сформировались существенные положительные отклонения от нормы в его северной части, у восточного (включая Карагинский залив) и западного побережий Камчатки. Во временных функциях главных мод выявлены лишь очень слабые тренды к повышению, что указывает на отсутствие ощутимых тенденций к глобальному потеплению в регионе. В их огибающих по нижним значениям выделено отчетливое проявление 11-летнего цикла, находящегося в противофазе с показателями солнечной активности. В вариациях летних максимумов во временной функции первой моды не обнаружено закономерных, в частности циклических составляющих. В колебаниях максимумов временной функции второй моды основной вклад внесла циклическая компонента с периодом 22 г.

Ключевые слова: температура поверхности океана, климат, метод естественных ортогональных функций, Охотское море, Японское море, тихоокеанские лососи

DOI: 10.31857/S0205961422010079

ВВЕДЕНИЕ

Побудительной причиной данного исследования стали слабые, гораздо ниже ожидаемых, нерестовые подходы горбуши к восточным берегам полуострова Камчатка, да и к другим участкам дальневосточного побережья, где ее традиционно добывают российские рыбаки. Как всегда в подобных случаях, взоры ихтиологов и рыбопромышленников обращаются к климатическим факторам, которые смогли бы объяснить снижение уловов этого ценного вида тихоокеанских лососей, играющего существенную роль в экономике Дальнего Востока России. Учитывая акваторию, в которой нагуливается горбуша в морской период ее жизни (Атлас распространения..., 2002; Шунтов, Темных, 2008, 2011), необходимо было проанализировать термические условия в достаточно большой области, что определило выбор района исследований, включающего дальневосточные моря и прилегающую северо-западную часть Тихого океана (СЗТО). В качестве анализируемого мате-

риала использовались доступные спутниковые данные по температуре поверхности океана (ТПО). Естественно, исследование особенностей пространственно-временной изменчивости термических условий в такой значительной по размерам акватории представляет не только чисто практический, но и существенный научный интерес, так как вариации температуры поверхностного слоя отражают основные особенности циркуляции вод в регионе и иных важных океанологических процессов.

Климатическим изменениям в дальневосточных морях и северо-западной части Тихого океана посвящен ряд исследований, в которых рассматривались как данные судовых океанологических съемок и доступных архивов метеорологической информации (Хен и др., 2004, 2008; Глебова и др., 2009; Зуенко и др., 2019), так и материалы измерений температуры морской воды на береговых гидрометеорологических станциях Росгидромета (Ростов и др., 2017, 2018). В большинстве этих работ отмечалась тенденция к повышению темпе-

Таблица 1. Результаты расчета собственных значений ЕОФ

Мода	Собственное значение	Доля дисперсии, %	Суммарная дисперсия, %
1	74.108	95.361	95.361
2	3.057	3.934	99.295
3	0.164	0.211	99.506
4	0.065	0.083	99.590
5	0.030	0.039	99.629

ратуры в дальневосточных морях, обусловленная, прежде всего, изменениями в приземном слое атмосферы в регионе, а также обсуждались некоторые ситуации, когда отклонения термических условий от нормы были наиболее существенными. Целью данной работы было выделение особенностей температурных условий в конце 2019–начале 2020 г., которые могли бы повлиять на состояние популяции горбуши, идущей на нерест к побережью Дальневосточного региона России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании были использованы среднемесячные значения ТПО с января 1998 г. по август 2020 г., размещенные на веб-ресурсе климатических данных ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu>), с четверть градусным разрешением в районе с координатами 35–65° с.ш. и 130–180° в.д. Эта область охватила все Охотское море, основную часть Японского моря, западную часть Берингова моря и северо-западную акваторию Тихого океана. Для каждого месяца были рассчитаны средние многолетние значения, которые можно рассматривать как нормы, и определены соответствующие отклонения от нормальных показателей – аномалии температуры поверхности воды. При анализе сформированного массива данных применялся метод естественных ортогональных функций (ЕОФ), который позволил выделить характерные пространственные структуры в изучаемом параметре и рассмотреть их изменчивость во времени (Багров, 1959).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты разложения пространственно-временного поля ТПО по ЕОФ представлены в табл. 1. Первые пять мод описали практически 100% общей дисперсии изучаемого параметра, из которых более 99% приходилось на две первые наиболее значимые и информативные моды. На рис. 1 показаны графики изменения временных функций этих мод, а на рис. 2 соответствующие им пространственные распределения векторов.

Временная функция первой моды не принимала нулевых значений и была одного знака в течение всего рассматриваемого интервала време-

ни. Она носила характер циклических сезонных вариаций, межгодовая изменчивость выражалась в слабой модуляции годового хода (разница между летними максимумами составила около 0.2°C) (см. рис. 1). Самый низкий максимум (значение временной функции в период максимального прогрева в августе) отмечен в 2002 г., который условно можно назвать холодным годом, самый высокий – в теплом 2012 г.

На фоне этих устойчивых колебаний выделялись более высокие значения временной функции в январе–апреле 2020 г. Расчеты по выборкам для этих месяцев показали, что разница между величиной временной функции для 2020 г. в сравнении со средним значением за 1998–2019 гг. составила от 1.9 до 2.6 величины среднеквадратического отклонения. В марте 2020 г. (наиболее холодном месяце региона) величина временной функции была на 11% выше среднемноголетнего значения.

Все вышеперечисленные особенности указывают на экстраординарность термических условий прошедшего года. Определяющий вклад первой моды в вариации ТПО в изучаемом регионе означает, что в зонах с высокими значениями вектора (южнее субарктического фронта) сформировались аномально теплые зимние условия. Это согласуется с пространственным распределением аномалии температуры в поверхностном слое в январе–марте 2020 г. (аномалии ТПО для последнего представлены ниже на рис. 3).

Для характеристики межгодовой изменчивости рассматривались огибающие временной функции как по верхним (формировалась выборка за август), так и по нижним значениям (март). Для летних значений каких-либо закономерных квазциклических вариаций определить не удалось, а в спектре зимних колебаний проявился цикл с периодом 11 лет. Причем мартовские температуры находятся в противофазе с числами Вольфа, коэффициент корреляции равен –0.71, что указывает на наличие значимой обратной связи, однако механизм влияния солнечной активности в данном случае неочевиден, так как считается, что зависимость должна быть прямой.

Пространственное распределение вектора первой моды ЕОФ (в данной работе мы принима-

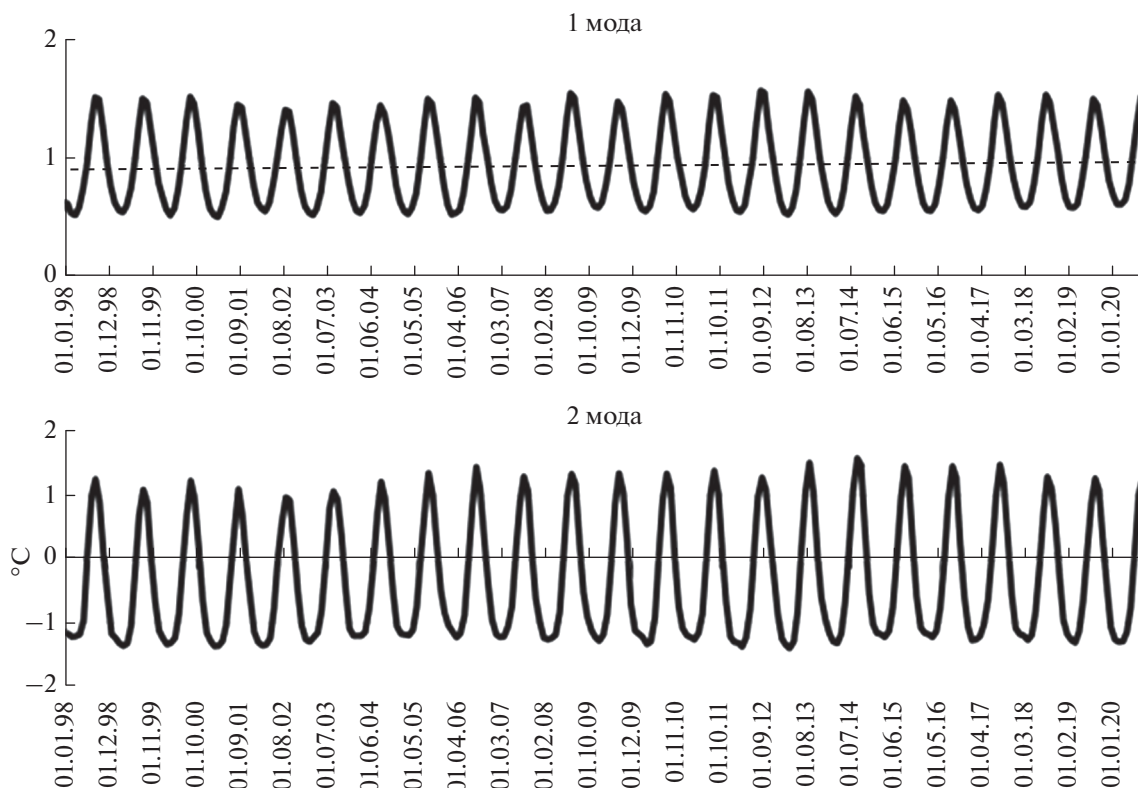


Рис. 1. Временные функции первой и второй мод разложения поля ТПО по ЕОФ.

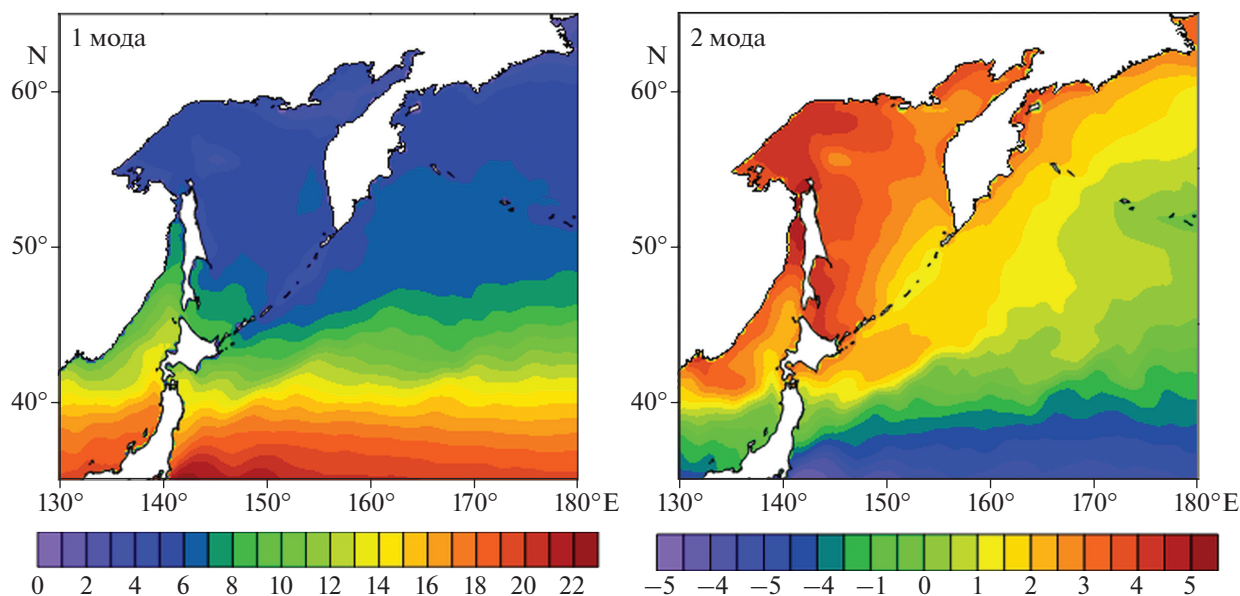


Рис. 2. Пространственное распределение векторов первой и второй мод разложения поля ТПО по ЕОФ.

ем, что пространственное распределение безразмерно, а временная функция измеряется в градусах Цельсия) имело четко выраженную зональную структуру и отражало общий факт понижения

температуры воды в океане по мере продвижения на север (рис. 2). Явно выделялся субарктический фронт, характеризующийся значительным градиентом ТПО и проходящий приблизительно вдоль

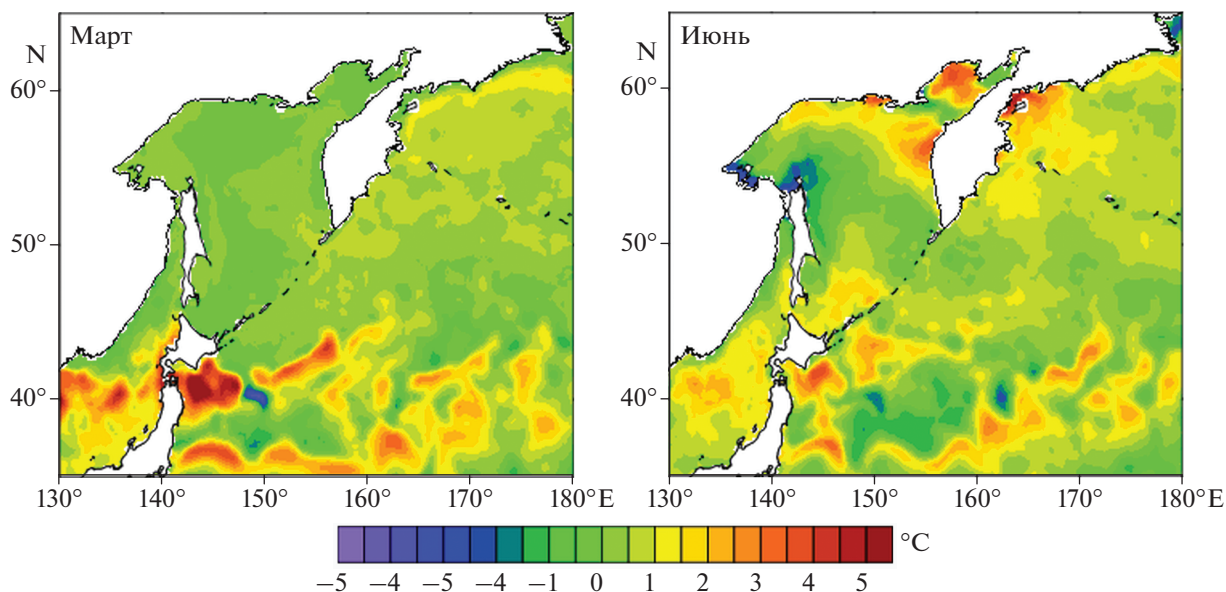


Рис. 3. Распределение аномалий ТПО в СЗТО в марте и июне 2020 г.

40-й параллели как в Японском море, так и в СЗТО. Некоторые отклонения от такой закономерной картины связаны с проявлением теплого Цусимского течения у западного побережья Хоккайдо и в Татарском проливе, а также холодного течения Ойясио у северо-восточного берега о. Хонсю. Определялись низкими значениями моды зоны апвеллингов и традиционно холодноводных акваторий – Средние Курилы, банка Кашеварова, район Шантарских островов, залив Шелихова в Охотском море и прибрежная зона Берингова моря к северу от м. Олюторский, включая Анадырский залив.

Временная функция второй моды также имела вид годовых колебаний с максимальными значениями в августе и минимальными в марте, однако, в отличие от первой моды, она в течение года изменяла свой знак. Положительные значения наблюдались с июля по октябрь, отрицательные – с ноября по май (рис. 1). В июне значения временной функции были близки к нулю и колебались в диапазоне от -0.2 до $+0.2$ °C. При этом значения вектора второй моды ЕОФ распределялись по меридиональному направлению на акватории Охотского и отчасти Японского моря (максимальные значения в северо-западной части Охотского моря, в северной части Татарского пролива и в сравнительно узкой полосе вдоль юго-восточного побережья Сахалина, продолжающейся до о. Хоккайдо). Изолинии второй моды в Беринговом море и СЗТО вытянуты вдоль побережья Камчатки и Курильской островной гряды, однако узловая линия (линия перемены знака) практически совпадает с субполярным фронтом, к югу от которого значения моды отрицательны и возрастают

по абсолютной величине при приближении к экватору (см. рис. 2).

Можно предположить, что вторая мода показала изменчивость термического режима в зависимости от сезонного переноса воздушных масс вследствие смещения полей атмосферного давления. С декабря по апрель над регионом формировался зимний муссон с ветрами северных румбов. С июля по сентябрь – наоборот, преобладал летний муссон с ветрами южного направления. В июне и октябре обозначился переходный период с неустойчивыми ветрами (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1998). И особенно отчетливо муссонный климат оказывал влияние в Охотском море и северной части Японского моря. Это, в частности, означало, что в западной части Охотского моря и северо-западной части Японского моря вторая мода дала существенный положительный вклад летом и отрицательный зимой, а в области южнее 40-й параллели ситуация противоположна. Также, как и в первой моде, при оценке огибающей временной функции по зимним месяцам прослеживается четко выраженный 11-летний цикл с амплитудой примерно в три раза большей, чем у первой моды. Он также находится в противофазе с вариациями солнечной активности (коэффициент корреляции -0.46), но с временным сдвигом, что еще больше усложняет его интерпретацию. По летним значениям этот цикл также просматривается, но более существенную роль играют вариации с периодом около 22 лет. В зимние месяцы 2020 г. не отмечено существенных отклонений временной функции этой моды от обычных значений.

Рассматривались также моды разложения ЕОФ более высокого порядка, однако их вклад в пространственно-временную изменчивость ТПО в изучаемом районе оказался минимален – собственные значения и доля дисперсии были меньше единицы (см. табл. 1).

Определенные выше отклонения временной функции первой моды ЕОФ выделили особенности формирования термического режима в поверхностном слое дальневосточных морей и СЗТО в зимний период 2020 г. Пространственное распределение аномалии температуры поверхности моря в январе, феврале и апреле было аналогичным мартовскому (см. рис. 3). Значимые положительные аномалии обнаружены в южной части Японского моря и южной части СЗТО, а также на акватории у восточного берега Хоккайдо и северо-восточного побережья о. Хонсю. Менее существенные положительные отклонения от нормы наблюдались в западной части Берингова моря (за исключением Анадырского залива и акватории в районе м. Наварина) и центральной части СЗТО. Отрицательные аномалии фиксировались в западной части Охотского и северо-западной части Японского моря. Сложно однозначно относиться к оценкам в последнем случае, так как существенная часть этих акваторий с января по март покрыта льдом. Следовательно, некоторая часть данных была получена путем интерполяции, но в целом характер термических условий был именно таким. Открытым остается вопрос о влиянии положительных аномалий температуры на выживаемость горбуши в поверхностном слое в зимний период. Недавние исследования, выполненные в ходе морских экспедиций по изучению тихоокеанских лососей в марте 2018 и 2019 гг. в заливе Аляска, показали, что в условиях повышенного фона температур отмечается высокая степень зараженности рыб паразитами и морскими вшами. Это могло оказать негативное влияние на их здоровье, вплоть до гибели (Weitkamp et al., 2020; Deeg et al., 2020). Возможно, аналогичные факторы могли привести к гибели горбуши в СЗТО еще до ее нерестовых подходов к дальневосточным берегам России.

Весной (в мае–июне) 2020 г. значимость аномалий ТПО в южной части СЗТО несколько снижается, а в северной, наоборот, возрастает. Прежде всего, это относится к акваториям, прилегающим к полуострову Камчатка как с восточной, так и с западной стороны, на участке между 52-й и 58-й параллелями. Вероятно, что именно значительный прогрев акватории Карагинского залива, где в июне положительные аномалии достигли 5°C , стал одной из причин слабых подходов горбуши на восточном побережье Камчатки в начале путины 2020 г. Температура воды выше нормы фиксировалась в заливе Шелихова (за исключением Пенжинской губы), в Тауйской губе, а также в

целом на северном шельфе Охотского моря (см. рис. 3). Смещение положительных отклонений температуры воды в поверхностном слое в северном направлении проявилось и в активизации ветвей теплого течения Курисио: Цусимского течения – у юго-западного побережья о. Сахалин, течения Соя – в проливе Лаперуза и у южных Курильских островов. При этом временная функция первой моды в весенние месяцы 2020 г. не была максимальной за период наблюдений (в 2004 г. ее значения были выше), но близка к ней. В частности, в июне 2020 г. отклонение значения временной функции первой моды от нормы составило 1.9 величины стандартного отклонения, что тоже немало.

Остановимся на еще одном важном моменте, обычно рассматриваемом при изучении вариаций климатических условий, – влиянии глобального потепления. Оценки тренда во временной функции как первой, так и второй моды ЕОФ выявили положительные тенденции, однако скорость роста была очень мала как в целом по всему ряду, так и для отдельных месяцев. Коэффициенты линейного тренда составили около $0.002\text{--}0.003^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (рис. 4). Это позволило сделать вывод об отсутствии четкой направленности к повышению температуры поверхностного слоя воды в изучаемом регионе, что противоречит выводам, полученным для Охотского и Берингова морей в ряде работ (Ростов и др. 2017, 2018; Зуенко, 2019). Кроме того, для Охотского моря и Татарского пролива Японского моря работе Д.М. Ложкина и Г.В. Шевченко (2019) при анализе спутниковых данных были выделены отрицательные тренды для зимне-весеннего сезона и положительные – в летний период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного анализа спутниковых наблюдений за температурой поверхности дальневосточных морей и СЗТО определены пространственные структуры первой (отражающей убывание ТПО с широтой) и второй (в дальневосточных морях изменяющейся с долготой и имеющей узловую линию, проходящую примерно вдоль 40-й параллели) мод. Показано, что во временной функции первой моды в зимние месяцы 2020 г. имелись существенные отклонения, отражающие значительные положительные аномалии ТПО в южной части Японского моря и СЗТО и более умеренные – в Беринговом море и центральной части СЗТО. Возможно, именно эти аномально высокие температуры сказались на условиях выживания горбуши и послужили причиной ее слабых нерестовых подходов к берегам Дальневосточного региона России летом 2020 г. Весной (в мае–июне) выраженность аномалий в южной части изучаемого района снизилась, но

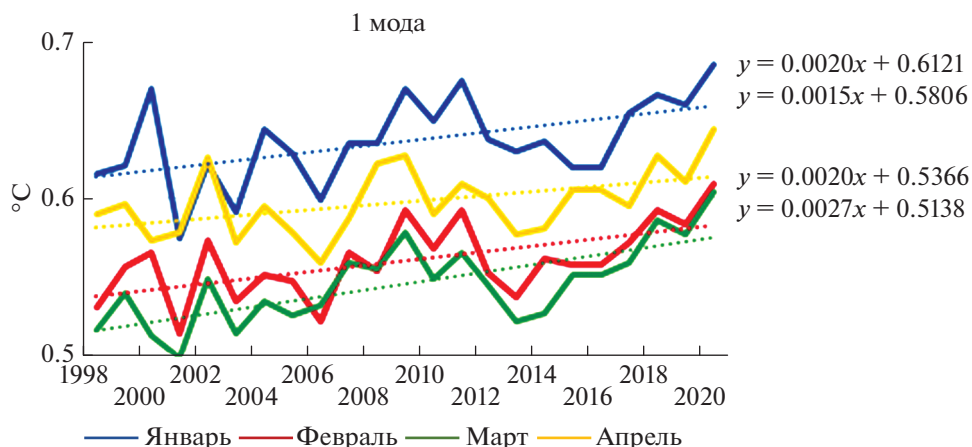


Рис. 4. Динамика изменчивости временной функции первой моды в январе–апреле с линиями тренда.

при этом сформировались значительные положительные отклонения от нормы в его северной части, у восточного (включая Карагинский залив) и западного побережий Камчатки, в заливе Шелихова (исключая Пенжинскую губу) и ряде других акваторий.

Во временных функциях главных мод выявлены лишь очень слабые тренды к повышению, что указывает на отсутствие явных тенденций к глобальному потеплению в изучаемом регионе. В их огибающих по нижним значениям выделено проявление 11-летнего цикла, находящегося в противофазе с показателями солнечной активности. В вариациях летних максимумов временной функции первой моды не обнаружено закономерных, в частности циклических составляющих, что указывает на весьма высокую устойчивость термических условий в дальневосточных морях и СЗТО, рассматриваемых в целом как единый объект, что не исключает различий в межгодовых колебаниях для отдельных акваторий. В вариациях максимумов временной функции второй моды основной вклад внесла циклическая компонента с периодом 22 г. Здесь же отмечено слабое влияние составляющей с периодом 11 лет.

Сложно сказать, насколько экстраординарные термические условия в СЗТО в зимние месяцы 2020 г. могли повлиять на выживаемость горбуши. Надеемся, что полученная в данной работе информация будет полезна ихтиологам. Наиболее вероятной причиной ее снижения могло быть воздействие на здоровье рыб паразитов и морских вшей. Существенным фактором слабых нерестовых подходов горбуши к восточному побережью Камчатки могли стать аномально теплые условия в Карагинском заливе в июне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас распространения в море различных стад тихоокеанских лососей в период весенне-летнего нагула и преднерестовых миграций / Под ред. О.Ф. Гриценко. М.: ВНИРО, 2002. 190 с.

Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды ЦИП. 1959. Вып. 74. С. 3–24.

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Ф.С. Терзиева и др. — СПб.: Гидрометеориздат, 1998. — 342 с.

Глебова С.Ю., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Долгопериодные тенденции в ходе атмосферных процессов и термического режима дальневосточных морей за последний 30-летний период // Известия ТИНРО. 2009. Т. 159. С. 285–298.

Зуенко Ю.И., Асеева Н.Л., Глебова С.Ю., Гостренко Л.М., Дубинина А.Ю., Дулепова Е.П., Золотов А.О., Лобода С.В., Лысенко А.В., Матвеев В.И., Муктепавел Л.С., Овсянников Е.Е., Фигуркин А.Л., Шатилина Т.А. Современные изменения в экосистеме Охотского моря (2008–2018 гг.) // Известия ТИНРО. 2019. Т. 197. С. 35–61.

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.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов Охотского моря за последние десятилетия // Известия ТИНРО. 2017. Т. 191. С. 176–195.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов в западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // Известия ТИНРО. 2018. Т. 191. С. 176–195.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Фигуркин А.Л., Зуенко Ю.И., Новиков Ю.В., Сорокин Ю.Д., Гаманюк М.В. Гидрологические условия северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей в начале XXI века и ожи-

даемые тенденции // Вопросы промысловой океанологии. 2004. Вып. 1. С. 40–58.

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 полувекковой изменчивости // Известия ТИНРО. 2008. Т. 153. С. 254–263.

Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Т. 1. Владивосток: ТИНРО-центр, 2008. 479 с.

Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Т. 2. Владивосток: ТИНРО-центр, 2011. 473 с.

Deeg C., Kanzeparova A., Somov A., Esenkulova A., Di Cicco E., Kaukinen K., Tabata A., Ming T.J., Li S., Beamish R.J., Miller K. Way out there: Pathogens and stressors of overwintering salmon in the Gulf of Alaska // PICES 2020 Virtual meeting. Book of abstracts. Sydney, BC, Canada. P. 19.

Weitkamp L., Neville C., Somov A., Kanzeparova A. Potential effects of wounds and sea lice on the health of Pacific salmon on the high seas // PICES 2020 Virtual meeting. Book of abstracts. Sydney, BC, Canada. P. 19.

Analysis of Thermal Conditions in the Northwest Pacific Ocean from Satellite Data

Zh. R. Tskhay¹, G. V. Shevchenko^{1, 2}, and D. M. Lozhkin¹

¹Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Sakhalin Branch (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

The average monthly values of the ocean surface temperature from January 1998 to August 2020 in the area including the waters of the Far Eastern seas and the northwestern part of the Pacific Ocean are considered. It was shown that the amplitude of the first mode, which describes more than 95% of the variance of the studied parameter, had significant positive deviations from the long-term mean values in January–April 2020 in the southern part of the study area, where traditional feeding grounds for pink salmon are located. Possibly, the abnormally high temperatures affected the survival conditions of pink salmon and caused its weak spawning approaches to the Russian Far East coast in the summer of 2020. In spring (May–June), the magnitude of anomalies in the southern part of the study area decreased, but significant positive deviations were formed in its northern part, near the eastern (including Karaginsky Bay) and western coasts of Kamchatka. In the amplitudes of the main modes, very weak upward trends were revealed, indicating the absence of significant manifestations of global warming in the region. In the envelope curve of the lower values, an 11-year cycle is marked, which is in antiphase with the solar activity indices. No regular cyclic components were found in the variations of summer maxima in the amplitude of the first mode. The cyclic component with a period of 22 years made the main contribution to the oscillations of the amplitude maxima of the second mode.

Keywords: ocean surface temperature, climate, empirical orthogonal function method, Sea of Okhotsk, Sea of Japan, Pacific salmon

REFERENCES

Atlas rasprostraneniya v more razlichnykh stad tikhookeanskikh lososei v period vesenne-letnego nagula i prednerestovyykh migratsiy [Atlas of distribution in the sea of various stocks of Pacific salmon during spring-summer feeding and pre-spawning migrations] / edited by O.F. Gritsenko. Moscow: VNIRO, 2002. 190 p. (In Russian)

Bagrov N.A. Analiticheskoe predstavlenie posledovatel'nosti meteorologicheskikh poley posredstvom estestvennykh ortogonal'nykh sostavlyayushchikh [Analytical representation of a sequence of meteorological fields by means of empirical orthogonal components] // Trudy TsIP. 1959. № 74. P. 3–24. (In Russian)

Deeg C., Kanzeparova A., Somov A., Esenkulova A., Di Cicco E., Kaukinen K., Tabata A., Ming T.J., Li S., Beamish R.J., Miller K. Way out there: Pathogens and stressors of overwintering salmon in the Gulf of Alaska // PICES 2020 Virtual meeting. Book of abstracts. Sydney, BC, Canada. P. 19. Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey. Tom IX. Okhotskoe more. Вып. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Volume IX. Sea of Okhotsk. Issue 1. Hydrometeorological con-

ditions] / edited by F.S. Terzieva et al. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998. 342 p. (In Russian)

Glebova S.Yu., Ustinova E.I., Sorokin Yu.D. Dolgoperiodnyye tendentsii v khode atmosferynykh protsessov i termicheskogo rezhima dal'nevostochnykh morey za posledniy 30-letniy period [Long-term trends in the course of atmospheric processes and thermal regime of the Far Eastern seas over the last 30-year period] // Izvestiya TINRO. 2009.0. V. 159. P. 285–298. (In Russian)

Khen G.V., Ustinova E.I., Figurkin A.L., Zuenko Yu.I., Novikov Yu.V., Sorokin Yu.D., Gamanyuk M.V. Gidrologicheskie usloviya severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana i dal'nevostochnykh morey v nachale XXI veka i ozhidaemye tendentsii [Hydrological conditions of the northwestern part of the Pacific Ocean and the Far Eastern seas at the beginning of the XXI century and expected trends] // Voprosy promyslovoy okeanologii. 2004. № 1. P. 40–58. (In Russian)

Khen G.V., Basyuk E.O., Sorokin Yu.D., Ustinova E.I., Figurkin A.L. Termicheskie usloviya na poverkhnosti Berinгова i Okhotskogo morey v nachale 21-go veka na fone poluvekovoy izmenchivosti [Thermal conditions on the surface of the Bering and Okhotsk seas at the beginning of the 21st cen-

- tury against the background of half a century of variability] // *Izvestiya TINRO*. 2008. V. 153. P. 254–263. (In Russian)
- Lozhkin D.M., Shevchenko G.V.* Trendy temperatury poverkhnosti Okhotskogo morya i prilegayushchikh akvatorii po sputnikovym dannym 1998–2017 gg. [Surface temperature trends of the Sea of Okhotsk and adjacent waters according to satellite data from 1998–2017] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 1. P. 55–61. (In Russian)
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Vorontsov A.A.* Tendentsii klimaticheskikh izmeneniy termicheskikh usloviy pribrezhnykh rayonov Okhotskogo morya za poslednie desyatiletiya [Trends in climatic changes in the thermal conditions of the coastal regions of the Sea of Okhotsk in recent decades] // *Izvestiya TINRO*. 2017. V. 191. P. 176–195. (In Russian)
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Vorontsov A.A.* Tendentsii klimaticheskikh izmeneniy termicheskikh usloviy pribrezhnykh rayonov zapadnoy chasti Beringova morya i prilegayushchykh rayonakh za poslednie desyatiletiya [Trends in climatic changes in the thermal conditions of the coastal areas of the western part of the Bering Sea and adjacent areas in recent] // *Izvestiya TINRO*. 2018. V. 191. P. 176–195. (In Russian)
- Shuntov V.P., Temnykh O.S.* Tikhookeanskie lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh. T. 1. [Pacific salmon in marine and oceanic ecosystems. V. 1] Vladivostok: TINRO-tsentr, 2008, 479 p. (In Russian)
- Shuntov V.P., Temnykh O.S.* Tikhookeanskie lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh. T. 2. [Pacific salmon in marine and oceanic ecosystems. V. 2]. Vladivostok: TINRO-tsentr, 2011. 473 p. (In Russian)
- Weitkamp L., Neville C., Somov A., Kanzeparova A.* Potential effects of wounds and sea lice on the health of Pacific salmon on the high seas // PICES 2020 Virtual meeting. Book of abstracts. Sydney, BC, Canada. P. 19.
- Zuenko Yu.I., Aseeva N.L., Glebova S.Yu., Gostrenko L.M., Dubinina A.Yu., Dulepova E.P., Zolotov A.O., Loboda S.V., Lysenko A.V., Matveev V.I., Muktepavel L.S., Ovsyannikov E.E., Figurkin A.L., Shatilina T.A.* Sovremennye izmeneniya v ekosisteme Okhotskogo morya (2008–2018 gg.) [Modern changes in the ecosystem of the Sea of Okhotsk (2008–2018)] // *Izvestiya TINRO*. 2019. V. 197. P. 35–61. (In Russian)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЦВЕТЕНИЙ ЦИАНОБАКТЕРИЙ НА ОСНОВЕ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО ДАННЫМ MODIS

© 2022 г. П. Н. Лишаев^а, А. А. Алескерова^а, *, А. А. Кубряков^а,
Н. В. Василенко^а, С. В. Станичный^а

^аМорской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: annete08@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2021 г.

В работе предложен автоматический алгоритм выделения областей цветения цианобактерий (ЦБ) в Азовском море на основе анализа оптических спектров спутниковых данных MODIS. Валидация алгоритма проведена на основе сопоставления с квазисинхронными данными высокого разрешения Landsat. На основе результатов применения алгоритма были исследованы пространственная и временная изменчивость цветений ЦБ в Азовском море в 2003–2019, даны примеры эволюции цветений в отдельные годы. Цветение ЦБ в Азовском море наблюдается с марта по ноябрь с максимумом в августе. Наиболее интенсивные и продолжительные цветения ЦБ наблюдаются в Таганрогском заливе. Отсюда, в весенние месяцы они переносятся на восток вдоль северного берега. В июне–июле ЦБ начинают интенсивно распространяться на юг вдоль восточного берега, после чего в некоторые годы проникают в центр бассейна под действием антициклонических течений. Анализ межгодовой изменчивости показал, что интенсивность цветений была наиболее высокой в 2004–2011, с максимумом в 2008–2009 гг., и значительно упала в последние годы (2011–2019). Возможной причиной такого уменьшения является снижение стока рек Дона и Кубани, а также рост скорости ветра, отмечаемый в последние годы.

Ключевые слова: цианобактерии, сине-зеленые, Азовское море, оптические характеристики, спутниковые измерения, сезонная изменчивость, межгодовая изменчивость, спектр яркости, MODIS, Landsat

DOI: 10.31857/S020596142201002X

ВВЕДЕНИЕ

Азовское море является мелководным водоемом внутреннего типа, для которого характерна относительно низкая соленость вод, интенсивный прогрев, активное ветровое перемешивание, а также выраженное влияние пресноводного стока рек Дон и Кубань, несущего биогенные элементы (Ильин и др., 2009; Сорокина, Бердников, 2018). Такие условия способствуют ежегодным сезонным цветениям фитопланктона в водах акватории, в том числе цветениям цианобактерий (ЦБ) (Ковалева, 2020).

Наличие ЦБ, а также отдельные случаи их цветений в Азовском море, были описаны в ряде работ (Ковалева, 2006; Матишов и др., 2009; Селифонова, 2008; Selifonova, 2010). По данным контактных измерений было установлено, что наиболее интенсивные цветения ЦБ наблюдаются в зонах конвергенции вод. Так, в Таганрогском заливе в период гидрологического лета ЦБ представляют до 90% всей биомассы фитопланктона (Ковалева, 2020; Никитина, 2010), в Темрюкском

заливе до 80% всей биомассы (Ясакова, 2015). В остальных районах акватории ЦБ также фиксируются, однако в значительно меньшем количестве.

Цветения ЦБ могут оказывать негативное воздействие на состояние экосистемы региона: в период таких цветений продукция кислорода значительно меньше его поглощения, что приводит к гипоксии в толще воды (Матишов и др., 2003). ЦБ образуют толстые поверхностные пленки, которые снижают доступность света и растворимость кислорода, что препятствует росту биоты в более глубоких слоях (Paerl & Otten, 2013). Также отдельные виды ЦБ способны продуцировать нейро- и гепатоксины в окружающие воды, что представляет дополнительную опасность для живых организмов. Они могут вызвать гибель зоопланктона и рыб (Андреева и др., 2020, Sivonen, Jones, 1999; Harke et al., 2016). Таким образом, интенсивные цветения ЦБ могут приводить к массовым заморным явлениям (Матишов, Футшей, 2003).

Контактные измерения позволили обнаружить некоторые регионы нахождения ЦБ и получить информацию о составе, морфометрии и других характеристиках этих видов. Однако такие измерения нерегулярны по времени и пространству, что критично для изучения пространственного распространения цветения ЦБ.

Возможность регулярной идентификации областей цветения ЦБ могут дать мультиспектральные спутниковые измерения. ЦБ оказывают значительное влияние на отражательную способность морской поверхности и имеют выраженные спектральные особенности, которые являются основой методов выделения областей их цветений по данным спутниковых оптических сенсоров. В настоящее время существует несколько таких методов для выделения ЦБ в различных акваториях Мирового океана (Vincent et al., 2004; Kutser et al., 2006; Kahru et al., 2007; Blondeau-Patissier et al., 2014; Карабашев и др., 2015; и др). Исследование изменчивости цветений ЦБ в Азовском море по спутниковым данным проводилось в работе (Aleskerova et al., 2019). В этой работе на основе оптических данных высокого разрешения Landsat был представлен обобщающий анализ особенностей пространственной изменчивости характеристик цветений за 1999–2016 гг., описаны экстремальные цветения в различные годы исследуемого периода. Данные Landsat дают возможность наблюдать за особенностями цветения нитчатых плавающих водорослей. Однако они имеют ряд ограничений, связанные прежде всего, с малым временным разрешением (16 дней) этих измерений, которое с учетом облачности часто не дает возможность наблюдать за эволюцией цветений ЦБ.

В настоящей работе на основе сопоставления данных среднего разрешения MODIS и высокого разрешения Landsat проводится анализ особенностей оптических спектров в области цветения ЦБ. На основе этого анализа предлагается алгоритм автоматической идентификации цветений ЦБ в Азовском море, основанный на ежесуточных данных 10 оптических каналов сканера MODIS. Разработанный алгоритм используется для исследования пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости цветений ЦБ за период 2003–2019 гг., особенностей их эволюции и распространения в отдельные годы.

ДАННЫЕ

В работе использовался массив данных сенсоров спутников серии Landsat 4, 5, 7, 8 с разрешением 15–30 м (для построения RGB изображений true color), которые были получены из архива <https://glovis.usgs.gov/>. Для анализа спектров области цветений использовались данные об отражательной способности RRS (Remote Sensing Re-

flectance) MODIS в 10 каналах, центрированных на 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 нм, которые имеют разрешение 1 км и получены из архива <http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>. Для анализа скорости ветра использовались данные реанализа ERA-Interim (пространственное разрешение – 0.25 градуса, дискретность по времени – 6 ч). Данные о стоках рек Дон и Кубань были взяты из массива GloFAS-ERA5 (Harrigan et al., 2020).

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

Цветение ЦБ определялось визуально по снимкам Landsat на основе следующих критериев. ЦБ имеют значительно повышенные значения яркости в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) по сравнению с чистой водой (Blondeau-Patissier et al., 2014) за счет большой биомассы и положительной плавучести. Наличие хлорофилла “a” в клетках ЦБ приводит к повышенному поглощению света в синей части спектра по сравнению с мутными водами, содержащими взвесь минерального происхождения. При построении композитных изображений RGB области цветения ЦБ будут обладать насыщенным зеленым цветом. Дополнительным критерием являлось проявление пространственных структур в NIR канале (см. пример на рис. 1, б). На рис. 1, б красным выделяются плавающие нитевидные структуры ЦБ, которые аккумулируются в конвергентных зонах.

Для разработки автоматического алгоритма идентификации ЦБ по виду спектра яркости, был выполнен совместный анализ данных Landsat и MODIS. На снимках Landsat в видимом диапазоне были отобраны сцены, на которых явно отмечались участки, подверженные цветению ЦБ. Далее, используя квазисинхронные данные MODIS за те же даты, проводился анализ спектров в точках, соответствующей цветению, и вне его. Рассмотрим спектры, полученные по данным MODIS на примере 16 июля 2013 г. На снимке Landsat четко наблюдается обширная область цветения ЦБ в районе юго-восточной части Азовского моря (рис. 2, а). Эта область имеет форму вытянутой с севера на юг изгибающейся полосы шириной не более 10 км и длиной около 70 км. Повышенные значения яркости для этой области характерны и для карты яркости MODIS (рис. 2, б).

Рассмотрим спектры для отмеченных точек: 1, 2 – цветений ЦБ; 3, 4 – повышенные значения яркости вне зоны цветения ЦБ (цветение фитопланктона или взвесь); 5 – относительно “чистые” воды. Для спектра точки 5 в Черном море (условно “чистая” вода) максимум наблюдается в 3–4 каналах на длинах волн 469–488 нм, а яркость в длинноволновой части спектра стремится к 0. Спектры точек 1–4 характеризуются максимумом

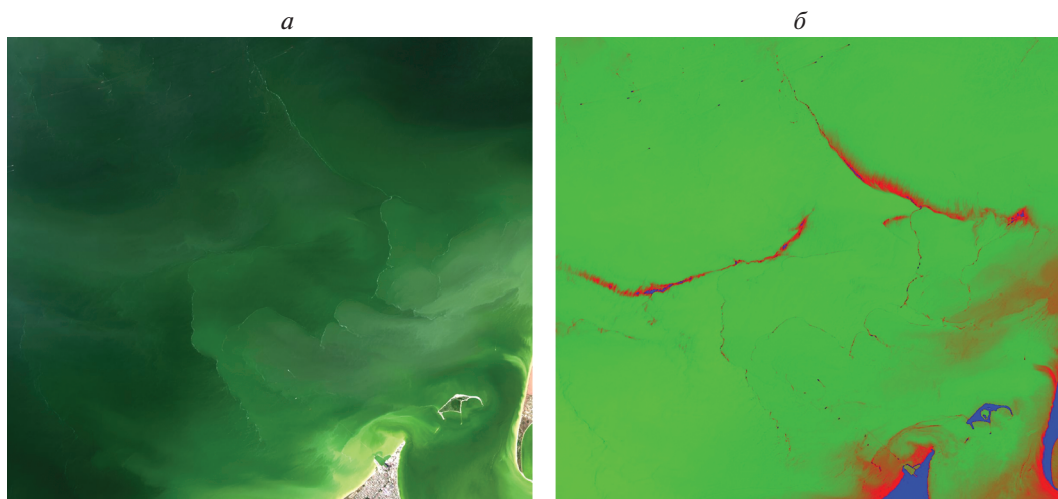


Рис. 1. *a* – RGB снимок Landsat; *б* – Карта яркости в ближнем ИК канале $\lambda = 0.775\text{--}0.90$ мкм.

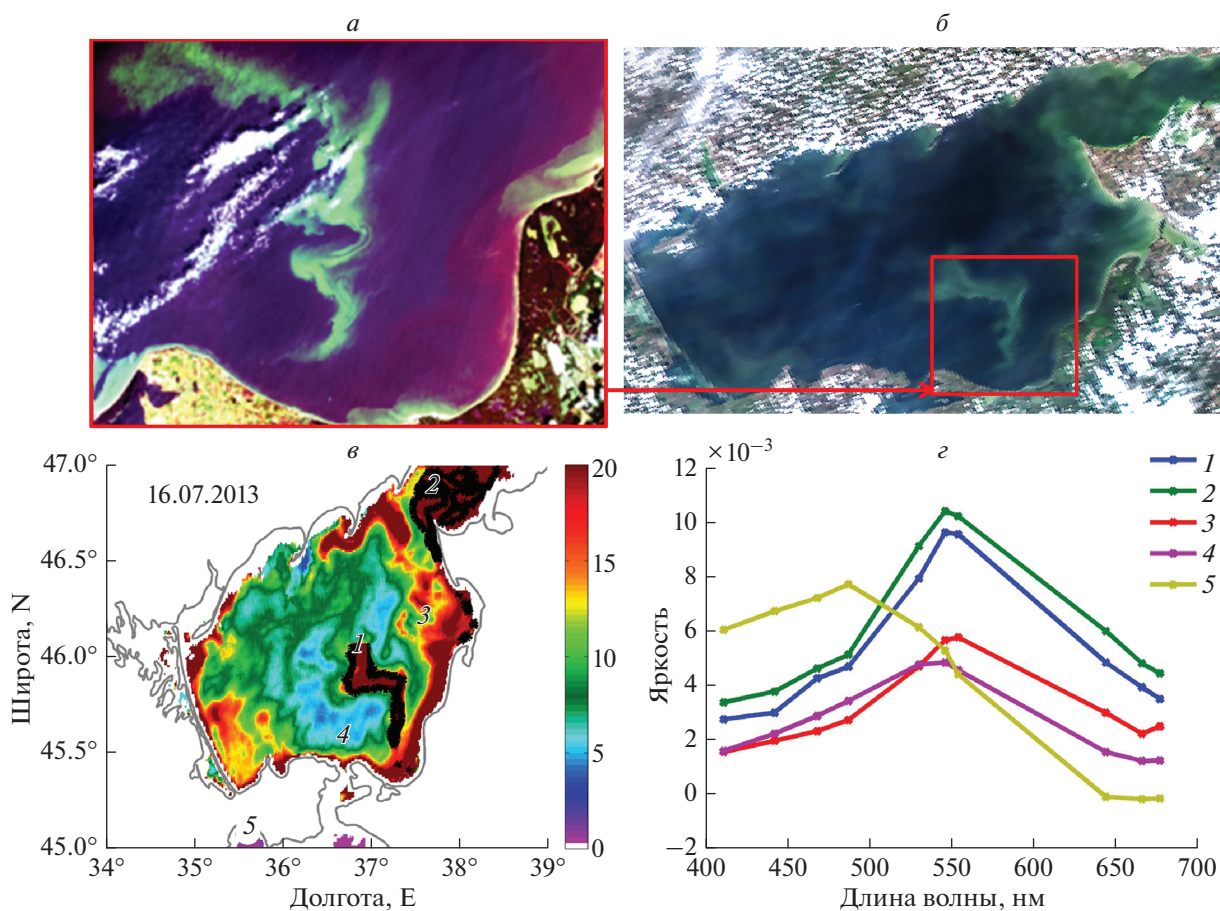


Рис. 2. *a* – RGB снимок Landsat за 16 июля 2013 г.; *б* – RGB снимок MODIS за 16 июля 2013 г.; *в* – пространственное распределение значений яркости в 10-канале MODIS; *г* – спектры выбранных точек.

Таблица 1. Набор флагов для алгоритма автоматической идентификации ЦБ по данным сканера MODIS

Номер	Условия для спектра, необходимые при идентификации ЦБ
1	$RRS(678) > 0.001$
2	$RRS(443) ./ RRS(547) < 0.8$
3	$(RRS(488) - RRS(469)) ./ (RRS(531) - RRS(488)) < 0.4 * (488 - 469) / (531 - 488)$
4	$(RRS(488) - RRS(469)) ./ (RRS(469) - RRS(443)) < (488 - 469) / (469 - 443)$
5	$RRS(645) ./ RRS(547) < 0.7$
6	$RRS(488) ./ RRS(547) < 0.8$
7	$RRS(469) > 0.85 * RRS(488)$

мом в 6–7 каналах (547–555 нм), свидетельствующим о высоких значениях обратного рассеяния взвеси. Еще одной особенностью спектра области цветения цианобактерий точек 1, 2 является “ступенька”, сформированная между 3 и 4 каналами (469 и 488 нм, соответственно). Возможной причиной образования данной “ступеньки” можно назвать наличие каротиноидов, которые играют фотозащитную функцию для ЦБ (Paerl et al., 1983, 1985), давая преимущество для роста в поверхностном слое вод с очень высокими значениями светового потока. Максимум поглощения каротиноидов приходится на интервал 460–510 нм (Holt, Krogmann, 1981). Таким образом, в области цветения ЦБ наблюдается сильное поглощение в 4 канале (488 нм). Эта особенность отсутствует для спектров 3–4, что говорит о недостаточном количеством поглощающих пигментов, характерных для ЦБ. Повышенные концентрации взвешенного вещества в этих точках, по-видимому, связаны с взмучиванием придонных осадков в мелководном Азовском море.

Данным методом было проанализировано более чем 20 квазисинхронных сцен Landsat/MODIS. Анализ “характерных” спектров ЦБ позволил разработать набор флагов, представленных в табл. 1, для алгоритма автоматической идентификации ЦБ по данным сканера MODIS. Флаги были подобраны таким образом, чтобы избежать детектирования ложных цветений. Каждый из флагов тщательно подбирался и проверялся на всем массиве данных MODIS за 2003–2019 гг.

Наличие ЦБ в воде приводит к изменению спектра отражательной способности, особенно в диапазоне длин волн 1–6 каналов (412–550 нм), соответствующих сине-зеленому спектру, что может быть вызвано наличием в составе ЦБ определенных пигментов.

Рассмотрим предложенную систему флагов.

1. Флаг 1 используется для идентификации вод с большим содержанием взвешенного вещества или ЦБ, поглощающего в ближнем ИК спектре.

2. Флаги 2, 6 позволяют “отсечь” воды, в которых недостаточно влияние хлорофилла (“чистые” воды или воды с повышенным содержанием взвешенного вещества).

3. Флаги 3, 4 используются для идентификации “ступеньки”, формирующейся, скорее всего за счет поглощения каротиноидов в канале 3 (469 нм) и 4 (488 нм). Также необходимо отслеживать угол, образованный линиями, соединяющими значения яркости в каналах 2, 3, 4 и 5.

4. Флаг 7 отвечает за “горизонтальное” положение “ступеньки”, сформированной значениями отражения между 3 и 4 каналами.

5. Флаг 5 позволяет отметить мелководные области, а также участки суши, в которых коэффициент отражения в ближнем ИК-канале выше, чем в более коротковолновой области спектра.

Примеры значений флагов для спектров, изображенных на рис. 2, приведены в табл. 2. Спектры условно мутных вод точек 3 и 4 не удовлетворяют флагам 3, 4 и 7, а спектры относительно чистых Черноморских вод точки 5 – условиям 1, 2, 4 и 6.

В табл. 2 зеленым цветом отмечены критерии, которые выполняются, а красным – которые не выполняются. Номера столбцов соответствуют номерам спектров, которые представлены на рис. 2, в. Строки – значения, полученные для каждого спектра и сравниваемые с приведенными критериями в табл. 1

На рис. 3 представлены еще два примера сопоставления RGB-снимков со спутника Landsat с картами распределения ЦБ, полученных по данным MODIS. На спутниковом снимке Landsat за 16 августа 2003 г. наблюдается область цветения ЦБ в центральной части Азовского моря, которая также выделяется и на картах MODIS, построен-

Таблица 2. Примеры значений флагов для спектров, изображенных на рис. 2, *з*

Флаг	Спектр					Критическое значение
	1	2	3	4	5	
1	0.0035	0.0044	0.0025	0.0012	-0.0002	>0.001
2	0.3093	0.3611	0.3438	0.4562	1.2741	<0.8
3	0.1307	0.1287	0.2103	0.4098	-0.3174	<0.18
4	0.336	0.6054	1.1823	0.8397	1.0370	<0.73
5	0.5017	0.5751	0.5257	0.3163	-0.0239	<0.7
6	0.4855	0.4921	0.4795	0.8385	1.462	<0.8
7	0.9087	0.8996	0.8468	0.8468	0.9346	>0.85

ных по предложенному нами алгоритму (см. черные контурные линии на рис. 3, *б*). Максимальное по интенсивности цветение наблюдается в Таганрогском заливе. Отсюда воды подверженные цветению распространяются от залива в южном направлении до 45.6° с.ш. При этом вдоль восточного берега наблюдается более чистые воды, за исключением районов устьев рек Кубань, Протока и Ахтарского лимана.

24 августа 2009 года цветение наблюдается в восточной части Азовского моря (рис. 3, *в*, 3, *з*). Максимальная концентрация ЦБ наблюдалась у стока реки Кубань, где водоросли образовывали нитчатую структуру на фронте речных вод. Подобные нитевидные структуры наблюдались также у Обиточной и Бердянской кос, и по центру Азовского моря. При сопоставлении RGB-снимка и карты распределения ЦБ, полученной по алгоритму, наблюдается достаточно хорошее соответствие. Алгоритм показывает отсутствие водорослей напротив Ясенского залива и отфильтровывает взмученные воды Арабатского залива.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственное распределение и сезонная изменчивость

На основе разработанного алгоритма были построены карты вероятности наблюдения ЦБ: выделенная область цветения отмечалась значением 1, все остальные пиксели – 0. Затем осреднение за выбранный промежуток времени определяло вероятность наблюдения ЦБ (P) в данной точке.

Карта СКО (среднеквадратичного отклонения) вероятности наблюдения ЦБ в Азовском море, полученная по предложенному алгоритму, показывают, что наиболее часто ЦБ отмечается в Та-

ганрогском заливе, поскольку гидрологические условия в этом районе наиболее благоприятны для их развития. Это подтверждается и данными биологических наблюдений (Матишов, Фуштей, 2003; Макаревич, Ларионов, 2006; Никитина, 2010). Однако, под действием течений, области цветения могут распространяться далеко вдоль восточного или западного берегов моря, откуда затем могут проникать в центральную часть моря (рис. 4, *а*). При этом наиболее встречаемое направление распространения южное – вдоль юго-восточного берега.

Сезонный ход вероятности наблюдения ЦБ (рис. 4, *б*) в Азовском море характеризуется наибольшими значениями с июня по октябрь, с выраженным пиком в августе, что согласуется с результатами анализа спутниковых данных высокого разрешения (Алескерова и др., 2019). Наименьшие значения наблюдаются в зимние месяцы, с декабря по март. Среднемесячные климатические карты P (рис. 5) показывают, что цветение обычно начинается в марте в Таганрогском заливе, откуда под действием циклонической циркуляции ЦБ переносятся на запад. В результате, в весенние месяцы чаще цветению подвержены воды северного побережья. В июне–июле ЦБ от выхода из Таганрогского залива начинают интенсивно распространяться на юг в центральную часть моря. В это время вдоль восточного побережья значения P достигают $P = 0.5$, т.е. ЦБ фиксируются в половине случаев. Интенсивные цветения цианобактерий *Microcystis aeruginosa* Kutz. Emend Elenk. и *Lyngbia limnetica* Lemm. в центральной восточной части Азовского моря отмечались, в частности, по данным натурных измерений в

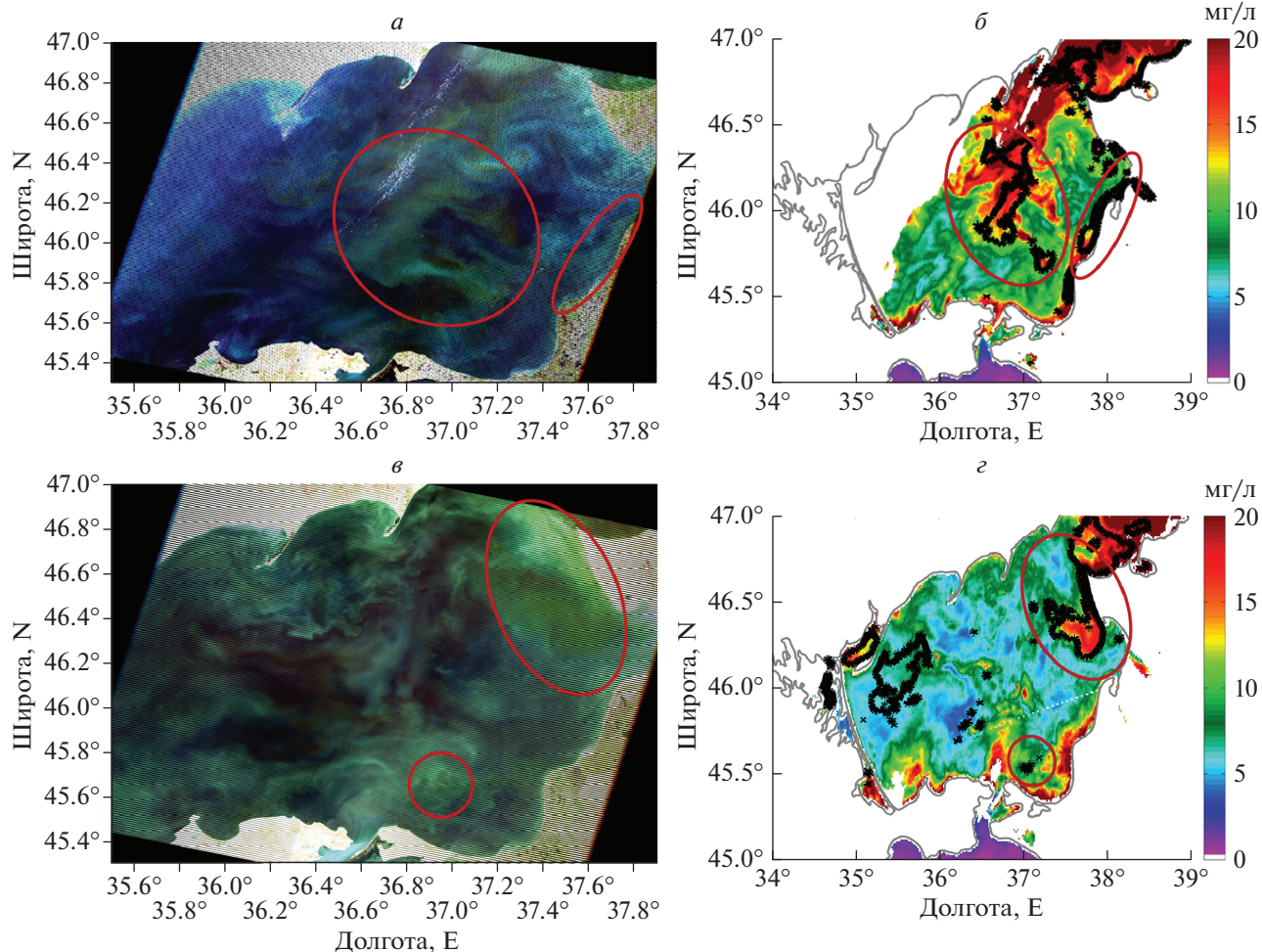


Рис. 3. *a* – RGB снимок Landsat-7 за 16 августа 2003 г.; *б* – контуры выделенных областей цветения ЦБ, которые наложены на карту MODIS хлорофилла А за 16 августа 2003 г.; *в* – RGB снимок Landsat-7 за 2 сентября 2015 г.; *г* – контуры выделенных областей цветения ЦБ, которые наложены на карту MODIS хлорофилла А за 2 сентября 2015 г.

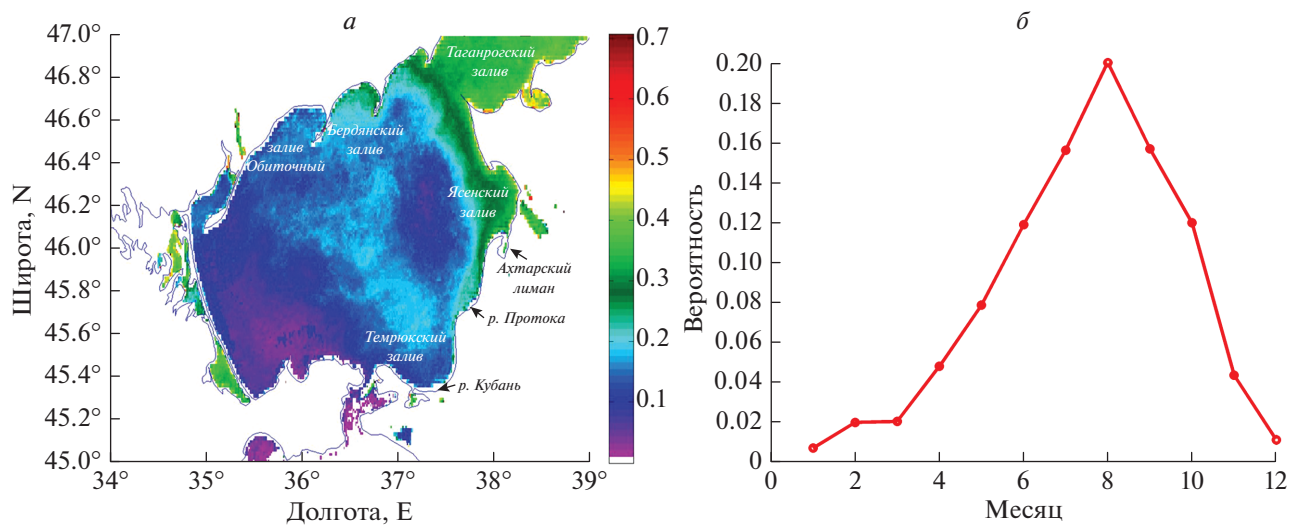


Рис. 4. *a* – Карта СКО вероятности наблюдения ЦБ в Азовском море, полученная по данным сканера MODIS; *б* – сезонный ход вероятности обнаружения ЦБ за 2003–2019 гг.

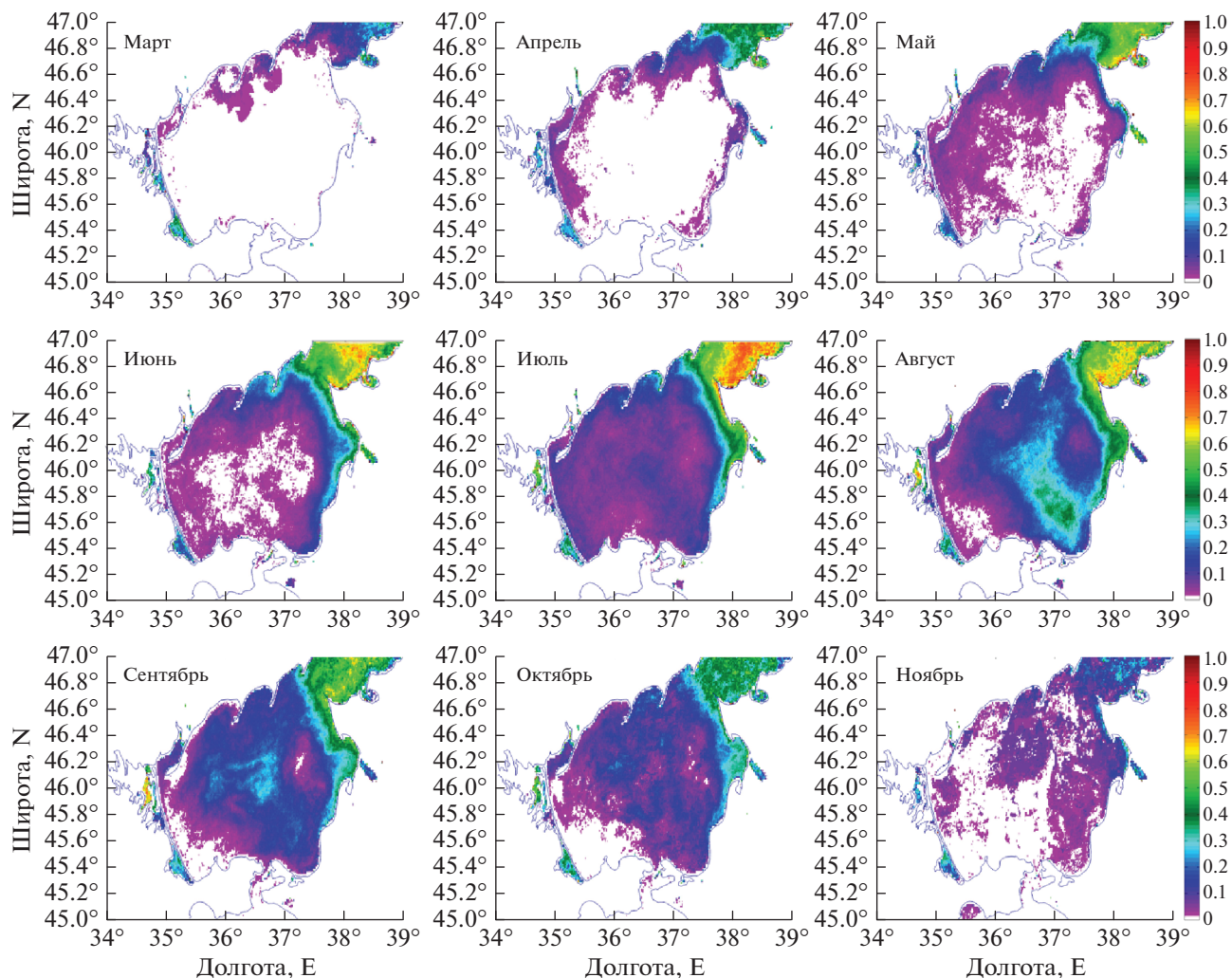


Рис. 5. Среднемесячные климатические карты вероятности обнаружения ЦБ в марте–ноябре за 2003–2019 гг.

июне 2005 г. (Селифонова, 2005). В августе ЦБ достигают юго-восточной части Азовского моря, откуда выносятся в центральную часть бассейна. Как показано в работе (Алескерова и др., 2019), такое распространение связано с ячейкой антициклонической циркуляции течений, которая возникает в восточной части Азовского моря, вероятно под влиянием интенсивного речного стока Дона и Кубани. Максимальные величины занимаемой площади цветения наблюдаются в летне-осенний период с июня по октябрь (рис. 5). В ноябре ЦБ наблюдаются редко, по большей части в Таганрогском заливе и вдоль восточного берега Азовского моря с вероятностью не более $P = 0.2$. В некоторые годы спутниковые измерения отмечают наличие ЦБ в Таганрогском заливе и в зимние месяцы, что также было отмечено в работе (Теренько 2010) по измерениям в декабре 2009 г.

Примеры эволюции цветения в различные годы

Рассмотрим распространение цветения ЦБ в Азовском море на примере 2012 г. (рис. 6). В апреле 2012 г. ЦБ наблюдаются в Таганрогском заливе. Вместе с водами залива они распространяются вдоль северного берега на восток до Бердянска. Локальный очаг цветения ЦБ в это же время наблюдается у Ахтарского лимана. Такая же карта вероятности наблюдения ЦБ повторяется и в мае. Но в мае, кроме ранее обозначенных районов, ЦБ встречаются в небольшой области в Темрюкском заливе, около стока реки Кубань с вероятностью $P = 0.3$. К июню цветение распространилось вдоль всего восточного побережья вплоть до Темрюкского залива. Источниками цветения здесь можно выделить Ахтарский лиман, реки Кубань и Протока. В июле цветению подвержено практически все Азовское море. Максимальная вероят-

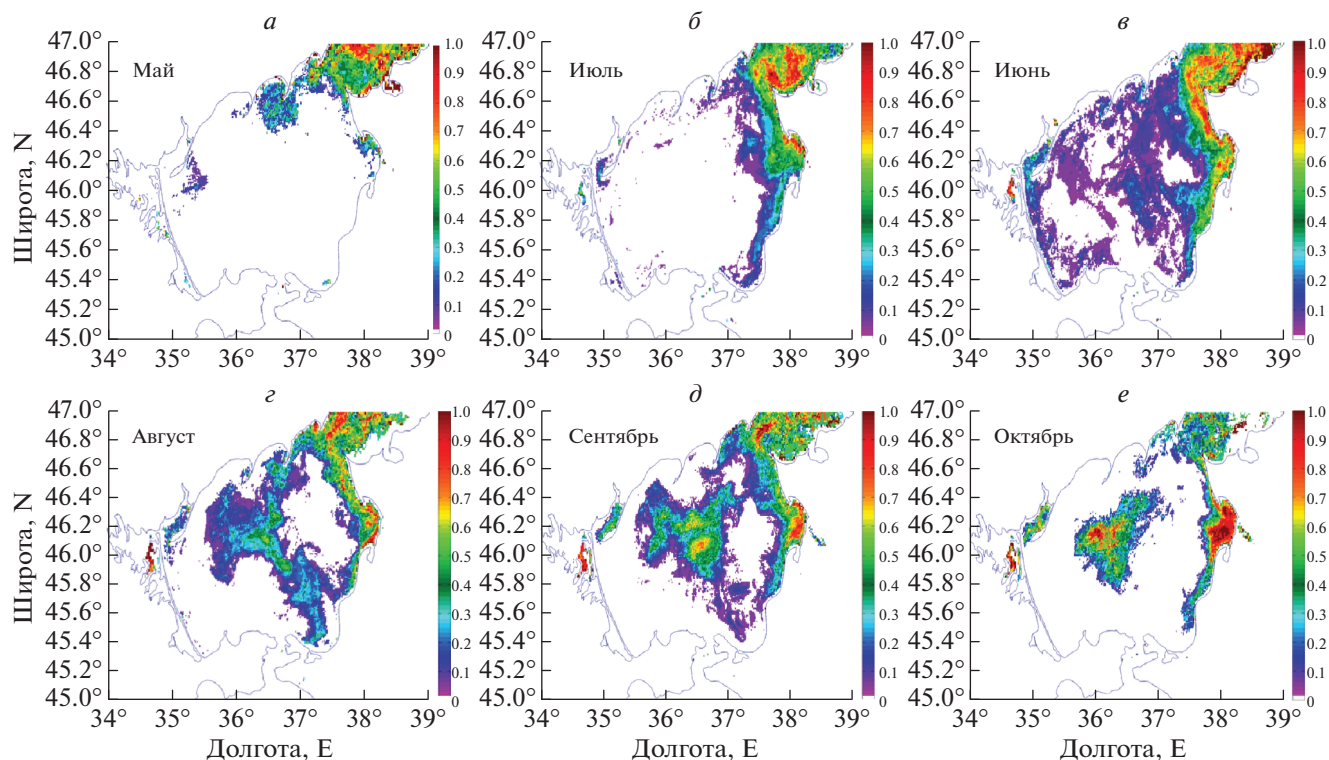


Рис. 6. Среднемесячные карты вероятности наблюдения ЦБ в 2012 г. по данным MODIS.

ность их наблюдения сохраняется для Таганрогского залива и вдоль восточного побережья.

В августе цветение ЦБ под действием антициклонических течений распространилось в центральную часть Азовского моря. В сентябре происходит разрушение возникшей антициклонической ячейки и формируется локальная область цветения в центре моря с максимумом наблюдения ЦБ около $P = 0.8$. В октябре выделяются две зоны, где сохраняется цветение ЦБ: в центральной части моря и вдоль восточного берега.

Детальный анализ показывает, что цветения характеризуются более короткопериодной изменчивостью. Рассмотрим пример эволюции цветения ЦБ в 2013 г. (рис. 7). Цветение ЦБ первоначально возникает в мае в Таганрогском заливе. В начале июня воды, подверженные цветению распространяются с Таганрогского залива вдоль восточного берега Азовского моря до Ясенского залива. К середине июня площадь ЦБ значительно увеличивается. Водоросли наблюдаются в Таганрогском заливе, вдоль северного берега Азовского моря до Обиточной косы, в Ясенском заливе и у стока рек Кубань и Притока. После 19 июня (рис. 7, в) цветение ЦБ разрушается. Это резкое уменьшение вероятно связано с действием шторма 19 июня, когда скорость ветра достигла 8–10 м/с. Ветровое воздействие приводит к усилению перемешивания. В результате верхний слой, в кото-

ром создаются наиболее благоприятные условия для азотфиксирующих ЦБ, разрушается, что приводит к ослаблению цветений (см. например Hunter et al., 2008). К концу июня и начала июля сохраняются две локальные области с высоким содержанием ЦБ: Таганрогский и Ясенский заливы. Цветение ЦБ в Азовском море снова усиливается к середине июля (рис. 7, д). В данный период времени ЦБ наблюдаются вдоль всего восточного побережья Азовского моря и начинают концентрироваться в локальной области в центре моря, которая отчетливо идентифицируется 16 июля. Более детально цветение ЦБ в это время наблюдается на RGB-компоните, полученном по спутниковому снимку Landsat-8 с высоким разрешением (рис. 7, e). Протяженность данной области ориентировочно составляет около 70 км с севера на юг, а ширина – около 12 км. Площадь данного цветения составила около 1200 км². С 19 июля образовавшаяся локальная область цветения начинает разрушаться, и воды, содержащие ЦБ, распространяются к северным берегам Азовского моря. Разрушение данного цветения в середине июля вероятно связано с увеличением скорости ветра до 10 м/с 19 и 21 июля.

К началу августа ЦБ вновь наблюдаются только в Таганрогском и Ясенском заливах. Следующая вспышка цветения ЦБ в центральной части Азовского моря наблюдается к середине августа.

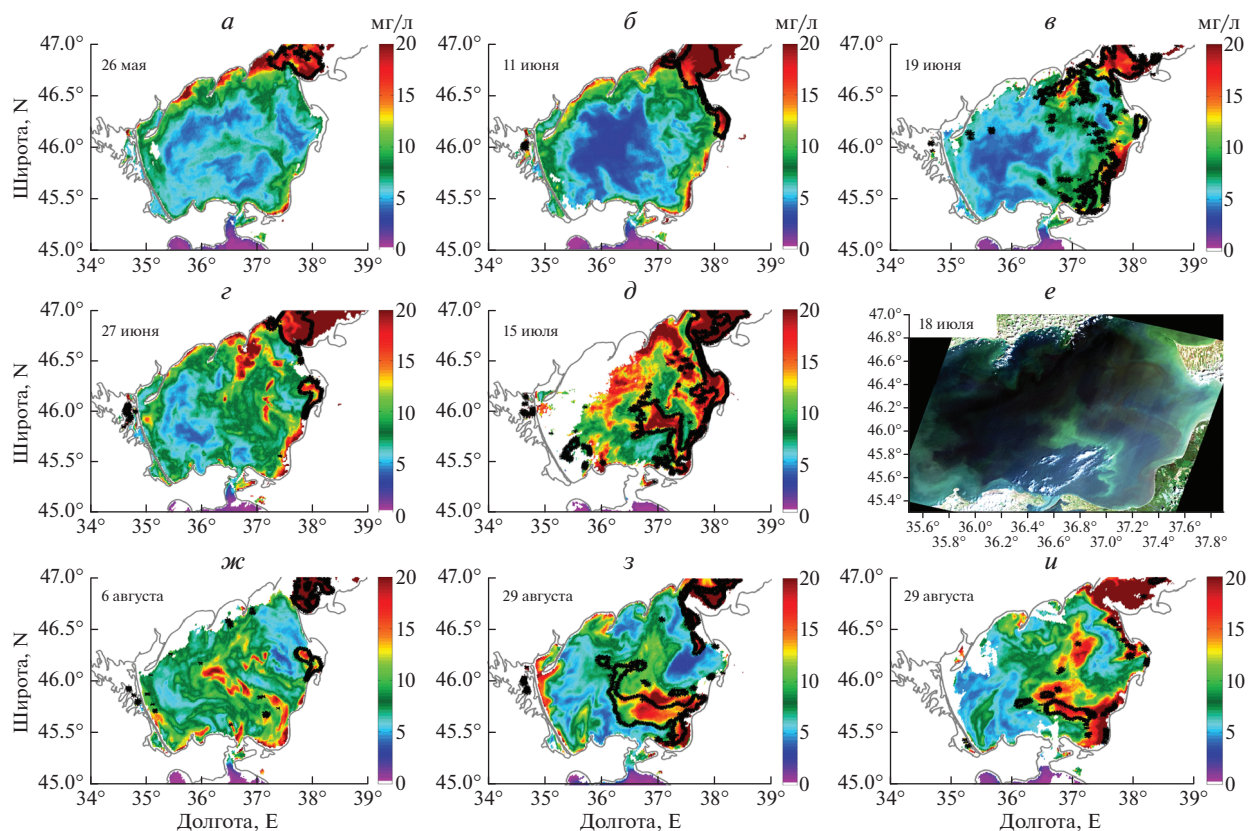


Рис. 7. Динамика развития цветения ЦБ в летний период 2013 г. *а–д, ж–и* – цветения ЦБ отмечены черным контуром, которые наложены на карту MODIS хлорофилла А (цветовая шкала); *е* – RGB снимок Landsat-8 за 18 июля 2013 г.



Рис. 8. График межгодовой изменчивости площади, занятой цветениями ЦБ в Азовском море по данным MODIS.

Максимальная область распространения ЦБ фиксируется 22 августа (рис. 7, з). К 29 августа площадь данного цветения значительно сокращается. В сентябре ЦБ наблюдаются только в Таганрогском и Ясенском заливах.

Межгодовая изменчивость цветения ЦБ

Предложенный спектральный алгоритм идентификации позволил оценить межгодовую изменчивость площади, занятой цветениями ЦБ в Азовском море за период 2003–2019 гг. Доля пло-

щади определялась как количество пикселей индетифицированных, как цветение ЦБ, деленное на общую площадь Азовского моря.

На графике межгодовой изменчивости (рис. 8 — черная линия) выделяется период 2004–2011 гг. с высокими значениями площадей цветения ЦБ, за которым следует резкое снижение в 2011–2020 гг. Максимальное количество ЦБ наблюдалось в 2008 г. со значениями в летний период около 0.55. В 2005–2007 и 2009 гг. максимальная площадь, занятая ЦБ, составляла порядка 0.4. Из графика видно, что площадь цветения ЦБ в летний период снизилась в последние годы от значений 0.3–0.4 (30–40%) до 0.05–0.1 (5–10%). Небольшое увеличение вероятности наблюдения ЦБ, ($P=1.5$) в последние годы наблюдалось в 2015–2016 гг.

На рис. 9 представлены среднегодовые карты вероятности наблюдения ЦБ в некоторые годы, полученные по данным сканера MODIS. Максимальные цветения ЦБ в 2006, 2008 и 2009 гг. практически полностью покрывают всю поверхность моря. В 2006 и 2009 (рис. 9, з) году четко наблюдается распространение ЦБ вдоль юго-восточного берега и их последующий вынос в центральную часть моря. В ходе экспедиции в декабре 2009 г. на станции, расположенной в Бердянском заливе были отобраны пробы фитопланктона, в которых наблюдалось практически полное доминирование ЦБ, составляющие по численности более 65%. Доминирование ЦБ (до 93%) было отмечено в северном и центральном районах моря, где отмечалось цветение *O. amphibia* (22.71 г/м^3) (Теренько, 2010). Эти результаты согласуются с анализом данных MODIS (рис. 9, з), что свидетельствует о пригодности разработанного алгоритма для идентификации цветении ЦБ.

В 2008 г. в Азовском море наблюдалось максимальное цветение ЦБ вдоль северного и восточного берегов (рис. 9, в). В юго-восточной части они проникали в центральную часть Азовского моря, покрывая в итоге почти всю его акваторию.

В 2005, 2015 г. наблюдается отчетливое преобладание распространения ЦБ вдоль северного берега, что менее характерно для Азовского моря (рис. 4, а; рис. 5). В июне 2005 г. была проведена экспедиция в центральной части Азовского моря и вдоль его восточного берега в ходе которой была измерена средняя биомасса фитопланктона, которая достигала 2.7 г/м^3 . В его составе доминировали ЦБ *Microcystis aeruginosa* Kutz. emend Elenk и *Lyngbia limnetica* Lemm. (70–99% биомассы). На отдельных станциях их биомасса достигала 8 г/м^3 (Селифонова, 2008). Таким образом полученное распределение на рис. 9, а согласуется с данными контактных измерений (Селифонова, 2008).

Минимальные по площади цветения наблюдались в последние годы исследуемого периода — 2018, 2019 гг. Для примера, в 2019 году (рис. 9, е)

цветение ЦБ в основном наблюдалось только в Таганрогском заливе, с небольшим проявлением в южном направлении до Ясенского залива и возле Ахтарского лимана.

Влияние физических факторов на временную изменчивость цветения ЦБ

На изменчивость цветения влияет несколько факторов, среди которых важное значение играет речной сток рек, который определяет соленость и приток биогенов, и скорость ветра, определяющая устойчивость верхнего слоя (Berg, Sutula, 2015). Анализ межгодовой изменчивости среднего речного стока (красная линия на рис. 10), показывает, что речной сток значительно снизился после 2008 г. Его максимальные значения были отмечены в 2004–2006 гг. ($1200 \text{ м}^3/\text{с}$), за которым следовало резкое уменьшение. В 2009–2018 гг. его значения были практически в 2 раза ниже ($600 \text{ м}^3/\text{с}$). Локальное увеличение стока до $900 \text{ м}^3/\text{с}$ отмечается также в 2008 г., в котором наблюдается максимальное значение площади цветений ЦБ за 2003–2019 гг. Совпадение наблюдающихся отрицательных трендов и локальных пиков свидетельствует о том, что уменьшение речного стока послужило важной причиной снижения интенсивности цветений ЦБ.

Еще одним важным фактором, влияющим на цветения ЦБ, может выступать изменения скорости ветра (синяя линия на рис. 10). Развитию ЦБ благоприятствуют условия устойчивой стратификации, которая позволяет им оставаться в поверхностном слое (Hunter et al., 2008; Wynne et al., 2010). В последние годы (после 2013, см. рис. 10) в регионе отмечается усиление скорости ветра (Kubryakov et al., 2019) в теплый период времени, которое вероятно также частично способствует уменьшению цветений. Воздействие ветра вызывает разрушение стратификации в верхних слоях, которое способствует перемешиванию вод, и как следствие разрушение цветений. Наименьшие значения площади ЦБ отмечены в 2014, 2018–2019 гг. Скорость ветра в летние периоды этих лет значительно возрастала. Поэтому несмотря на то небольшое увеличение стока рек, площади цветений были минимальны. Таким образом, изменение условий ветрового перемешивания также является одним из факторов, вызвавших ослабление цветений ЦБ в Азовском море. Это подтверждается подробным анализом динамики цветения в 2013 г. (рис. 7), который показывает, что цветение ЦБ разрушается при усилении ветра и наоборот, его локальные очаги возникают при безветренной погоде.

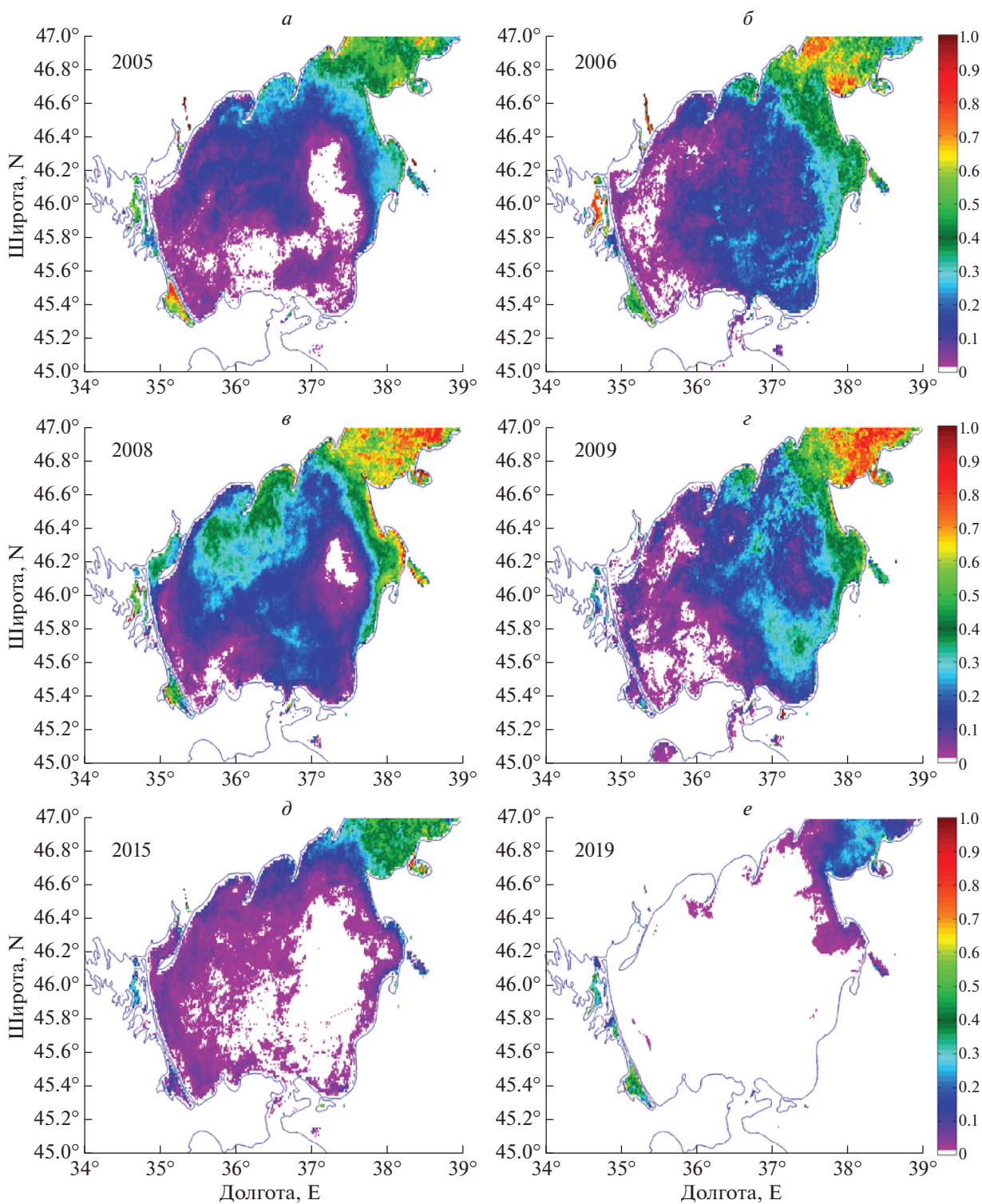


Рис. 9. Среднегодовое пространственное распределение вероятности наблюдения ЦБ в некоторые годы по данным MODIS.

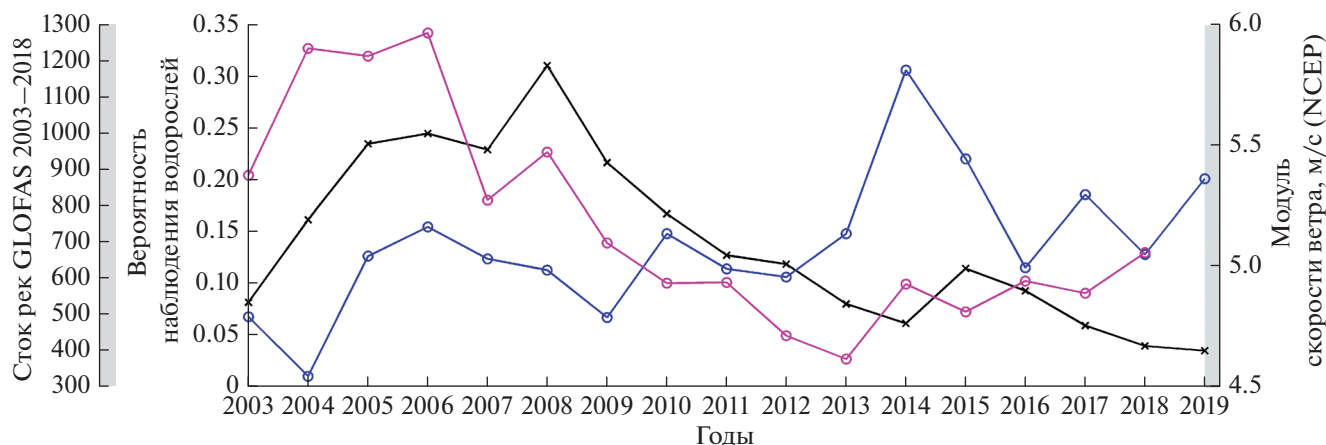


Рис. 10. График межгодовой изменчивости площади, занятой цветением ЦБ в Азовском море по данным MODIS (черная линия – вероятность наблюдения ЦБ, суммарного среднегодового стока рек Дона и Кубани (фиолетовая линия), среднегодовой скорости ветра за май–сентябрь над бассейном (синяя линия).

ВЫВОДЫ

Предложенный спектральный алгоритм автоматической идентификации ЦБ по данным сканера MODIS позволил оценить пространственную, сезонную и межгодовую изменчивость ареалов цветения ЦБ в Азовском море за исследуемый период 2003–2019 гг. С декабря по март встречаемость ЦБ близка к нулю, а в теплый период возрастает с максимумом в августе. В зависимости от года, цветение может быть как локализовано в Таганрогском заливе (2019 г.), так и распространиться по всей акватории моря (2008, 2009 гг.). При этом в центральную часть моря ЦБ попадают в результате их антициклонического движения вдоль восточного берега. Полученные данные о районах встречаемости ЦБ согласуются с результатами контактных исследований (Селифонова, 2008; Matishov et al., 2009). Спутниковые данные свидетельствуют, что влияние потенциально токсичных ЦБ на Азовское море в последние годы уменьшается. Анализ межгодовой изменчивости показал, что цветения ЦБ были максимальны в 2007–2009 гг., после чего наблюдается резкое снижение их интенсивности. Возможными причинами этого является уменьшение стока рек и рост скорости ветра, которые ухудшают условия для развития ЦБ в верхнем слое.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по грантам РФФИ № 19-05-00479 (разработка алгоритма идентификации цианобактерий), № 18-05-80025 (анализ сезонной изменчивости) и гос. заданию № 0555-2021-0006 (обработка спутниковых снимков).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Н.А., Мельников В.В., Снарская Д.Д. Роль цианобактерий в морских экосистемах // Биология моря. 2020. Т. 46. № 3. С. 161–173.
- Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1. Азовское море // Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. 2009. С. 400.
- Карабашев Г.С., Евдошенко М.А. Спектральные признаки цветения цианобактерий в Балтийском море по данным сканера MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 158.
- Ковалева Г.В. Микроводоросли бентоса, перифитона и планктона прибрежной части Азовского моря. 2006.
- Ковалёва Г.В. Проблема “цветения” воды в Азовском море // Труды Южного научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 8. С. 122–148.
- Макаревич П.Р., Ларионов В.В. Особенности строения фитопланктонных сообществ в зонах градиентов солености бассейна Азовского моря // Альгология. 2006. № 16. № 2. С. 216–226.
- Матишов Г.Г., Фуштей Т.В. К проблеме вредоносных “цветений воды” в Азовском море // Исследовано в России. 2003. Т. 6. С. 213–225.
- Никитина А.В. Численное решение задачи динамики токсичных водорослей в Таганрогском заливе // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2010. Т. 107. № 6. С. 113–116.
- Селифонова Ж.П. Функционирование экосистемы Азовского моря // Биология внутренних вод. 2008. № 3. С. 3–7.
- Сорокина В.В., Бердников С.В. Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 670–684.

- Теренько Г.В., Грандова М.А. Современное состояние фитопланктонного сообщества Украинского сектора Азовского моря в декабре 2009 г // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія. 2010. № 3. С. 44.
- Ясакова О.Н. Динамика фитопланктона в районе Темрюкского залива Азовского моря // Ботанический журнал: Санкт-Петербург. 2015. Т. 100. № 10. С. 1015–1029.
- Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Lishaev P.N., Mizyuk A.I. Cyanobacteria Bloom in the Azov Sea According to Landsat Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. Т. 55. № 9. С. 1416–1426.
- Berg M., Sutula M. Factors affecting the growth of cyanobacteria with special emphasis on the Sacramento-San Joaquin Delta // Southern California Coastal Water Research Project Technical Report. 2015. С. 869.
- Blondeau-Patissier D., Gower J.F., Dekker A.G., Phinn S.R., Brando V.E. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans // Progress in oceanography. 2014. Т. 123. С. 123–144.
- Harke M.J., Steffen M.M., Gobler C.J., Otten T.G., Wilhelm S.W., Wood S.A., Paerl H.W. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. Harmful Algae. 2016. 54. С. 4–20.
- Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F., ... Pappenberger F. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present // Earth System Science Data. 2020. Т. 12. № 3. С. 2043–2060. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-232>
- Hunter P.D., Tyler A.N., Willby N.J., Gilvear D.J. The spatial dynamics of vertical migration by *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic shallow lake: A case study using high spatial resolution time-series airborne remote sensing. Limnol. Oceanogr. 2008. 53: 2391–2406.
- Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: inter-annual and spatial variability // Marine Ecology Progress Series. 2007. Т. 343. С. 15–23.
- Kutser T., Metsamaa L., Strömbeck N., Vahtmäe E. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2006. Т. 67. № 1–2. С. 303–312.
- Kubryakov A., Stanichny S., Shokurov M., Garmashov A. Wind velocity and wind curl variability over the Black Sea from QuikScat and ASCAT satellite measurements. Remote sensing of environment. 2019. 224, 236–258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.034>
- Lavrova O.Y., Mityagina M.I. Manifestation specifics of hydrodynamic processes in satellite images of intense phytoplankton bloom areas // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Т. 52. № 9. С. 974–987.
- Matishov G.G. Matishov D.G., Stepanian O.V., Aksenov D.S. Complex studies of the Azov, Black, and Caspian seas performed on the Deneb survey vessel in 2007 // Oceanology. 2009. Т. 49. № 2. С. 290.
- Mizyuk A.I. Korotaev G.K., Grigoriev A.V., Puzina O.S., Lishaev P.N. Long-Term Variability of Thermohaline Characteristics of the Azov Sea Based on the Numerical Eddy-Resolving Model // Physical Oceanography. 2019. Т. 26. № 5. С. 438–450.
- Paerl H.W., Otten T.G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls // Microbial ecology. 2013. 65(4). С. 995–1010.
- Selifonova Z.P. The role of zooplankton in the functioning of the Taganrog Gulf ecosystem in the Sea of Azov // Inland Water Biology. 2010. Т. 3. № 4. С. 335–343.
- Sivonen K., Jones G.J. Cyanobacteria toxins. In: Chorus I., Betram, (Eds.), Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Public Health, Significance, Monitoring and Management. The World Health Organization / E and F.N. Spon. 1999. С. 41–51.
- Vincent R.K., Qin X., McKay R.M.L., Miner J., Czajkowski K., Savino J., Bridgeman T. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie // Remote Sensing of Environment. 2004. Т. 89. № 3. С. 381–392.
- Wynne T.T., Stumpf R.P., Tomlinson M.C., Dyble J. Characterizing a cyanobacterial bloom in western Lake Erie using satellite imagery and meteorological data. Limnology and Oceanography. 2010. 55(5). С. 2025–2036.

Spatio-Temporal Variability of Cyanobacteria Blooms Based on Their Automatic Identification According to Modis Data

P. N. Lishaev¹, A. A. Aleskerova¹, A. A. Kubryakov¹, N. V. Vasilenko¹, and S. V. Stanichny¹

¹Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

The paper proposes an automatic algorithm for identifying the areas of cyanobacterial (CB) bloom in the Sea of Azov based on the analysis of the optical spectra of MODIS satellite data. The algorithm was validated on the basis of comparison with high-resolution quasi-synchronous Landsat data. Spatial and temporal variability of CB blooms in the Sea of Azov in 2003–2019 was investigated based on the results of applying the algorithm; examples of the evolution of blooms in separate years were provided. CB bloom is observed in the Sea of Azov from March to November with a maximum in August. The most intense and long lasting blooms of CB are observed in the Taganrog Bay. In spring, they are carried east from here along the northern coast. In

June–July, CB begin to spread intensively to the south along the eastern coast, after which in some years they penetrate into the center of the basin under the influence of anticyclonic currents. Analysis of interannual variability showed that the highest intensity of blooms was in 2004–2011, with a maximum in 2008–2009, and dropped significantly in recent years (2011–2019). A possible reason for this decrease is the drop in the flow of the Don and Kuban rivers, as well as the increase in wind speed.

Keywords: cyanobacteria, algae, Sea of Azov, optical characteristics, satellite measurements, seasonal variability, interannual variability, brightness spectrum, MODIS, Landsat

REFERENCES

- Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Lishaev P.N., Mizyuk A.I.* Cyanobacteria Bloom in the Azov Sea According to Landsat Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. T. 55. № 9. C. 1416–1426.
- Andreeva N.A., Mel'nikov V.V., Snarskaya D.D.* Rol' cianobakterij v morskikh ekosistemah [The Role of Cyanobacteria in Marine Ecosystems] // *Biologiya morya*. 2020. T. 46. № 3. P. 161–173. (In Russian)
- Berg M., Sutula M.* Factors affecting the growth of cyanobacteria with special emphasis on the Sacramento-San Joaquin Delta // Southern California Coastal Water Research Project Technical Report. 2015. C. 869.
- Blondeau-Patissier D., Gower J.F., Dekker A.G., Phinn S.R., Brando V.E.* A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans // *Progress in oceanography*. 2014. T. 123. C. 123–144.
- Harke M.J., Steffen M.M., Gobler C.J., Otten T.G., Wilhelm S.W., Wood S.A., Paerl H.W.* A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. Harmful Algae. 2016. 54. C. 4–20.
- Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F., ... Pappenberger F.* GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present // *Earth System Science Data*. 2020. T. 12. № 3. C. 2043–2060. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-232>
- Hunter P.D., Tyler A.N., Willby N.J., Gilvear D.J.* The spatial dynamics of vertical migration by *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic shallow lake: A case study using high spatial resolution time-series airborne remote sensing. *Limnol. Oceanogr.* 2008. 53: 2391–2406.
- Il'in YU.P., Fomin V.V., D'yakov N.N., Gorbach S.B.* Gidrometeorologicheskie usloviya morej Ukrainy. T. 1. Azovskoe more // Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika. 2009. S. 400. (In Russian)
- Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R.* Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // *Marine Ecology Progress Series*. 2007. T. 343. C. 15–23.
- Karabashev G.S., Evdoshenko M.A.* Spektral'nye priznaki cveteniya cianobakterij v Baltijskom more po dannym skanera MODIS [Spectral features of cyanobacterial bloom in the Baltic Sea from MODIS data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. T. 12. № 3. S. 158.
- Kovaleva G.V.* Mikrovodorosli bentosa, perifitona i planktona pribrezhnoj chasti Azovskogo morya. 2006. (In Russian)
- Kovalyova G.V.* Problema “cveteniya” vody v Azovskom more // *Trudy YUzhnogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2020. T. 8. S. 122–148. (In Russian)
- Kutser T., Metsamaa, L., Strömbeck N., Vahtmäe E.* Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2006. T. 67. № 1–2. C. 303–312.
- Kubryakov A., Stanichny S., Shokurov M., Garmashov A.* Wind velocity and wind curl variability over the Black Sea from QuikScat and ASCAT satellite measurements. Remote sensing of environment. 2019. 224, 236–258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.034>
- Lavrova O.Y., Mityagina M.I.* Manifestation specifics of hydrodynamic processes in satellite images of intense phytoplankton bloom areas // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. T. 52. № 9. C. 974–987.
- Makarevich P.R., Larionov V.V.* Osobennosti stroeniya fitoplanktonnyh soobshchestv v zonah gradientov solenosti bazejna Azovskogo moray [The peculiarities of the structure of phytoplankton communities in the sea Azov basin salinity gradient areas] // *Al'gologiya*. 2006. № 16, № 2. S. 216–226. (In Russian)
- Matishov G.G., Fushtej T.V.* K probleme vredonosnyh “cvetenij vody” v Azovskom more // *Issledovano v Rossii*. 2003. T. 6. P. 213–225. (In Russian)
- Matishov G.G., Matishov D.G., Stepanian O.V., Aksenov D.S.* Complex studies of the Azov, Black, and Caspian seas performed on the Deneb survey vessel in 2007 // *Oceanology*. 2009. T. 49. № 2. C. 290.
- Mizyuk A.I., Korotaev G.K., Grigoriev A.V., Puzina O.S., Lishaev P.N.* Long-Term Variability of Thermohaline Characteristics of the Azov Sea Based on the Numerical Eddy-Resolving Model // *Physical Oceanography*. 2019. T. 26. № 5. C. 438–450.
- Nikitina A.V.* CHislennoe reshenie zadachi dinamiki toksichnyh vodoroslej v Taganrogskom zalive [Numerical solution of the problem of toxic algae dynamics in Taganrog bay] // *Izvestiya YUzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010. T. 107. № 6. P. 113–116. (In Russian)
- Paerl H.W., Otten T.G.* Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls // *Microbial ecology*. 2013. 65(4). C. 995–1010.
- Selifonova Z.P.* Funkcionirovanie ekosistemy Azovskogo morya [Functioning of the Azov Sea Ecosystem] // *Biologiya vnutrennih vod*. 2008. № 3. S. 3–7. (In Russian)
- Selifonova Z.P.* The role of zooplankton in the functioning of the Taganrog Gulf ecosystem in the Sea of Azov // *Inland Water Biology*. 2010. T. 3. № 4. C. 335–343.

- Sivonen K., Jones G.J.* Cyanobacteria toxins. In: Chorus, I., Betram, (Eds.), Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Public Health, Significance, Monitoring and Management. The World Health Organization/E and F.N. Spon. 1999. С. 41–51.
- Sorokina V.V., Berdnikov S.V.* Nutrient loading of the Don and Kuban on the ecosystem of the sea of Azov // Water Resources. 2018. Т. 45. № 6. С. 920–934.
- Teren'ko G.V., Grandova M.A.* Sovremennoe sostoyanie fitoplanktonnogo soobshchestva Ukrainskogo sektora Azovskogo morya v dekabre 2009 g // Naukovi zapiski Ternopil's'kogo nacional'nogo pedagogichnogo universitetu imeni Volodimira Gnatyuka.—Seriya: Biologiya. 2010. № 3. S. 44 (In Russian)
- Vincent R.K., Qin X., McKay R.M.L., Miner J., Czajkowski K., Savino J., Bridgeman T.* Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie // Remote Sensing of Environment. 2004. Т. 89. № 3. С. 381–392.
- Wynne T.T., Stumpf R.P., Tomlinson M.C., Dyble J.* Characterizing a cyanobacterial bloom in western Lake Erie using satellite imagery and meteorological data. Limnology and Oceanography. 2010. 55(5). С. 2025–2036.
- Yasakova O.N.* Dinamika fitoplanktona v rajone Temryuk-skogo zaliva Azovskogo morya // Botanicheskij zhurnal: Sankt-Peterburg. 2015. Т. 100. № 10. S. 1015–1029. (In Russian)

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ОЦЕНКА КОВАРИАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ ШУМА В ИЗМЕРЕНИЯХ
БОРТОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА ИКФС-2**

© 2022 г. Д. А. Козлов^{a, *}, И. А. Козлов^a, А. Б. Успенский^b, А. Н. Рублев^b, Ю. М. Тимофеев^c,
А. В. Поляков^c, М. В. Колесников^d

^aГосударственный научный центр Российской Федерации “Исследовательский центр имени М.В. Келдыша”,
Москва, Россия

^bНаучно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Москва, Россия

^cСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^dМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: dakozlov@kerc.msk.ru

Поступила в редакцию 10.06.2021 г.

Ковариационная матрица шума, квадратный корень из диагонали которой традиционно именуется радиометрическим шумом NESR, является одной из основных характеристик гиперспектральной инфракрасной аппаратуры и используется при “обращении” спектральных данных и оценке искомого состояния вектора атмосферы. В настоящей работе впервые представлены результаты исследования ковариационной матрицы шума в измерениях инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2, более 6 лет успешно функционирующего на орбите в составе КА “Метеор-М” № 2. Рассмотрены основные факторы, приводящие к корреляции шума в спектральных каналах, связанные как со свойствами шума в измеряемых прибором интерферограммах, так и с особенностями процедуры первичной обработки. Экспериментальная оценка ковариационной матрицы шума в выходных спектрах ИКФС-2 выполнена тремя различными способами: 1) по измерениям опорных источников излучения; 2) по измеряемым спектрам атмосферы; 3) по мнимой части калиброванных спектров атмосферы. Полученные результаты экспериментальной оценки согласуются с расчетом и могут быть использованы в задачах тематической обработки и усвоения данных ИКФС-2 в моделях численного прогноза погоды Росгидромета.

Ключевые слова: бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2, радиометрический шум, ковариационная матрица шума, численный прогноз погоды

DOI: 10.31857/S0205961422010043

ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 в составе целевой аппаратуры космического аппарата (КА) “Метеор-М” № 2 (запуск КА состоялся 8 июля 2014 г.) более 6 лет успешно функционирует на орбите (Головин и др., 2017; Timofeyev et al., 2019). Прибор обеспечивает измерение спектров уходящего теплового излучения системы “атмосфера–подстилающая поверхность” (ниже для краткости – спектров атмосферы) в спектральном диапазоне (660–2000) см⁻¹ со спектральным разрешением (0.37–0.45) см⁻¹ и радиометрическим шумом в диапазоне (0.15–0.45) мВт/(м² ср см⁻¹) (без учета аподизации). Диапазон изменения оптической разности хода (ОРХ) в регистрируемых интерферограммах составляет ±1.7 см, время съема одной интерферограммы – 0.5 с, пространственное разрешение в надире – 30 км, ширина полосы обзора – от 1000 до 2500 км, шаг пространственной сетки – от 60 до 110 км. По своим

характеристикам и назначению прибор ИКФС-2 относится к классу гиперспектральных ИК-зондировщиков для полярно-орбитальных КА (см. интернет-ресурс <https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments>).

Результаты сопоставления регистрируемых прибором спектров с независимыми спутниковыми измерениями (радиометр SEVIRI на геостационарных спутниках MSG и фурье-спектрометр IASI на полярно-орбитальных метеоспутниках MetOp) свидетельствуют о надлежащем качестве и стабильности радиометрической и спектральной калибровки (Zavelevich et al., 2018; Polyakov et al., 2017), а также о возможности применения целевой информации прибора для решения прикладных задач гидрометеорологии (Asmus et al., 2017; Polyakov et al., 2019; Цырульников и др., 2019).

Настоящая работа посвящена исследованию радиометрического шума в измерениях ИКФС-2 и оценке ковариационной матрицы шума (КМШ) в

спектрах. Знание КМШ необходимо для корректной интерпретации (“обращения”) данных ИКФС-2, а также для их эффективного усвоения в схемах численного прогноза погоды (ЧПП).

К примеру, для обращения данных ИКФС-2 и оценки искомого вектора состояния атмосферы \mathbf{x} (среди компонентов которого присутствуют вертикальные профили температуры и влажности) минимизируется функционал качества следующего вида (Timofeyev et al., 2019):

$$J = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + (\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}). \quad (1)$$

Здесь \mathbf{x}_b – априорное (фоновое) значение вектора состояния \mathbf{x} , \mathbf{B} – априорная ковариационная матрица вектора \mathbf{x} , $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ – оператор наблюдения, \mathbf{y} – вектор измеренных яркостей в выбранных $n \leq N$ спектральных каналах n ($N = 2701$ – количество каналов в спектрах ИКФС-2); \mathbf{R} – ковариационная матрица ошибок наблюдения [$n \times n$], учитывающая ковариационную матрицу шума (КМШ) прибора \mathbf{S}_ϵ в спектрах, а также “шумы” \mathbf{F} , связанные с ошибками моделирования $\mathbf{H}(\mathbf{x})$, наличием нелинейности и недостаточной репрезентативностью (Bormann et al., 2016):

$$\mathbf{R} = \mathbf{S}_\epsilon + \mathbf{F}. \quad (2)$$

До недавних пор при обращении данных гиперспектральных ИК-зондировщиков (включая ИКФС-2) путем минимизации (1) использовались диагональные ковариационные матрицы ошибок \mathbf{R}' , а при усвоении в схемах ЧПП наличие корреляции шума в соседних спектральных каналах достаточно успешно пренебрегалось прореживанием данных (усваивались измерения в удаленных друг от друга спектральных каналах) и инфляцией дисперсии: $\hat{\mathbf{R}} = \gamma \cdot \text{diag}\{\mathbf{S}_\epsilon\}$ ($\gamma > 1$ – коэффициент инфляции).

Однако современные исследования ведущих зарубежных прогностических центров (в частности, ЕСМWF – Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды) показывают целесообразность использования полной ковариационной матрицы ошибок наблюдения \mathbf{R} при усвоении спутниковых данных в схемах ЧПП (Bormann et al., 2016; Egesmaa, 2020). Для оценки матрицы \mathbf{R} выполняется анализ невязок между измеренными и расчетными спектрами (Desroziers et al., 2005); см. также (Egesmaa, 2020) с оценкой \mathbf{R} для данных ИКФС-2.

Цель данной статьи – оценка ковариационной матрицы шума \mathbf{S}_ϵ (“инструментальной” составляющей матрицы \mathbf{R} , см. (2)) для полного спектра ИКФС-2 ($N = 2701$) с учетом свойств шума в измеряемых интерферограммах и влияния процедур первичной обработки.

Работа построена следующим образом. В разделе 1 представлен анализ источников шума в измеряемых прибором ИКФС-2 интерферограммах, в том числе способных приводить к корреляции шума в частотной области. В разделе 2 рассмотрены операции, выполняемые на этапе первичной обработки и влияющие на КМШ в спектрах, а именно: коррекция самоаподизации, применение аподизации, интерполяция на требуемую шкалу волновых чисел. В разделе 3 рассмотрены различные способы оценки \mathbf{S}_ϵ , их преимущества, недостатки и особенности применения. В разделе 4 представлены результаты оценки КМШ в спектрах ИКФС-2, полученные различными способами.

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ИЗМЕРЕНИЯХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА ИКФС-2

В общем случае регистрируемую прибором спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ, [Вт/(м² ср см⁻¹)]) объекта наблюдения $L(\nu)$ можно представить в виде:

$$L(\nu) = L_0(\nu) + \Delta L_{\text{случ}}(\nu) + \Delta L_{\text{сист}}(\nu).$$

Здесь ν – волновое число, [см⁻¹]; $L_0(\nu)$ – истинный спектр объекта наблюдения, свернутый с аппаратной функцией (АФ) прибора, т.е. спектральным откликом на входное монохроматическое излучение; $\Delta L_{\text{случ}}(\nu) \equiv \epsilon(\nu)$ – случайная составляющая погрешности измерений, устраняемая усреднением по ансамблю реализаций; $\Delta L_{\text{сист}}(\nu)$ – систематическая составляющая, зависящая от измеряемой сцены. Рассмотрим подробнее источники случайных и систематических погрешностей фурье-спектрометра.

Источники случайных погрешностей (шумов) измерений фурье-спектрометра

Среди источников шума в измерениях фурье-спектрометра можно выделить (см., например, (Zavyalov et al., 2013)):

- 1) фотонный шум, связанный с дискретным характером излучения;
- 2) собственные (внутренние) шумы фотоприемника, включая тепловой шум, шум темнового тока и др.;
- 3) шумы электронного тракта (шум усилительного тракта, шум квантования);
- 4) шумы выборки, связанные с неравномерностью скорости изменения ОРХ в интерферограмме (при неидеальности частотных характеристик электронного тракта, а также при наличии рассогласования временных задержек сигнала основного и референтного каналов);

5) шум выборки, связанный с ограниченным отношением “сигнал—шум” в референтном канале, используемом для дискретизации интерферограммы с фиксированным шагом по ОРХ;

6) шумы, вызванные воздействием вибраций на интерферометр и обусловленные случайными флуктуациями угла наклона или поперечного сдвига интерферирующих пучков, приводящими к динамической микроразыюстировке интерферометра.

В аппаратуре ИКФС-2 основными источниками шума являются собственные шумы фотоприемника и предварительного усилителя, обладающие свойством стационарности и проявляющиеся в спектральной области в виде некоррелированного шума. Кроме того, в интерферограммах ИКФС-2 вблизи положения нулевой ОРХ имеет место дополнительный шум, возникающий вследствие неравномерности скорости изменения ОРХ и пропорциональный первой производной сигнала интерферограммы. В результате дисперсия шума в интерферограммах зависит от значения ОРХ, что приводит к частичной корреляции шума в спектральных отсчетах.

Динамическая микроразыюстировка интерферометра из-за возможного воздействия вибраций является распространенным источником спектрально коррелированного шума в измерениях фурье-спектрометров и в той или иной степени проявляется в аппаратуре IASI (Serio et al., 2018), CrIS (Zavayalov et al., 2011), NAST-I и S-HIS (Antonelli et al., 2004), однако в измерениях ИКФС-2 не зарегистрирована.

В целом, любой источник нестационарного шума в области интерферограмм приводит к наличию коррелированного шума в измеряемых прибором спектрах. Суммарная случайная составляющая погрешности спектральных измерений $\Delta L_{\text{случ}}(\nu) = \varepsilon$ характеризуется ковариационной матрицей шума S_ε , учитывающей как некоррелированный по спектру шум (т.е. стационарный в широком смысле в области интерферограмм), так и коррелированный:

$$S_\varepsilon = M\{\varepsilon \cdot \varepsilon^T\} = S_{\varepsilon, \text{некорр}} + S_{\varepsilon, \text{корр}} = \\ = \text{diag}\left(\text{NESR}_{\text{некорр}}^2\right) + S_{\varepsilon, \text{корр}}.$$

Квадратный корень из диагонали матрицы S_ε принято называть радиометрическим шумом прибора (или пороговой СПЭЯ) и обозначать NESR (*Noise Equivalent Spectral Radiance*):

$$\text{NESR} = \text{diag}^{1/2}(S_\varepsilon) = \\ = \left(\text{NESR}_{\text{некорр}}^2 + \text{NESR}_{\text{корр}}^2\right)^{1/2}.$$

Количественно корреляцию шума в спектральных каналах удобно оценивать с помощью

корреляционной матрицы шума C_ε , при этом очевидна связь между S_ε и C_ε :

$$S_\varepsilon = \text{diag}(\text{NESR}) \cdot C_\varepsilon \cdot \text{diag}(\text{NESR}); \\ C_\varepsilon = \text{diag}(\text{NESR}^{-1}) \cdot S_\varepsilon \cdot \text{diag}(\text{NESR}^{-1}).$$

Источники систематических погрешностей измерений фурье-спектрометра

Можно выделить два типа систематических погрешностей $\Delta L_{\text{сист}}(\nu)$ в измерениях фурье-спектрометра:

1) ошибки радиометрической калибровки, обусловленные нелинейностью фотоприемного устройства, неточностью определения СПЭЯ бортового черного тела (БЧТ), нестационарностью теплового состояния прибора на орбите, зависимостью коэффициента отражения зеркала сканера от угла сканирования и др.;

2) ошибки спектральной калибровки, обусловленные неточностью знания аппаратной функции прибора, а также погрешностью привязки измерений к шкале волновых чисел.

Результаты сопоставления с независимыми спутниковыми измерениями показывают для ИКФС-2 наличие обоих типов погрешностей калибровки (Polyakov et al., 2017; Zavelevich et al., 2018). При этом ошибки радиометрической калибровки проявляются в спектре в виде медленно меняющейся функции волнового числа, а ошибки спектральной калибровки, наоборот, имеют “линейчатый” спектральный характер и проявляются в линиях поглощения атмосферных газов.

Следует отметить, что в настоящей работе проводится анализ исключительно случайных погрешностей измерений ИКФС-2 и оценивается ковариационная матрица шума S_ε . Вклад систематических ошибок в дальнейшем может быть косвенно определен при оценке ковариационной матрицы ошибок наблюдения R путем анализа невязки между измерениями и расчетом (“Obs-Calc”). Рассмотрим процедуру первичной обработки и преобразования интерферограмм в калиброванные спектры атмосферы и определим ее влияние на КМШ.

ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИКФС-2 И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА КМШ

Первичная обработка данных ИКФС-2 заключается в преобразовании регистрируемых прибором интерферограмм (данные уровня 0) в радиометрические калиброванные спектры излучения атмосферы (уровень 1А), которые затем пересчитываются на заданную сетку спектральных отсчетов с применением выбранной функции аподизации и коррекцией искажений аппарат-

ной функции прибора вследствие самоподизации (уровень данных 1С).

Стандартное выражение для определения радиометрически калиброванных спектров $L_{\text{атм},1\text{А}}(\nu)$ по измерениям опорных источников имеет вид (Revercomb et al., 1988):

$$L_{\text{атм},1\text{А}}(\nu) = \text{Re} \left\{ \frac{\tilde{S}_{\text{атм}}(\nu) - \langle \tilde{S}_{\text{косм}}(\nu) \rangle}{\langle \tilde{S}_{\text{бчт}}(\nu) \rangle - \langle \tilde{S}_{\text{косм}}(\nu) \rangle} \right\} L_{\text{бчт},0}(\nu).$$

Здесь $\tilde{S}_{\text{атм}}(\nu)$, $\tilde{S}_{\text{бчт}}(\nu)$, $\tilde{S}_{\text{косм}}(\nu)$ – фурье-образы от регистрируемых интерферограмм атмосферы, БЧТ и космоса, являющиеся комплексными вследствие несимметричности $I(x)$ относительно положения нулевой ОРХ; $L_{\text{бчт},0}(\nu)$ – СПЭЯ БЧТ, определяемая на этапе наземной калибровки и уточняемая в ходе летных испытаний; $\langle \dots \rangle$ – оператор усреднения по массиву измерений опорных источников на каждом калибровочном цикле; $\text{Re}\{\dots\}$ – оператор взятия действительной части комплексного числа. Подробнее методика радиометрической калибровки ИКФС-2, включающая в себя коррекцию нелинейности фотоприемника (фоторезистор HgCdTe), представлена в работах (Козлов, 2013; Козлов, 2017).

Для получения данных уровня 1С выполняется процедура спектральной коррекции:

$$\begin{aligned} L_{\text{атм},1\text{С}} &= \mathbf{IM} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{ISA} \cdot \mathbf{F} \cdot L_{\text{атм},1\text{А}} \equiv \\ &\equiv \mathbf{SCM} \cdot L_{\text{атм},1\text{А}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{F} = \text{diag}(\mathbf{f})$ – полосовой фильтр для минимизации краевых эффектов при матричном умножении, \mathbf{ISA} – матричный оператор коррекции самоподизации, определяемый на этапе наземной калибровки при измерении аппаратной функции прибора (спектрального отклика на входное монохроматическое излучение); \mathbf{A} – матричный оператор аподизации; \mathbf{IM} – интерполяционная матрица пересчета спектров на требуемую (фиксированную) шкалу волновых чисел; \mathbf{SCM} – матрица спектральной коррекции.

При отсутствии систематической составляющей погрешности измерений калиброванный спектр атмосферы соответствует смеси сигнала и шума:

$$L_{\text{атм},1\text{С}} = L_0 + \varepsilon = L_0 + \mathbf{S}_\varepsilon^{1/2} \mathbf{n}. \quad (4)$$

Здесь L_0 – полезный сигнал, \mathbf{n} – некоррелированный гауссовый шум с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, \mathbf{S}_ε – ковариационная матрица шума данных уровня 1С, определяемая выражением:

$$\mathbf{S}_\varepsilon = \mathbf{SCM} \cdot \mathbf{S}_{\varepsilon,0} \cdot \mathbf{SCM}^T.$$

Здесь $\mathbf{S}_{\varepsilon,0}$ – КМШ данных уровня 1А. Таким образом, следует различать КМШ в спектральных

данных уровня 1А и уровня 1С, т.е. до и после спектральной коррекции.

Рассмотрим влияние каждого из операторов, входящих в выражение (3).

Коррекция самоподизации

Самоподизация проявляется в зависимости огибающей $A(x; \nu_0)$ и фазы $\Phi(x; \nu_0)$ интерферограмм, регистрируемых фурье-спектрометром при наблюдении источника квазимонохроматического излучения с волновым числом ν_0 , от величины оптической разности хода x :

$$I(x; \nu_0) = A(x; \nu_0) \cos[2\pi\nu_0 x + \Phi(x; \nu_0)].$$

К факторам, приводящим к самоподизации, относятся угловые размеры мгновенного поля зрения, а также динамическая разбюстировка интерферометра, проявляющаяся в зависимости угла наклона и поперечного смещения интерферирующих пучков от величины ОРХ (см., например, (Козлов, 2017)). Следствием самоподизации является искажение формы аппаратной функции (АФ), определяемой конечным диапазоном изменения ОРХ и имеющей вид sinc-функции. Это искажение АФ состоит в ее уширении (ухудшении спектрального разрешения), асимметрии формы, смещении максимума в сторону уменьшения волновых чисел и появлении мнимой части (рис. 7 статьи (Головин и др., 2013)). Кроме того, возникает зависимость формы АФ от волнового числа входного излучения.

На этапе наземной калибровки аппаратуры ИКФС-2 по результатам измерений интерферограмм для лазерных источников монохроматического излучения проводится моделирование (расчет) самоподизации и формы АФ прибора для всего рабочего спектрального диапазона (5–15) мкм с учетом угловой чувствительности прибора и параметров остаточной разбюстировки интерферометра (рис. 8 статьи (Головин и др., 2013)). Результаты моделирования представляются в виде матрицы самоподизации \mathbf{SA} , обратная к которой ($\mathbf{ISA} = \mathbf{SA}^{-1}$) используется в выражении (3).

КМШ в спектрах после коррекции самоподизации определяется выражением:

$$\mathbf{S}_{\varepsilon,ISA} = \mathbf{ISA} \cdot \mathbf{S}_{\varepsilon,0} \cdot \mathbf{ISA}^T,$$

диагональные элементы которой, соответствующие дисперсии шума, равны (Han et al., 2015):

$$\text{NESR}_{ISA,i}^2 = \sum_{j=1}^{N_1} \text{ISA}_{i,j}^2 \text{NESR}_{0,j}^2 \approx \text{NESR}_{0,i}^2 \cdot \beta_{ISA,i}^2.$$

Здесь NESR_0 – радиометрический шум в спектрах уровня 1А, медленно меняющийся с ростом волнового числа (что справедливо на практике); N_1 – число отсчетов в спектрах уровня 1А; β_{ISA} – коэф-

коэффициенты усиления шума вследствие коррекции самоаподизации:

$$\beta_{ISA,i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_1} ISA_{i,j}^2}. \quad (5)$$

Таким образом, в результате коррекции самоаподизации форма АФ ИКФС-2 приводится к sinc-функции, однако это ведет к усилению уровня шума в скорректированных спектрах и возникновению корреляции в соседних спектральных отсчетах.

Применение аподизации

Аподизация в фурье-спектроскопии заключается в умножении измеряемых прибором интерферограмм $I(x)$ на заданную "оконую" функцию $g(x)$ (например, функция Гаусса, Хэмминга, Блэкмана-Харриса и др.), что позволяет локализовать АФ для аподизированных данных и снизить влияние боковых лепестков АФ.

Для фурье-спектрометра ИКФС-2 используется гауссова функция аподизации:

$$g(x) = \exp[-2\pi^2 s^2 x^2].$$

Здесь $s = \text{FWHM}/(2\sqrt{2\ln 2})$, FWHM – ширина гауссоиды (по уровню 0.5) в спектральной области, выбранная равной 0.7 см^{-1} для длинноволнового (LW) поддиапазона ($660.0\text{--}1209.5 \text{ см}^{-1}$) и 1.4 см^{-1} для средневолнового (MW) поддиапазона ($1210.2\text{--}2000.5 \text{ см}^{-1}$).

Применение аподизации в спектральной области может быть представлено матричным оператором \mathbf{A} (Amato et al., 1998). Элементы матрицы \mathbf{A} для гауссовой аподизации равны:

$$A_{i,j} = \frac{1}{2\text{MPD} \cdot s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\Delta v^2(i-j)^2}{2s^2}\right].$$

Здесь MPD – значение максимальной ОРХ, равное 1.7 см для ИКФС-2.

Выражение для КМШ и дисперсии шума в аподизированных спектрах имеет вид:

$$\mathbf{S}_{\varepsilon,APD} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}_{\varepsilon,0} \cdot \mathbf{A};$$

$$\text{NESR}_{APD,i}^2 = \text{diag}(\mathbf{S}_{\varepsilon,APD}) \approx \text{NESR}_0^2 \cdot \beta_{APD}^2.$$

Здесь $\mathbf{S}_{\varepsilon,0}$ и NESR_0 – КМШ и радиометрический шум до аподизации; β_{APD} – коэффициент усиления шума вследствие аподизации, введенный по аналогии с (5):

$$\begin{aligned} \beta_{APD,i} &= \sqrt{\sum_{j=1}^{N_1} A_{i,j}^2} = (2\text{MPD} \cdot 2s\sqrt{\pi})^{-0.5} = \\ &= \left(2\text{MPD} \cdot \text{FWHM} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2\ln 2}}\right)^{-0.5}. \end{aligned}$$

Для ИКФС-2 имеем: $\beta_{APD,LW} \approx 0.53$, $\beta_{APD,MW} \approx 0.37$.

Для некоррелированного шума в спектрах до аподизации значения элементов КрМШ после гауссовой аподизации равны:

$$\begin{aligned} C_{\varepsilon,APD}[i,j] &\approx \exp\left[-\frac{\Delta v^2(i-j)^2}{4s^2}\right] = \\ &= \exp\left[\frac{-\Delta v^2(i-j)^2}{\text{FWHM}^2} \cdot 2\ln 2\right]. \end{aligned}$$

С учетом того, что в ИКФС-2 для обоих поддиапазонов (LW и MW) значения FWHM равны удвоенному значению шага сетки Δv , получим:

$$C_{\varepsilon,APD}[i,j] \approx \exp\left[-(i-j)^2 \frac{\ln 2}{2}\right] = 2^{-\frac{(i-j)^2}{2}}. \quad (6)$$

Значения диагональных элементов матрицы $\mathbf{C}_{\varepsilon,APD}$, вычисленные согласно (6), равны: $C_{\varepsilon,APD}[i, i-1] \approx 0.7071$, $C_{\varepsilon,APD}[i, i-2] = 0.25$, $C_{\varepsilon,APD}[i, i-3] \approx 0.0442$, $C_{\varepsilon,APD}[i, i-4] \approx 0.0039$ и т.д.

Таким образом, применение аподизации приводит, с одной стороны, к снижению дисперсии шума в спектральных каналах, а с другой – к корреляции шума в соседних отсчетах, при этом коэффициенты корреляции инвариантны относительно сдвига по волновому числу.

Интерполяция на заданную сетку волновых чисел

Дискретизация интерферограмм фурье-спектрометра ИКФС-2 осуществляется с шагом, равным длине волны лазера референтного канала ($\lambda_{\text{РЕФ}} \approx 1.31 \text{ мкм}$). В процессе эксплуатации прибора на орбите длина волны излучения лазера меняется вследствие флуктуаций температуры лазерного модуля и тока накачки, а также из-за процессов старения. Шаг сетки спектральных отсчетов в исходных спектрах составляет: $\Delta v = (2\text{MPD})^{-1} \approx 0.3 \text{ см}^{-1}$.

Выражение для интерполяционной матрицы $\mathbf{IM} [N \times N_1]$ пересчета на выходную сетку спектральных отсчетов имеет вид:

$$\mathbf{IM} = \text{sinc}\left(\frac{\mathbf{V}_{\text{IC}} - \mathbf{V}_{\text{aux}}}{\Delta v_{\text{aux}}}\right).$$

Здесь \mathbf{V}_{aux} – матрица, элементы строк которой являются промежуточной сеткой волновых чисел с шагом $\Delta v_{\text{aux}} = 0.3 \text{ см}^{-1}$, а \mathbf{V}_{IC} – матрица, элементы столбцов которой являются сеткой выходных спектральных отсчетов с шагом 0.35 (LW) и $0.7 \text{ см}^{-1} \text{ (MW)}$.

Таким образом, интерполяция спектральных отсчетов на выходную сетку волновых чисел также влияет на корреляцию шума в спектральных отсчетах.

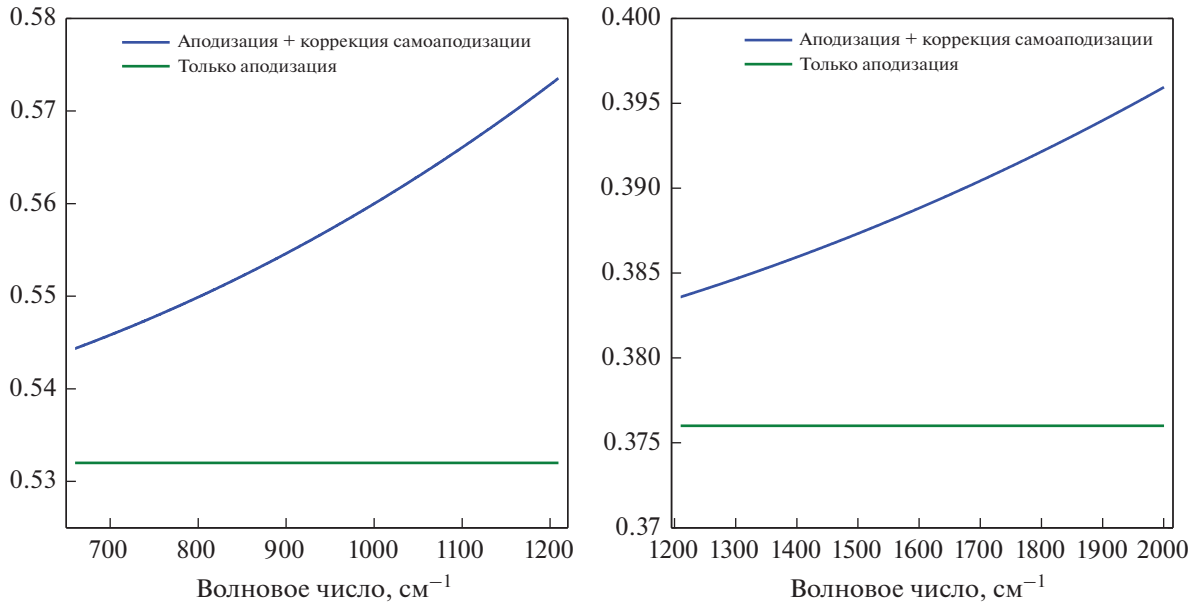


Рис. 1 Графики коэффициентов усиления шума β для LW- (слева) и MW-поддиапазона (справа) ИКФС-2.

Расчетная КМШ для данных ИКФС-2 уровня 1С

Определим совместное влияние операций, выполняемых на этапе преобразования данных ИКФС-2 уровня 1А в спектры уровня 1С, для случая, когда шум в интерферограммах является стационарным. Тогда КМШ данных уровня 1А является диагональной, а КМШ данных уровня 1С определяется выражением:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_\epsilon &= \mathbf{SCM} \cdot \text{diag}(\text{NESR}_0^2) \cdot \mathbf{SCM}^T = \\ &= \text{diag}(\text{NESR}) \mathbf{C}_\epsilon \text{diag}(\text{NESR}). \end{aligned}$$

Здесь $\text{diag}(\text{NESR})$ – диагональная матрица с вектором NESR на главной диагонали.

Дисперсия шума NESR^2 в выходных спектрах ИКФС-2 равна:

$$\begin{aligned} \text{NESR}_i^2 &\approx \text{NESR}_{0,i}^2 \cdot \sum_{j=1}^N \text{SCM}_{i,j}^2 \approx \\ &\approx \text{NESR}_{0,i}^2 \cdot \beta_{ISA,i}^2 \cdot \beta_{APD,i}^2. \end{aligned}$$

Здесь NESR_0 – радиометрический шум в спектрах уровня 1А (до спектральной коррекции).

На рис. 1 представлены графики отношения радиометрического шума NESR в спектрах ИКФС-2 уровня 1С к радиометрическому шуму NESR_0 в спектрах уровня 1А. Результаты расчета матрицы \mathbf{C}_ϵ для спектров ИКФС-2 уровня 1С представлены на рис. 2, а графики сечений матрицы \mathbf{C}_ϵ представлены на рис. 3 (слева – диагонали, справа – выбранные строки). Значимо отличающимися от нуля являются лишь первые три диагонали.

Рассмотрим способы оценки КМШ в измерениях фурье-спектрометра.

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ КОВАРИАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ ШУМА В СПЕКТРАХ

Существующие способы оценки шума в измерениях гиперспектрального ИК-зондировщика можно классифицировать по объекту наблюдения (атмосфера или опорные источники излучения), по способу выделения сигнала от шума (путем усреднения по ансамблю реализаций, методом главных компонент, с использованием внешних данных), по используемой части комплексных калиброванных спектров (действительная или мнимая часть) и др. Рассмотрим преимущества, недостатки и особенности их применения.

Оценка шума по измерениям опорных источников

Стандартным способом оценки шума в измерениях фурье-спектрометра является анализ измерений опорных источников. Данный метод используется для оценки радиометрического шума $\text{NESR}(v)$ в программном комплексе первичной обработки данных ИКФС-2 (ПК “IKFSPrepSuite”). В этом случае вычисляются калиброванные спектры опорных источников:

$$\tilde{L}_{\text{опор},i}(v) = \frac{\tilde{S}_{\text{опор},i}(v) - \langle \tilde{S}_{\text{косм}}(v) \rangle}{\langle \tilde{S}_{\text{бчт}}(v) \rangle - \langle \tilde{S}_{\text{косм}}(v) \rangle} L_{\text{бчт},0}(v),$$

а для оценки шумовой составляющей в спектрах опорных источников вычисляются разности:

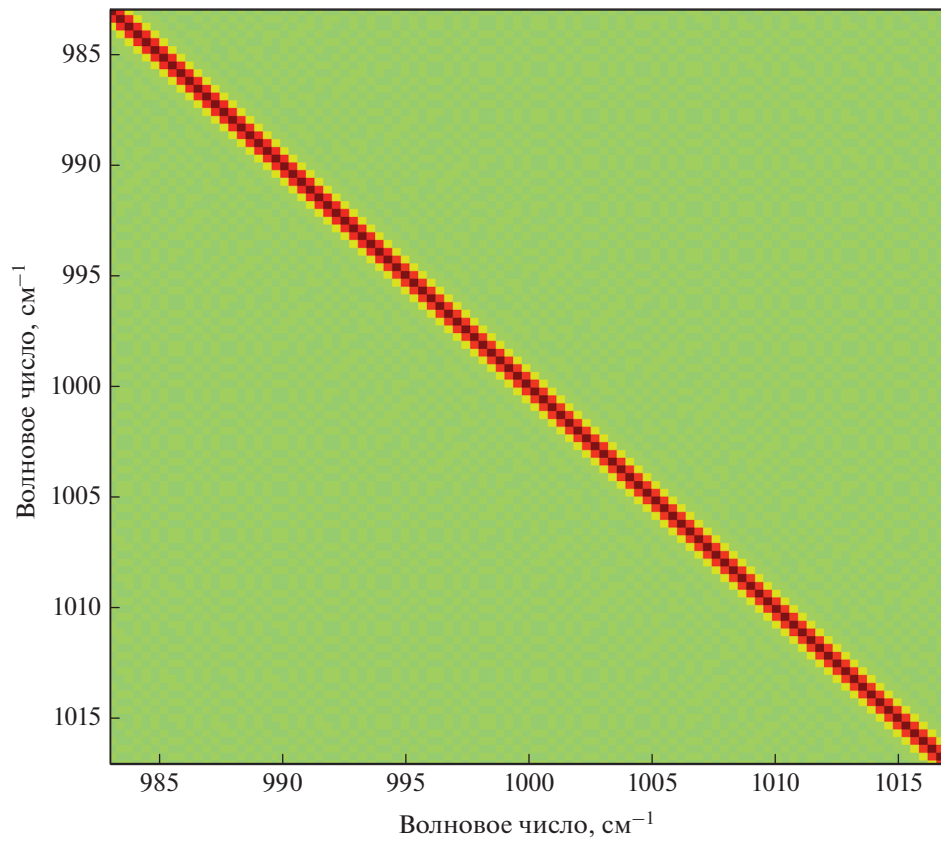


Рис. 2 Расчетная корреляционная матрица шума в спектрах ИКФС-2 после аподизации, коррекции самоаподизации и интерполяции на выходную сетку спектральных отсчетов.

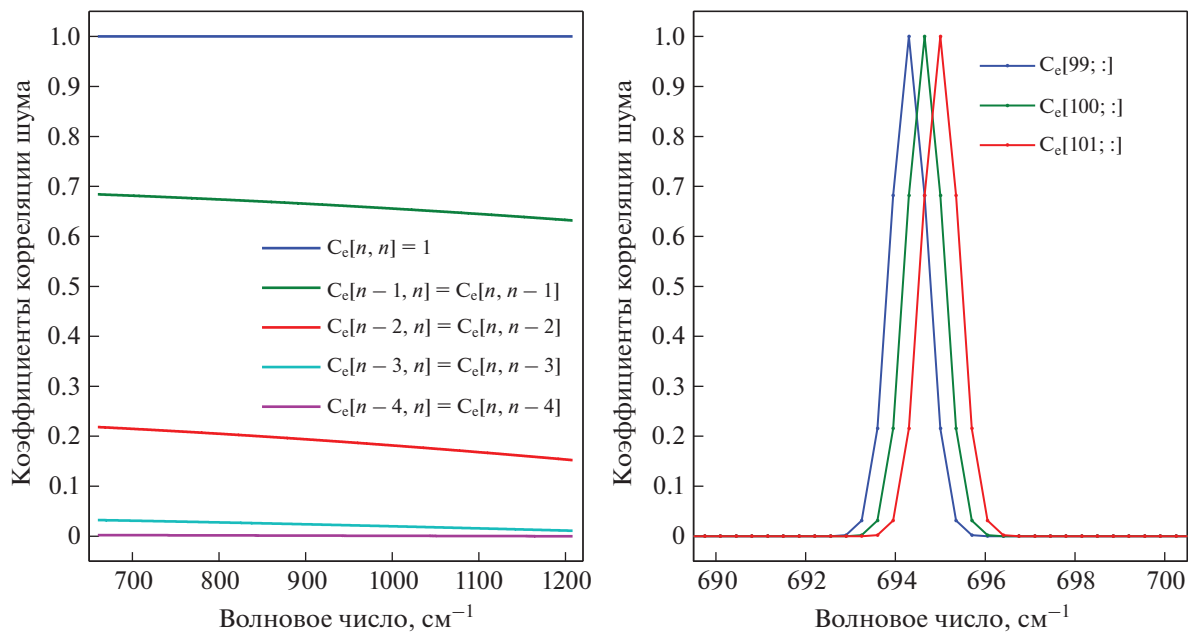


Рис. 3 Расчетные коэффициенты корреляции с учетом аподизации, коррекции самоаподизации и интерполяции на выходную сетку спектральных отсчетов (слева – диагонали, справа – строки 99–101 матрицы C_e).

$$\Delta L_{\text{опор},i}(\mathbf{v}) = \text{Re}\{\tilde{L}_{\text{опор},i}(\mathbf{v})\} - \text{Re}\{\langle\tilde{L}_{\text{опор},i}(\mathbf{v})\rangle\}.$$

Выражения (24), (25) выше применяются к спектрам БЧТ или космоса, а оценка шума проводится по действительной или мнимой части. В ПК “IKFSPrepSuite” усредненные спектры БЧТ и космоса вычисляются на каждом цикле измерений опорных источников (по 30 измерений каждого источника примерно раз в 10 мин).

Данный способ позволяет оценивать случайную составляющую погрешности измерений прибора (как коррелированный, так и некоррелированный шум):

$$\hat{\mathbf{S}}_{\varepsilon,\text{опор}} = \text{cov}\{\mathbf{SCM} \cdot \delta\mathbf{L}_{\text{опор}}\},$$

$$\text{NESR}_{\text{опор}}^2 = \text{diag}\{\hat{\mathbf{S}}_{\varepsilon,\text{опор}}\}.$$

Преимуществом оценки КМШ по опорным источникам является тот факт, что для фиксированной и стабильной сцены наблюдения можно осуществлять фильтрацию сигнала простым вычитанием среднего (одновременно с этим исключается возможная систематическая погрешность). Недостатком данного способа является то, что шум в спектрах атмосферы может отличаться от шума в спектрах опорных источников (или по-разному проявляться). Кроме того, данный способ оценки шума недоступен пользователю, поскольку файлы данных уровня IC не содержат измерений опорных источников. Поэтому необходим способ оценки шума непосредственно по спектрам атмосферы.

Оценка шума по калиброванным спектрам атмосферы

Ввиду отсутствия априорной информации о СПЭЯ объекта наблюдения возникает задача выделения (фильтрации) сигнала от шума в измеряемых спектрах. Для этого может использоваться метод главных компонент (МГК), применение которого для оценки шума в измерениях гиперспектральных ИК-зондировщиков подробно рассмотрено в работах (Serio et al., 2018; Serio et al., 2020).

На начальном этапе выполняется нормализация анализируемого массива \mathbf{L}_i измеренных прибором спектральных данных уровня IC (см. выражение (4)):

$$\mathbf{x}_i = \tilde{\mathbf{S}}_{\varepsilon}^{-1/2}(\mathbf{L}_i - \bar{\mathbf{L}}).$$

Здесь $\bar{\mathbf{L}}$ – выборочное среднее $[N \times 1]$ (N – число спектральных каналов); $i = (1..M)$, M – число измерений; $\tilde{\mathbf{S}}_{\varepsilon}$ – априорная оценка КМШ в спектрах (как правило, достаточно использовать диагональную КМШ с дисперсией шума, полученной по измерениям опорных источников).

Далее вычисляется ковариационная матрица нормализованных спектров и ее сингулярное разложение:

$$\mathbf{S}_x = \frac{1}{M-1} \mathbf{X}\mathbf{X}^T = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^T.$$

Здесь \mathbf{U} – ортогональная матрица собственных векторов (эмпирических ортогональных функций ЭОФ) ($\mathbf{U}^{-1} = \mathbf{U}^T$), $\mathbf{\Lambda}$ – диагональная матрица собственных значений, расположенных в порядке убывания ($\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N$); \mathbf{X} – матрица измерений $[N \times M]$, составленная из \mathbf{x}_i .

Определив тем или иным способом (по одному из информационных критериев с учетом собственных значений λ_i) оптимальное значение τ используемых ЭОФ (т.е. τ – число главных компонент), получим “восстановленные” спектры атмосферы $\hat{\mathbf{L}}_{0,i}$ и оценку шума $\hat{\varepsilon}_i$:

$$\hat{\varepsilon}_i = \mathbf{L}_i - \hat{\mathbf{L}}_{0,i} = \mathbf{L}_i - \bar{\mathbf{L}} - \tilde{\mathbf{S}}_{\varepsilon}^{1/2} \mathbf{U}_{\tau} \mathbf{c}_i.$$

Здесь \mathbf{c}_i – коэффициенты разложения нормализованных спектров по ЭОФ, $\hat{\mathbf{L}}_{0,i}$ – оценка сигнала $\mathbf{L}_{0,i}$ с использованием τ главных компонент (МГК-фильтр); \mathbf{U}_{τ} – матрица собственных векторов, строки ($i = \tau + 1..N$) которой равны нулю.

Можно показать (Serio et al., 2018), что уточненная оценка КМШ для $\hat{\varepsilon}_i$ имеет вид:

$$\hat{\mathbf{S}}_{\varepsilon,\text{МГК}} = \tilde{\mathbf{S}}_{\varepsilon}^{1/2} \mathbf{U}_{-\tau} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}_{-\tau}^T \tilde{\mathbf{S}}_{\varepsilon}^{T/2}.$$

Здесь $\mathbf{U}_{-\tau}$ – матрица собственных векторов, строки ($i = 1.. \tau$) которой равны нулю.

При оптимальном значении параметра τ (например, выбранном по информационному критерию Байеса) МГК-фильтр стремится к оптимальному линейному фильтру [в смысле минимума среднеквадратической ошибки], определяемому выражением: $\mathbf{F} = \mathbf{S}_x(\mathbf{S}_x + \mathbf{S}_{\varepsilon})^{-1}$. В целом, МГК-фильтр при росте τ стремится “оставить” в $\hat{\varepsilon}_i$ только случайный некоррелированный шум, при этом оценка смещенная:

$$\text{NESR}_{\text{МГК}} \approx \text{NESR} \sqrt{(N - \tau)/N}. \quad (7)$$

При использовании данного метода целесообразно отбирать измерения спектров атмосферы, обладающие малой изменчивостью. Например, удобно использовать безоблачные околорадирующие спектры атмосферы при пролете КА над океаном. В этом случае число ГК, достаточное для выделения сигнала из смеси, может быть значительно снижено.

Преимуществом МГК является возможность его применения к выходным спектральным данным прибора, доступным потребителю, а также комбинирование с другими рассмотренными здесь способами.

Оценка шума по мнимой части калиброванных спектров атмосферы

Анализ мнимой части калиброванных спектров атмосферы является очень информативным инструментом контроля качества калибровки выходных спектральных данных (Zavyalov et al., 2013). Наличие сигнала в мнимой части калиброванного спектра является индикатором наличия ошибок калибровки. В идеализированном случае мнимая часть калиброванных спектров атмосферы содержит только шумовую составляющую, что позволяет строить оценки КМШ. В общем случае:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{Im},i}(v) &= \text{Im}\{\tilde{L}_{\text{атм},i}(v)\} = \\ &= \Delta L_{\text{случ,Im}}(v) + \Delta L_{\text{сист,Im}}(v). \end{aligned} \quad (8)$$

Случайная составляющая мнимой части калиброванных спектров атмосферы имеет ту же статистику, что и случайная составляющая действительной части (шумы в действительной и мнимой частях ортогональны), поэтому может использоваться для оценки КМШ. Для выделения случайной составляющей в (8) также можно применять МГК-фильтр, при этом число τ главных компонент, необходимых для фильтрации систематической погрешности, сравнительно мало. Если же использовать выборку спектров с малой изменчивостью, то вклад систематических погрешностей, связанных с ошибками калибровки, можно существенно снизить простым вычитанием выборочного среднего.

Таким образом, теоретическим преимуществом способа оценки КМШ по мнимой части калиброванных спектров является отсутствие необходимости фильтрации сигнала атмосферы от шума (при отсутствии или малости ошибок калибровки).

Оценка ковариационной матрицы ошибок наблюдения на основе анализа невязок между измеренными и модельными спектрами

Для оценки сигнала (истинного спектра атмосферы) можно использовать модельные спектры, полученные на основе информации о состоянии атмосферы в точке наблюдения, с использованием быстрой радиационной модели (БРМ) типа RTTOV. В этом случае:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{атм},i}(v_j) &= L_{\text{атм},i}(v_j) - L_{\text{расч},i}(v_j) \\ \text{или } \mathbf{d} &= \mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{x}). \end{aligned}$$

В качестве оценки вектора \mathbf{x} можно использовать “фоновый” вектор \mathbf{x}_b , полученный по прогностическим данным, или решение обратной задачи \mathbf{x}_a (Serio et al., 2015). В этом случае невязки \mathbf{d} будут содержать информацию об инструментальных ошибках, а также ошибках моделирования оператора наблюдения $\mathbf{H}(\mathbf{x})$, погрешностях задания

вектора \mathbf{x} и др. На основе невязок \mathbf{d} можно оценить ковариационную матрицу \mathbf{R} (Desroziers et al., 2005):

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{R}} &\approx M \left\{ \mathbf{d}_a^o (\mathbf{d}_b^o)^T \right\} = \left\langle (\mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{x}_a)) (\mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{x}_b))^T \right\rangle, \\ \tilde{\mathbf{R}}_{\text{шум}} &= \frac{1}{2} (\tilde{\mathbf{R}} + \tilde{\mathbf{R}}^T). \end{aligned}$$

Данный способ учитывает все виды погрешностей, возникающих при обращении гиперспектральных данных, не позволяя оценить вклад каждой из составляющих, в частности, инструментального шума. Оценка ковариационной матрицы ошибок наблюдения \mathbf{R} выходит за рамки настоящей работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ КОВАРИАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ ШУМА ИКФС-2

На рис. 4 вверху представлены результаты оценки радиометрического шума ИКФС-2 в терминах пороговой СПЭЯ NESR, выполненные по опорным источникам ($\text{NESR}_{\text{опор,1C}}$), по спектрам атмосферы с использованием метода главных компонент ($\text{NESR}_{\text{МГК,1C}}$) и по мнимой части калиброванных спектров атмосферы ($\text{NESR}_{\text{ИМАГ,1C}}$). В качестве исходных данных для оценки шума был выбран полусуточный файл измерений ИКФС-2, полученный на витках 32026–32033 (10 сентября 2020 г.). Для сравнения также представлены графики радиометрического шума в спектрах уровня 1А ($\text{NESR}_{\text{БМК}}$ и $\text{NESR}_{\text{КОСМ}}$), вычисленные отдельно для бортового модуля калибровки (БМК) и космоса.

На рис. 4 внизу представлены аналогичные результаты, но выраженные в терминах пороговой разности температур NEdT для объекта в виде черного тела с температурой 280 К.

Анализ графиков на рис. 4 показывает:

1) все оценки радиометрического шума в измерениях ИКФС-2 уровня 1С находятся в хорошем соответствии между собой;

2) отношение радиометрического шума NESR, полученного по опорным источникам, в спектрах уровня 1С ($\text{NESR}_{\text{опор,1C}}$) и 1А ($\text{NESR}_{\text{БМК,1А}}$ и $\text{NESR}_{\text{КОСМ,1А}}$) находится в полном соответствии с результатами, представленными на рис. 1, и определяется параметрами используемой аподизации, а также коррекцией самоаподизации;

3) оценки $\text{NESR}_{\text{МГК,1C}}$ и $\text{NESR}_{\text{ИМАГ,1C}}$, полученные с использованием МГК, несколько ниже оценки $\text{NESR}_{\text{опор,1C}}$, полученного без использования МГК; данный результат, в целом, находится в соответствии с выражением (7);

4) график радиометрического шума $\text{NESR}_{\text{МГК,1C}}$, полученный по спектрам атмосферы методом

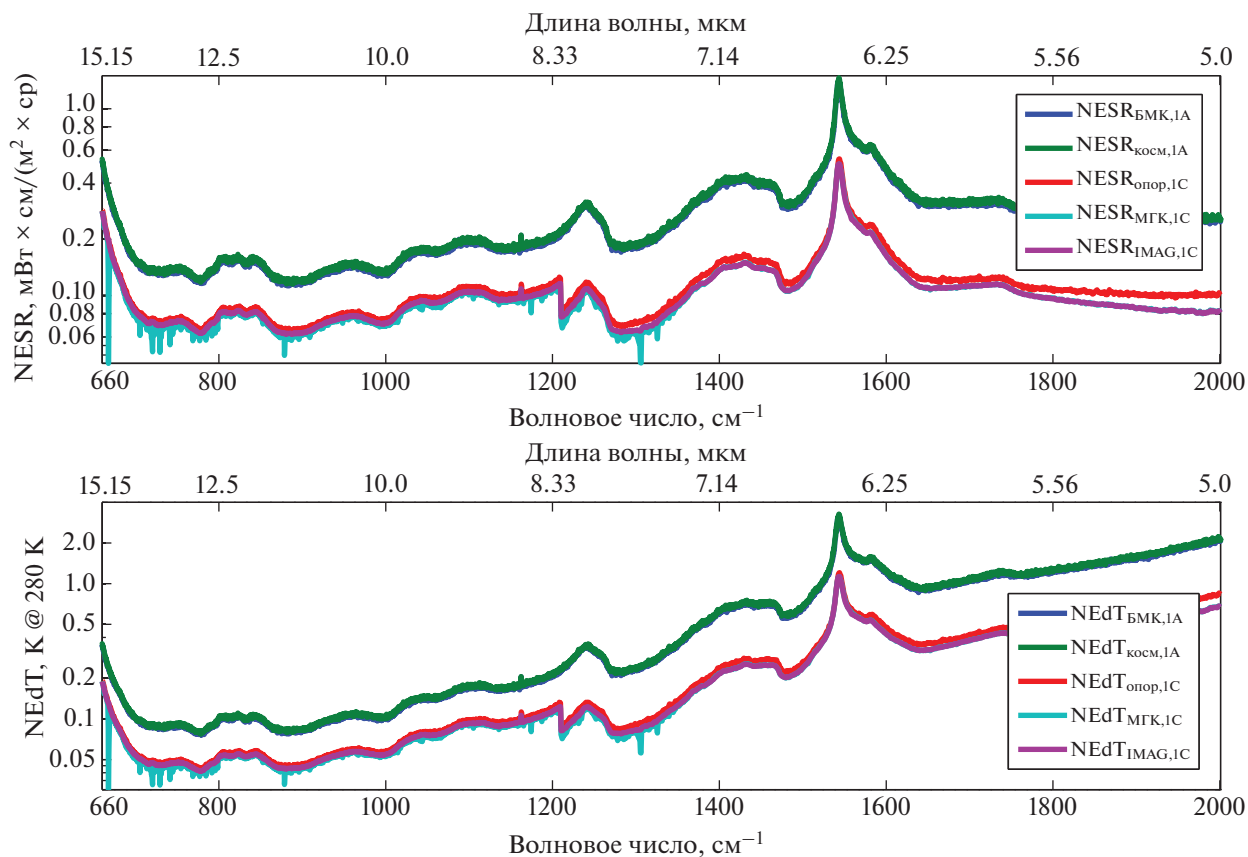


Рис. 4 Сопоставление результатов оценки радиометрического шума ИКФС-2 в терминах пороговой СПЭЯ (вверху) и пороговой разности температур NEdT (внизу).

главных компонент ($\tau = 85$ для LW-диапазона и $\tau = 30$ для MW-диапазона), содержит артефакты в виде узких спектральных линий, соответствующих линиям поглощения содержащихся в атмосфере газов;

5) все оценки радиометрического шума позволяют обнаружить на графиках NESR и NEdT незначительный, но заметный всплеск шума на длине волны вблизи 8.6 мкм (примерно 1162 см^{-1}); причина наличия которого подлежит уточнению; существенный рост шума вблизи 1550 см^{-1} объясняется поглощением в светоделителе.

В целом, следует отметить высокие радиометрические характеристики прибора в длинноволновом диапазоне ($660\text{--}1210 \text{ см}^{-1}$). Как отмечено в работах (Polyakov et al., 2017) и (Egesmaa, 2020), в средневолновом диапазоне приемлемое отношение “сигнал–шум” в спектрах ИКФС-2 обеспечивается лишь до 1500 см^{-1} .

На рис. 5 представлены результаты оценки корреляционной матрицы шума $S_{\epsilon,0}$ в измерениях ИКФС-2 уровня 1А (до спектральной коррек-

ции), выполненные для LW-диапазона по измерениям опорным источникам. Видно, что матрица $S_{\epsilon,0}$, вычисленная по измерениям БЧТ, содержит незначительный окрас, вызванный нестационарностью шума в интерферограммах БЧТ из-за дополнительного шума вблизи положения нулевой ОРХ. При этом $S_{\epsilon,0}$, вычисленная по спектрам космоса, фактически совпадает с единичной матрицей.

Результаты, представленные на рис. 5, получены для измерений на витках 17020–17026 (17 октября 2017 г.). Со временем дополнительный шум вблизи нулевой ОРХ снизился, и оценки КрМШ по опорным источникам, выполненные по измерениям на витках 32026–32033 (10 сентября 2020 г.), показывают отсутствие значимой корреляции шума как в спектрах космоса, так и в спектрах БЧТ. Таким образом, можно утверждать, что шум в спектрах опорных источников уровня 1А является некоррелированным.

На рис. 6 представлены результаты оценки КрМШ в спектрах ИКФС-2 уровня 1С (слева – для LW-поддиапазона, справа – для MW). При

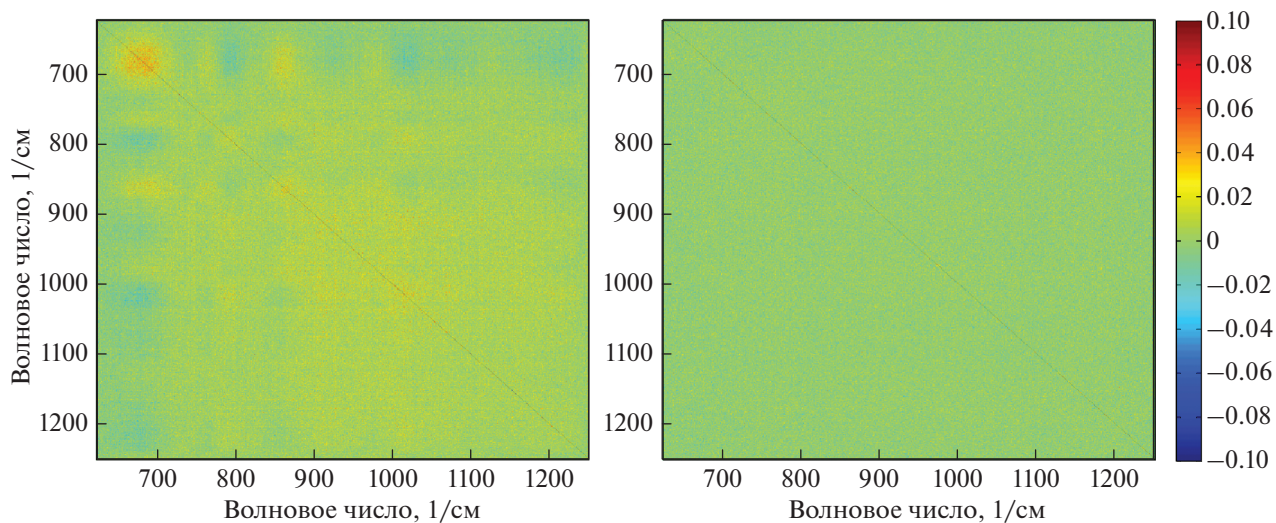


Рис. 5. Корреляционные матрица шума в неаподизированных спектрах ИКФС-2, вычисленные по измерениям бортового черного тела (слева) и космоса (справа).

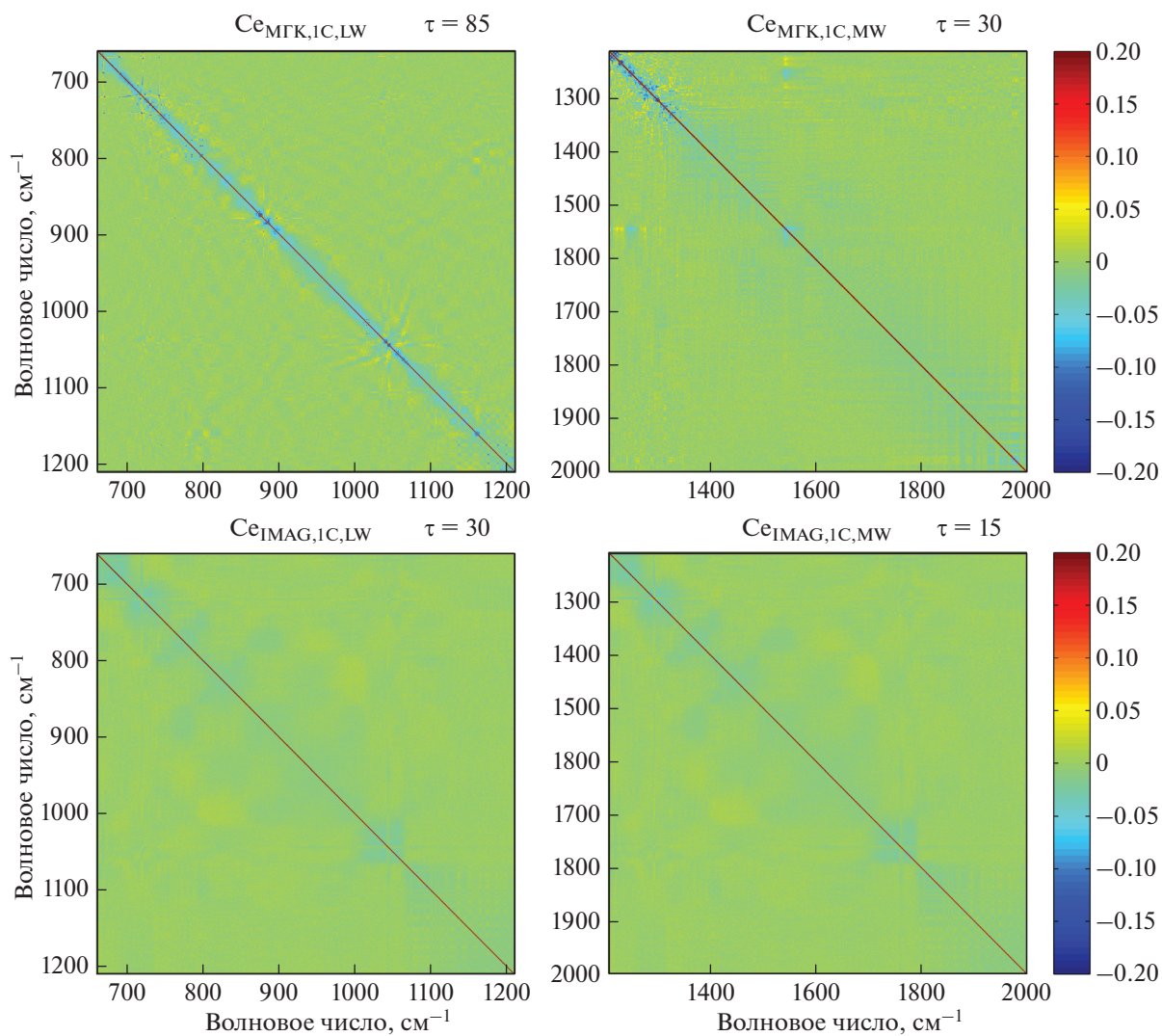


Рис. 6. КрМШ в спектрах ИКФС-2 уровня 1С для LW- (слева) и MW-диапазона (справа), вычисленные по действительной (вверху) и мнимой (внизу) частям калиброванных спектров атмосферы с использованием МГК

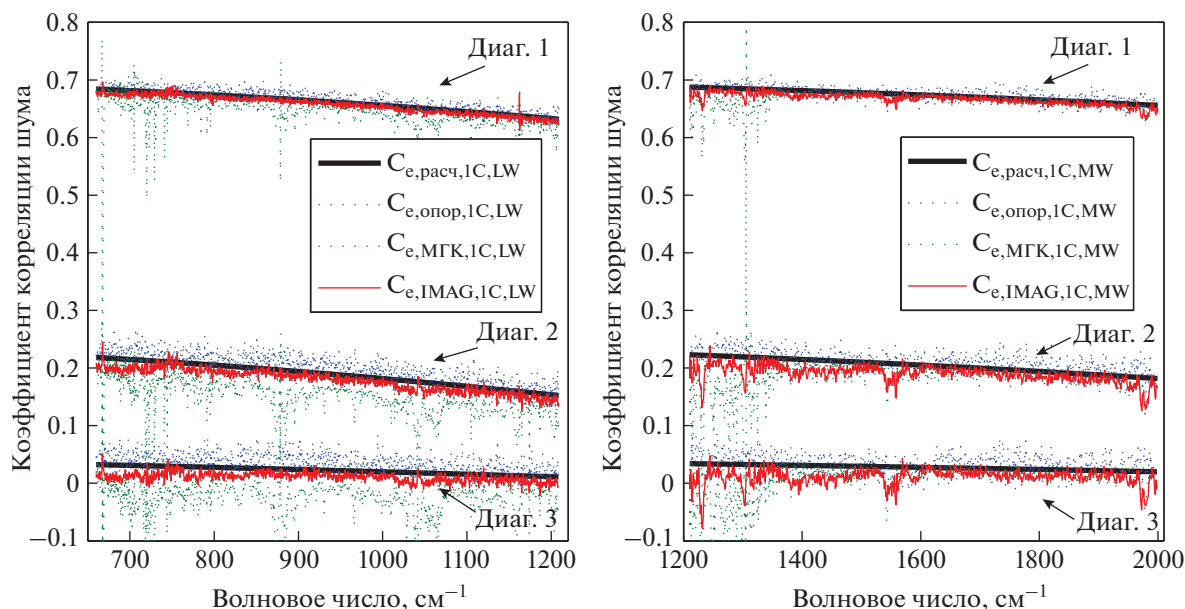


Рис. 7. Графики первых трех (не считая главной) диагоналей КрМШ в спектрах ИКФС-2 уровня 1С, полученные различными способами (слева – для LW, справа – для MW-диапазона)

этомверху показаны КрМШ, вычисленные по действительной части спектров атмосферы методом главных компонент, внизу – КрМШ, вычисленной по мнимой части калиброванных спектров (также с применением МГК, но при меньшем числе ГК). Результаты оценки КрМШ по измерениям опорных источников не показаны, поскольку полностью совпадают с результатами расчетов.

На рис. 7 представлены графики трех первых диагоналей КрМШ, полученных различными способами.

Анализируя рис. 6 и 7, можно отметить следующее:

1) корреляционные матрицы шума в спектрах ИКФС-2, полученные тремя рассматриваемыми способами, находятся в хорошем соответствии и согласуются с расчетом; значимыми являются коэффициенты корреляции на трех диагоналях, соседствующих с главной (в обе стороны), величины которых хорошо согласуются с расчетом; какие-либо “артефакты”, связанные с работой прибора, в полученных КрМШ не обнаруживаются;

2) вид КрМШ определяется процедурой первичной обработки и совпадает с расчетным, полученным для некоррелированного шума в спектрах уровня 1А;

3) в связи с отсутствием надлежащей выборки околорадиальных безоблачных измерений, выпол-

ненных при пролете КА над морской поверхностью, оценка КрМШ, полученная по действительной части спектров атмосферы с помощью МГК, имеет некоторый окрас, связанный с особенностями МГК-фильтрации.

Представленные результаты оценки шума ИКФС-2, полученные по измерениям на витках 32026–32033 (10 сентября 2020 г.), хорошо воспроизводятся и могут быть получены для любой другой выборки спектральных данных ИКФС-2.

В заключение хотелось бы прокомментировать оценки ковариационной матрицы ошибок наблюдения \mathbf{R} для ИКФС-2 из (Egesmaa, 2020), полученные путем анализа невязки между измерениями и расчетом (способ 4) и демонстрирующие наличие участков со значимой и достаточной сильной корреляцией погрешностей в спектральных каналах. Оценки ковариационной матрицы \mathbf{S}_e , (составной части матрицы \mathbf{R} в соответствии с (2)), полученные в настоящей работе и не выявившие значимой корреляции между спектральными отсчетами (за исключением корреляции соседних отсчетов), позволяют сделать предположение, что причиной различий между матрицей \mathbf{R} в работе (Egesmaa, 2020) и матрицей \mathbf{S}_e в настоящей работе могут быть остаточные систематические погрешности измерений ИКФС-2, а также ошибки, связанные с неточностью оператора наблюдения $\mathbf{H}(\mathbf{x})$, неидеальной фильтрацией безоблачных сцен при оценке \mathbf{R} и др. Получение оце-

нок ковариационной матрицы ошибок \mathbf{R} для измерений ИКФС-2 планируется на следующем этапе исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Никулин А.Г., Козлов Д.А., Монахов Д.О., Козлов И.А., Архипов С.А., Целиков В.А., Романовский А.С. Бортовые инфракрасные фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25–37.
- Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Козлов Д.А., Козлов И.А., Монахов Д.О., Никулин А.Г., Успенский А.Б., Рублев А.Н., Кухарский А.В. Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: результаты эксплуатации на борту метеоспутника “Метеор-М” № 2 // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 88–100.
- Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Мащицкий Ю.П., Никулин А.Г., Козлов Д.А., Монахов Д.О., Козлов И.А., Болмо-сов И.В., Архипов С.А., Целиков В.А., Романовский А.С. Информационные характеристики летного образца аппаратуры ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 291–300.
- Козлов Д.А. Радиометрическая калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Оптический журн. 2013. 80. 2. С. 52–58.
- Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Успенский А.Б. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4(374). С. 112–126.
- Amato U., De Canditiis D., Serio C. Effect of apodization on the retrieval of geophysical parameters from Fourier-transform spectrometers // Appl. Opt. 1998. V. 37. № 27. P. 6537–6543.
- Antonelli P., Revercomb H., Sromovsky L., Smith W., Knuteson R., Tobin D., Garcia R., Howell H., Huang H.-L., Best F. A principal component noise filter for high spectral resolution infrared measurements // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D23102.
- Asmus V., Timofeyev Yu., Polyakov A., Uspensky A., Golovin Yu., Zavelevich F., Kozlov D., Rublev A., Kukharsky A., Pyatkin V., Rusin E. Atmospheric temperature sounding with the Fourier spectrometer // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. № 4. P. 428–432.
- Bormann N., Bonavita M., Dragani R., Eresmaa R., Matri-cardi M., McNally A. Enhancing the impact of IASI observations through an updated observation-error covariance matrix // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2016. V. 142. P. 1767–1780.
- Desroziers G., Berre L., Chapnik B., Poli P. Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2005. 131. P. 3385–3396.
- Eresmaa R. Infrared Fourier Spectrometer 2 (IKFS-2) radiance assimilation at ECMWF // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. P. 1–15.
- Han Y., Suwinski L., Tobin D., Chen Y. Effect of self-apodization correction on Cross-track Infrared Sounder radiance noise // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 34. P. 10114–10122.
- Polyakov A., Timofeyev Yu., Virolainen Ya., Uspensky A., Zavelevich F., Golovin Yu., Kozlov D., Rublev A., Kukharsky A. Satellite atmospheric sounder IRFS-2 1. Analysis of outgoing radiation spectra measurements // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. № 9. P. 1185–1191.
- Polyakov A., Timofeyev Y., Virolainen Y., Kozlov D. Atmospheric ozone monitoring with Russian spectrometer IKFS-2 // J. Applied Spectroscopy. 2019. V. 86. № 4. P. 650–654.
- Revercomb H., Buijs H., Howell H., LaPorte D., Smith W., Sromovsky L. Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the High-Resolution Interferometer Sounder // Appl. Opt. 1988. V. 27. P. 3210–3218.
- Serio C., Standfuss C., Masiello G., Liuzzi G., Dufour E., Tournier B., Stuhlmann R., Tjemkes S., Antonelli P. Infrared atmospheric sounder interferometer radiometric noise assessment from spectral residuals // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 19. P. 5924–5936.
- Serio C., Masiello G., Camy-Peyret C., Jacqueline E., Vander-marq O., Bermudo F., Coppens D., Tobin D. PCA determination of the radiometric noise of high spectral resolution infrared observations from spectral residuals: Application to IASI // JQSRT. 2018. V. 206. P. 8–21.
- Serio C., Masiello G., Mastro P., Tobin D. Characterization of the observational covariance matrix of hyper-spectral infrared satellite sensors directly from measured Earth views // Sensors. 2020. 20. 1492.
- Timofeyev Y., Uspensky A., Zavelevich F., Polyakov A., Virolainen Y., Rublev A., Kukharsky A., Kiseleva J., Kozlov D., Kozlov I., Nikulin A., Pyatkin V., Rusin E. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – Four years in orbit // JQSRT. 2019. V. 238. 106579.
- Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu., Golomolzin V., Filei A. IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands // GSICS Quarterly. 2018. V. 12. № 1. P. 4–6.
- Zavyalov V., Fish C., Bingham G., Esplin M., Greenman M., Scott D., Han Y. Preflight assessment of the Cross-track Infrared Sounder (CrIS) performance // Proc. Of SPIE. 2011. V. 8176. 817606.
- Zavyalov V., Esplin M., Scott D., Esplin B., Bingham G., Hoffman E., Lietzke C., Predina J., Frain R., Suwinski L., Han Y., Major C., Graham B., Phillips L. Noise performance of the CrIS instrument // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 13108–13120.

Characterization of the Noise Covariance Matrix of the Infrared Fourier Transform Spectrometer IKFS-2

D. A. Kozlov¹, I. A. Kozlov¹, A. B. Uspensky², A. N. Rublev², Y. M. Timofeyev³,
A. V. Polyakov³, and M. V. Kolesnikov⁴

¹ State Scientific Centre of Russian Federation “Keldysh Research Center”, Moscow, Russia

² State Research Center “Planeta”, Moscow, Russia

³ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

⁴ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Instrumental noise covariance matrix, whose diagonal square root is currently named radiometric noise, is one of the most important characteristics of hyper-spectral infrared sounders. It is used in spectral data inversion and atmosphere parameters estimation as a part of observation-error covariance matrix. In this paper new results of radiometric noise covariance matrix characterization in measurements of the infrared Fourier transform spectrometer IKFS-2 onboard the Meteor-M No. 2 meteorological satellite are presented. The main factors leading to the inter-channel noise correlation are considered. The results of the IKFS-2 noise covariance matrix estimation are compared obtained by various methods on the base on (1) reference calibration sources measurements, (2) calibrated atmospheric spectra and (3) imaginary part of the calibrated atmospheric spectra. The results presented are in agree with calculations and can be used in the IKFS-2 spectral data assimilation in numerical weather forecast models of Roshydromet.

Keywords: onboard infrared Fourier transform spectrometer IKFS-2, radiometric noise, noise covariance matrix, numerical weather forecast

REFERENCES

- Amato U., De Canditiis D., Serio C. Effect of apodization on the retrieval of geophysical parameters from Fourier-transform spectrometers // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. № 27. P. 6537–6543.
- Antonelli P., Revercomb H., Sromovsky L., Smith W., Knuteson R., Tobin D., Garcia R., Howell H., Huang H.-L., Best F. A principal component noise filter for high spectral resolution infrared measurements // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. D23102.
- Asmus V., Timofeyev Yu., Polyakov A., Uspensky A., Golovin Yu., Zavelevich F., Kozlov D., Rublev A., Kukharsky A., Pyatkin V., Rusin E. Atmospheric temperature sounding with the Fourier spectrometer // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2017. V. 53. № 4. P. 428–432.
- Bormann N., Bonavita M., Dragani R., Eresmaa R., Matricardi M., McNally A. Enhancing the impact of IASI observations through an updated observation-error covariance matrix // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2016. V. 142. P. 1767–1780.
- Desroziers G., Berre L., Chapnik B., Poli P. Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2005. 131. P. 3385–3396.
- Eresmaa R. Infrared Fourier Spectrometer 2 (IKFS-2) radiance assimilation at ECMWF // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. P. 1–15.
- Golovin Yu.M., Zavelevich F.S., Nikulin A.G., Kozlov D.A., Monakhov D.O., Kozlov I.A., Arkhipov S.A., Tselikov V.A., Romanovskiy A.S. Bortovye infrakrasnye fur'e-spektrometry dlya temperaturno-vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery Zemli [Space-borne infrared Fourier-transform spectrometers for temperature/humidity sounding of Earth's atmosphere] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2013. № 6. P. 25–37. (In Russian)
- Golovin Yu.M., Zavelevich F.S., Kozlov D.A., Kozlov I.A., Monakhov D.O., Nikulin A.G., Uspenskiy A.B., Rublev A.N., Kukharskiy A.V. Infrakrasniy fur'e-spektrometer IKFS-2: rezul'taty ekspluatatsii na bortu meteospjutnika "Meteor-M2" [Infrared Fourier-Transform Spectrometer IKFS-2 operating onboard "Meteor-M2" Satellite] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2017. № 4. P. 88–100. (In Russian)
- Han Y., Suwinski L., Tobin D., Chen Y. Effect of self-apodization correction on Cross-track Infrared Sounder radiance noise // *Appl. Opt.* 2015. V. 54. № 34. P. 10114–10122.
- Kozlov D.A. Radiometricheskaya kalibrovka bortovogo infrakrasnogo fur'e-spektrometra dlya temperaturnogo i vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery Zemli [Radiometric calibration of the IKFS-2 on-board IR Fourier-Transform Spectrometer for temperature and humidity probing of the Earth's atmosphere] // *Opticheskiy zhurnal.* 2013. 80. 2. P. 52–58. (In Russian)
- Polyakov A., Timofeyev Yu., Virolainen Ya., Uspensky A., Zavelevich F., Golovin Yu., Kozlov D., Rublev A., Kukharsky A. Satellite atmospheric sounder IRFS-2 1. Analysis of outgoing radiation spectra measurements // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2017. V. 53. № 9. P. 1185–1191.
- Polyakov A., Timofeyev Y., Virolainen Y., Kozlov D. Atmospheric ozone monitoring with Russian spectrometer IKFS-2 // *J. Applied Spectroscopy.* 2019. V. 86. № 4. P. 650–654.
- Revercomb H., Buijs H., Howell H., LaPorte D., Smith W., Sromovsky L. Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the High-Resolution Interferometer Sounder // *Appl. Opt.* 1988. V. 27. P. 3210–3218.
- Serio C., Standfuss C., Masiello G., Liuzzi G., Dufour E., Tournier B., Stuhlmann R., Tjemkes S., Antonelli P. Infrared atmospheric sounder interferometer radiometric noise assessment from spectral residuals // *Appl. Opt.* 2015. V. 54. № 19. P. 5924–5936.

- Serio C., Masiello G., Camy-Peyret C., Jacquette E., Vander-marq O., Bermudo F., Coppens D., Tobin D.* PCA determination of the radiometric noise of high spectral resolution infrared observations from spectral residuals: Application to IASI // *JQSRT*. 2018. V. 206. P. 8–21.
- Serio C., Masiello G., Mastro P., Tobin D.* Characterization of the observational covariance matrix of hyper-spectral infrared satellite sensors directly from measured Earth views // *Sensors*. 2020. 20. 1492.
- Timofeyev Y., Uspensky A., Zavelevich F., Polyakov A., Viro-lainen Y., Rublev A., Kukharsky A., Kiseleva J., Kozlov D., Kozlov I., Nikulin A., Pyatkin V., Rusin E.* Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – Four years in orbit // *JQSRT*. 2019. V. 238. 106579.
- Tsyru’nikov M.D., Svirengo P.I., Gayfulin D.R., Gorbunov M.E., Uspenskiy A.B.* Razvitie sistemy operativnogo usvoeniya dannykh meteorologicheskikh nablyudeniy v Gidromettsentre Rossii [Development of the data assimilation scheme of the Hydrometcentre of Russia] // *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. 2019. № 4(374). P. 112–126. (In Russian)
- Zavelevich F., Golovin Yu., Matsitskiy Yu., Nikulin A., Kozlov D., Monakhov D., Kozlov I., Bolmosov I., Arkhipov S., Tselikov V., Romanovskiy A.* Informatsionnye kharakteristiki letnogo obraztsa apparatury IKFS-2 [Performance of IKFS-2 flight model] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. V. 9. № 5. P. 291–300. (In Russian)
- Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu., Golomolzin V., Filei A.* IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands // *GSICS Quarterly*. 2018. V. 12. № 1. P. 4–6.
- Zavyalov V., Fish C., Bingham G., Esplin M., Greenman M., Scott D., Han Y.* Preflight assessment of the Cross-track Infrared Sounder (CrIS) performance // *Proc. Of SPIE*. 2011. V. 8176. 817606.
- Zavyalov V., Esplin M., Scott D., Esplin B., Bingham G., Hoffman E., Lietzke C., Predina J., Frain R., Suwinski L., Han Y., Major C., Graham B., Phillips L.* Noise performance of the CrIS instrument // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 13108–13120.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ И ОПТИЧЕСКИМ ДАННЫМ СПУТНИКОВ SENTINEL 1/2 НА ПРИМЕРЕ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2022 г. Н. В. Родионова^а, *, С. Я. Кудряшова^б, А. С. Чумбаев^б

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

^бИнститут почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: rnv@ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 03.12.2020 г.

В работе рассматривается использование радарных и оптических данных спутников Sentinel 1 и Sentinel 2 за 2019–2020 гг. для оценки содержания гумуса, процентного содержания глины и влажности в верхнем слое почвы на примере черноземов и серых лесных почв Новосибирской области. Особое внимание уделено подбору спутниковых изображений, поскольку для количественной оценки содержания гумуса и глины в почве необходимо выполнение условий, чтобы почва была сухой и оголенной. Оценка содержания гумуса проведена для пяти тестовых участков на основе регрессионной модели (Караванова, Орлов, 1996), в которую входят коэффициенты отражения от поверхности на длине волны спектрального канала V6 спутника Sentinel 2. Проведена корректировка параметров модели для условий исследуемой территории отдельно для черноземов и серых лесных почв. Оценка процентного содержания физической глины в почве сделана на основе использования оптических данных Sentinel 2, наземных измерений и регрессионных моделей с экспоненциальной зависимостью содержания глины от коэффициентов отражения от почвы на длинах волн SWIR спектральных каналов Sentinel 2 (Bousbih et al., 2019; Shabou et al., 2015). Показано изменение за год процентного содержания гумуса и глины в почвах тестовых участков по данным Sentinel 2. Оценка влажности верхнего слоя почвы тестовых участков проведена на основе радарных, оптических и совместного использования радарных и оптических данных.

Ключевые слова: радарные данные С-диапазона, коэффициент обратного рассеяния, оптические данные, коэффициент отражения, содержание гумуса в почве, содержание глины в почве, влажность почвы

DOI: 10.31857/S0205961422010067

ВВЕДЕНИЕ

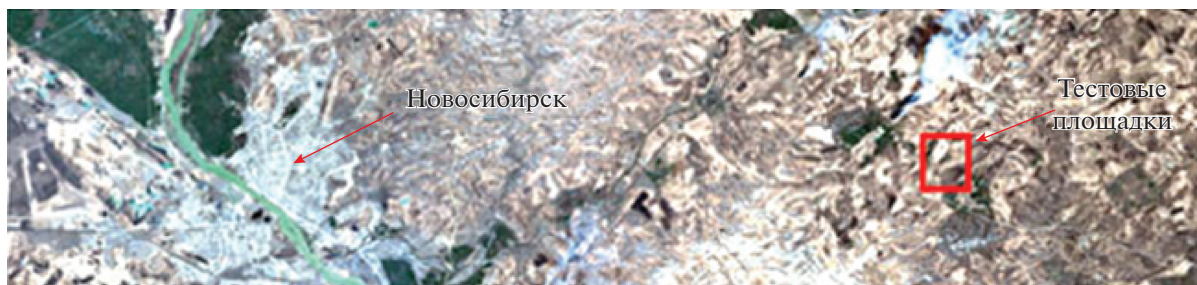
На оптические свойства почвы влияют в основном четыре важных фактора: минеральный состав, влажность почвы, содержание органического вещества и текстура почвы. Для дистанционного восстановления этих параметров используют различные группы спектральных индексов. Радарные данные позволяют получить информацию о шероховатости поверхности почвы и диэлектрической проницаемости, зависящей от влажности почвы и ее текстуры (содержание физической глины и физического песка).

В данной работе рассматривается возможность использования радарных данных спутника Sentinel 1 (S1) и оптических данных спутника Sentinel 2 (S2) за 2019–2020 гг. для оценки содержания влажности, гумуса (H) и глины (Clay) в верхнем слое почвы (0–10 см) на примере черноземов и серых лесных почв Новосибирской области.

Особое внимание уделено подбору спутниковых изображений, поскольку для подобной оценки есть определенные требования для почвы, а именно, почва должна быть сухой и без растительности.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются почвы шести тестовых участков, расположенных в Новосибирской области. С 8 по 11 октября 2019 г. на территории тестовых площадок (рис. 1) были установлены температурные датчики на черноземах несмытых (пашня), слабосмытых (пашня), целине и серых лесных почвах несмытых (пашня), слабосмытых (пашня), лес. Датчики установлены для фиксации температуры воздуха (на высоте 2 м) и температуры по глубинам почвенного профиля: на поверхности почвы 0 см и на глубинах 5, 10, 15,



Склон северо-западной ориентации



Склон юго-западной ориентации



Рис. 1. Тестовые площадки в Новосибирской области.

20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 см. Интервал измерений 3 ч, измерения начаты 10 октября. Отобраны образцы почв для определения их основных физико-химических свойств.

На рис. 1 (вверху) показана область расположения тестовых площадок (выделена красным прямоугольником) на расстоянии порядка 55 км на восток от Новосибирска. Изображение получено по

Таблица 1. Описание тестовых площадок в Новосибирской области

Площадка	Координаты с.ш., в.д.	Гранулометрический состав почвы и содержание гумуса (%)			
		Глина	Песок	Ил	Гумус
1. Чернозем выщелоченный, несмытая пашня	55°02'12.3", 83°51'47.8"	25.6	53.7	20.7	9.9
2. Чернозем выщелоченный слабосмытая пашня	55°01'42.8", 83°50'41.8"	19.8	56.8	23.4	8.3
3. Чернозем выщелоченный, слабосмытая целина	55°01'55.4", 83°51'29.6"	22.1	51.8	26.1	8.6
4. Серая лесная почва, несмытая пашня	55°00'42.0", 83°53'01.1"	22.9	54.8	22.3	6.0
5. Серая лесная почва, слабосмытая пашня	55°00'40.5", 83°52'54.1"	24.4	55.1	20.5	5.2
6. Серая лесная почва, лес	55°00'37.8", 83°52'31.8"	25.0	54.2	20.8	6.6

данным Sentinel 2 дата съемки 23.4.2019 г. в естественных цветах (комбинация каналов В4–В3–В2). На рис. 1 (внизу) показана детальная карта расположения черноземов (склон юго-западной ориентации) и серых лесных почв (склон северо-западной ориентации) на тестовых площадках с номерами тестовых площадок.

В табл. 1 даны координаты тестовых площадок, а также измеренные значения процентного содержания гумуса и гранулометрический состав образцов почв на глубине 0–10 см (данные 2019 г.) (ГОСТ 26213–91 Методы определения органического вещества почв (Soils. Methods for determination of organic matter) и ГОСТ 12536–2014 Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава (Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution)).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Радарные данные Sentinel 1

В работе использованы находящиеся в открытом доступе Sentinel 1 радарные данные С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризацией VV и VH и пространственным разрешением 10 м и временным разрешением 12 дней. Угол обзора составляет 42.66°–42.81°. Количество рассмотренных сеансов съемки равно 18 с 14.10.2019 по 5.5.2020, что определялось временем нахождения температурных датчиков в почве. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>). Предварительная обработка данных включала выделение фрагмента с

исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента обратного рассеяния (КОР) для обеих поляризаций за период 14.10.2019 по 5.5.2020 для 6 тестовых площадок. Отметим особенности поведения графиков: для кросс-поляризации характерна дифференциация значений КОР для разных тестовых площадок, а именно, в порядке убывания значений КОР: лес, целина, серые лесные почвы, черноземы. Для согласованной поляризации максимумы КОР (лес) и минимумы КОР (черноземы) сохраняются (за исключением 2–3 сеансов из 18), однако четкой дифференциации значений КОР между серыми лесными почвами и целиной нет.

Корреляция радарных данных с температурой воздуха, температурой поверхности почвы и температурой почвы на глубине 5 см представлена на примере тестовых площадок №№ 2 и 3 (табл. 2, размер выборки $N = 18$).

Получилось, что для целины (площадка № 3) корреляция выше для всех трех случаев. Построим регрессионное соотношение для случая с наибольшим коэффициентом корреляции Спирмена $\rho_S = 0.81$ (целина) между КОР кросс-поляризации и температурой воздуха (рис. 3, а) и температурой почвы на глубине 5 см (рис. 3, б).

Мультиспектральные данные Sentinel 2

В работе использованы мультиспектральные данные Sentinel 2 с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением. Периодичность мультиспектральной съемки каждым спутником составляет 10 дней, а при работе двух аппаратов – 5 дней. В мультиспектраль-

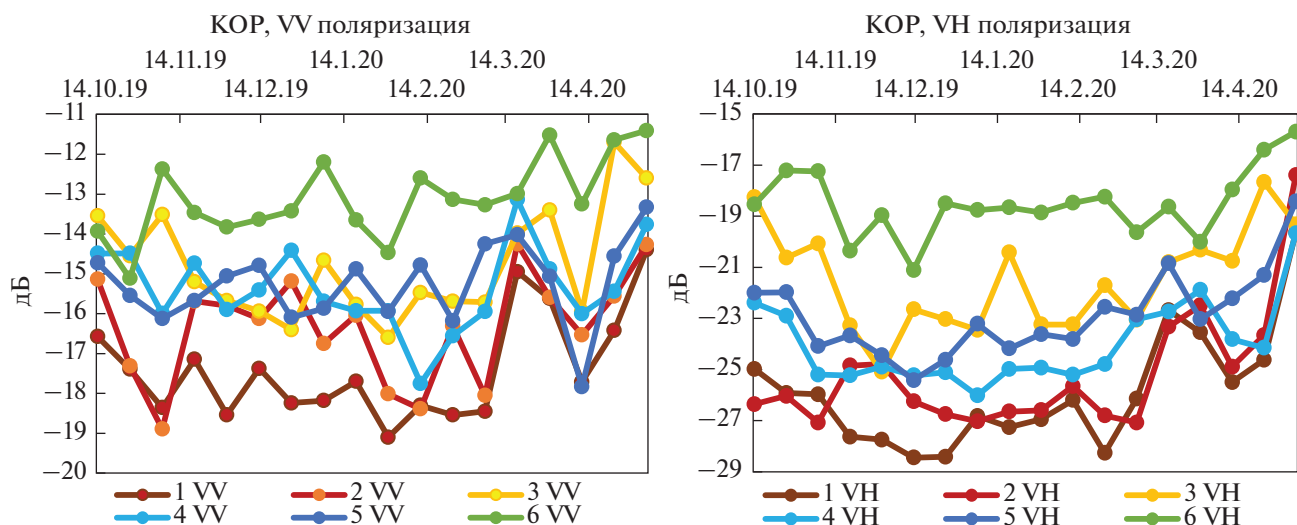


Рис. 2. Графики изменений КОР за период с 14.10.2019 по 5.5.2020 для тестовых площадок в Новосибирской области.

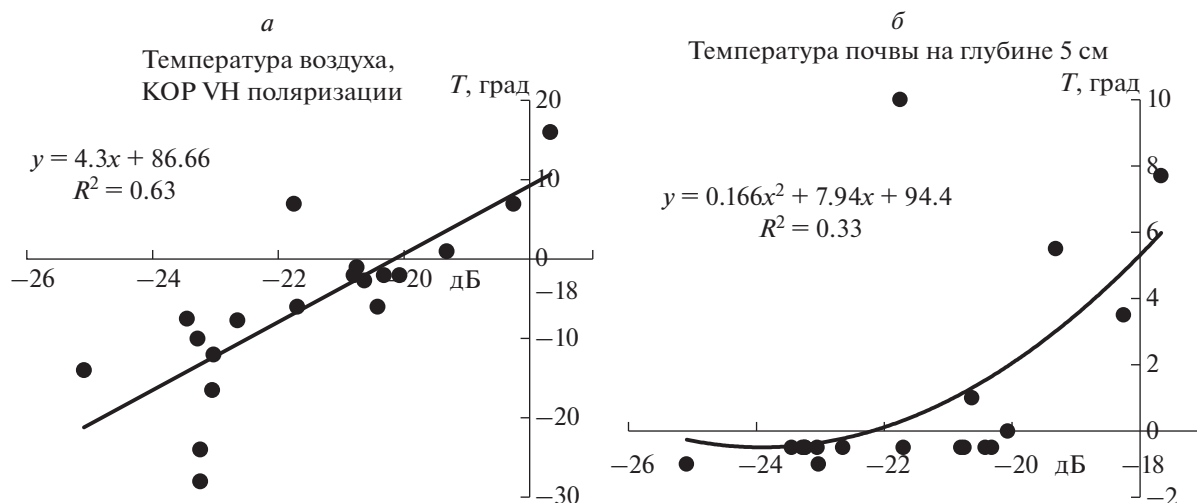


Рис. 3. Регрессионные соотношения между КОР (дБ) и температурой воздуха (а) и КОР и температурой почвы на глубине 5 см (б) (площадка № 3).

ной камере 13 каналов с разным пространственным разрешением от 10 до 60 м. Использовались данные съемочной системы S2 с уровнем обра-

ботки L2A в виде альbedo на нижней границе атмосферы (с атмосферной коррекцией). Работа с изображениями S2 осуществлялась программой

Таблица 2. Коэффициент корреляции Спирмена ρ_S между КОР и температурой воздуха и почвы

Площадка	КОР	T° , воздух	T° , поверхность почвы	T° , почва 5 см
2. Чернозем выщелоченный, слабосмытая пашня	σ_{VV}^0	$\rho_S = 0.46, p = 0.03$	$\rho_S = 0.36, p = 0.07$	$\rho_S = 0.15, p = 0.27$
	σ_{VH}^0	$\rho_S = 0.47, p = 0.02$	$\rho_S = 0.28, p = 0.12$	$\rho_S = 0.32, p = 0.01$
3. Чернозем выщелоченный, слабосмытая целина	σ_{VV}^0	$\rho_S = 0.69, p = 0.0005$	$\rho_S = 0.41, p = 0.04$	$\rho_S = 0.61, p = 0.003$
	σ_{VH}^0	$\rho_S = 0.81, p = 0.00002$	$\rho_S = 0.44, p = 0.03$	$\rho_S = 0.6, p = 0.004$

SNAP. Использованы безоблачные сеансы съемки за апрель—май 2019 и 2020 гг.

Выбор исходных изображений S2

Для спутниковой оценки содержания органического вещества и глины в почве накладываются ограничения на выбор мультиспектральных изображений, связанные с выделением на изображениях сухих почв без растительности (оголенных почв). В работе (Dematte et al., 2018) приведены такие условия, которые для каналов S2 представлены следующим образом (Castaldi et al., 2019): 1) нулевая облачность в районе исследования, 2) значение вегетационного индекса $NDVI = (B8 - B4)/(B8 + B4) < 0.35$ для исключения зеленой растительности, 3) разность коэффициентов отражения (КО) между каналами B3 и B2 и каналами B4 и B3 должна быть больше 0 (использование данных фильтров улучшает выделение почвы (Dematte et al., 2018)), 4) значение $NBR = (B11 - B12)/(B11 + B12)$ должно быть $NBR < 0.05$, что позволяет выделить на изображении пиксели с сухой оголенной почвой. Почвенная влага усиливает поглощение света, и КО резко снижается. Спектральные каналы B11 и B12 сильно коррелируют с влажностью почвы (Musick, Pelletier, 1988), и их разность позволяет различать спектры сухой, влажной почвы, а также спектры, связанные с растительностью. Выбор порога для NBR сильно влияет на количество пикселей на изображении, удовлетворяющих условиям сухой почвы. Увеличение порога NBR до 0.15 приводит к уменьшению числа “нужных” пикселей в 2 раза (Castaldi et al., 2019), т.е. увеличение NBR приводит к ухудшению точности моделей для определения параметров почвы по спутниковым данным.

В результате для исследуемой территории были выбраны оптические снимки S2 L2A за 23.4.2019 и 22.4.2020, для которых выполнено условие отсутствия облачности, NDVI меняется от 0.17 до 0.24, разность КО между каналами B3 и B2 и каналами B4 и B3 больше 0, значения NBR несколько превышают порог 0.05, а именно, NBR меняется от 0.1 до 0.158. Приведенные значения выполняются для всех площадок, кроме площадки № 6 (лес), для которой значение $NDVI > 0.5$ и $NBR > 0.17$.

Оценка содержания гумуса в верхнем слое почвы по данным S2

Потери органического углерода почвы (SOC- soil organic carbon) являются одной из главных причин деградации пахотных земель. Таким образом, пространственный и временной мониторинг SOC является чрезвычайно важной задачей, решению которой посвящены многочисленные работы (Орлов и др., 2001; Караванова, Орлов, 1996;

Castaldi et al., 2019; Gholizadeh et al., 2018 и многие другие). Данными авторами получены регрессионные модели с экспоненциальной связью содержания SOC и коэффициента отражения (КО), и разной степенью отрицательной корреляции между содержанием SOC и значениями КО в зависимости от спектрального канала.

Для создания регрессионной модели связи КО с Н необходимы как спутниковые, так и наземные данные, причем количество образцов почв должно быть не меньше 20 для определения корреляции. Кроме того, исследуемые тестовые участки должны иметь близкий гранулометрический состав. Дело в том, что чем более мелкие частицы почвы, тем больше КО от этих почв (Караванова, 2003). То есть модели для определения Н являются локальными, и использование имеющихся в литературе моделей требует корректировки для исследуемой территории.

В работах (Castaldi et al., 2019; Gholizadeh et al., 2018) показано, что наилучшую корреляцию между содержанием гумуса в почве и КО имеют спектральные каналы S2 B4–B6 и B11, B12. Для качественной оценки изменений содержания гумуса в почвах исследуемых тестовых участков приведем графики разности значений КО спектральных каналов S2 B4–B6, B11, B12 для сеансов съемки 23.4.2019 и 22.4.2020 (рис. 4) для каждой тестовой площадки, и оценим изменения КО за год.

Учитывая тот факт, что КО данных каналов имеет отрицательную корреляцию с содержанием гумуса в почве, оценим по знаку разности в какую сторону произошло изменение за год содержания гумуса. Разность значений КО положительна для площадки № 1 (чернозем, несмытая пашня) для всех каналов, кроме B12. Это свидетельствует о том, что значения КО для площадки № 1 увеличились в 2020 г. в сравнении с 2019 г., т.е. содержание Н уменьшилось. Для чернозема смытого (площадка № 2) есть уменьшение разности для четырех каналов и увеличение разности для одного. Для площадки № 3 (целина) разность КО для всех каналов отрицательная, что может свидетельствовать об увеличении содержания Н. Аналогичная ситуация и для площадки № 4 (серые лесные почвы несмытые). Для слабосмытых серых почв (площадка № 5) для трех каналов есть положительная разность, для двух — отрицательная.

Для количественной оценки Н необходима локальная модель для тестируемой территории, либо использование существующих моделей с корректировкой для локальной территории со своим гранулометрическим составом почвы.

Покровским в 1927 г. впервые было предложено уравнение экспоненты, определяющее связь содержания гумуса и значений КО (по Орлов и др., 2001):

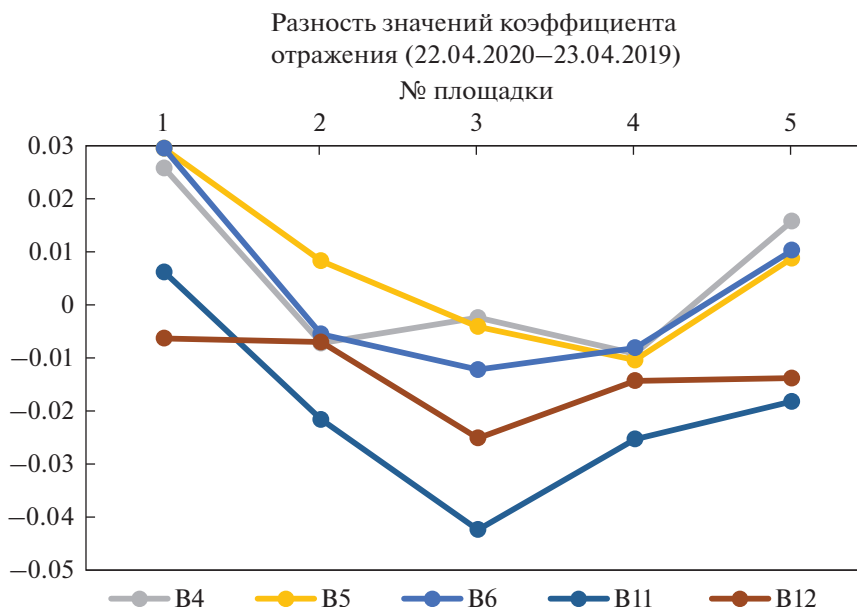


Рис. 4. Разность значений коэффициента отражения от почв пяти тестовых площадок для сеансов съемки 22.4.2020 и 23.4.2019.

$$\rho_{750} = \rho_{750,h} + Ae^{-kH}, \quad (1)$$

где ρ_{750} – КО на длине волны 750 нм, $\rho_{750,h}$ – КО многогумусной почвы, $\rho_{750,0} = (\rho_{750,h} + A)$ – КО безгумусной почвы, H – содержание гумуса, k – коэффициент, определяющий крутизну экспоненциального графика.

При использовании экспоненциальной зависимости КО от содержания гумуса в сухой оголенной почве следует учитывать три момента: 1) при небольшом содержании гумуса (до 3%) его определение наиболее точное, но разброс значений КО, соответствующих данному содержанию гумуса, велик, 2) при значениях содержания гумуса 6–7% и более определение содержания гумуса по КО неточное, влияние оказывают при одинаковом содержании гумуса влажность почвы, условия обработки (Караванова, 2003), 3) решающим фактором является выбор дат спутниковой съемки, позволяющих выявить пиксели с сухой оголенной почвой.

В настоящей работе выяснить корреляционную связь КО с содержанием гумуса на 5 тестовых участках Новосибирской области не представляется возможным из-за недостаточного числа наземных точек измерений. Судя по имеющимся наземным измерениям содержания гумуса в почвах тестовых участков (табл. 1), предполагаем, что кривые зависимости КО от H (гумус) представлены выположивающимися участками, где точность определения содержания H от КО невелика.

В данной работе для определения содержания H по спутниковым данным используется экспо-

ненциальная модель с параметрами для черноземов и серых лесных почв, представленная в (Караванова, Орлов, 1996).

Отметим, что для соответствия этой модели надо взять данные оптики для длины волны 750 нм. Для S2 – это канал B6 с длиной волны 740 нм, шириной полосы 15 нм и пространственным разрешением 20 м. Для использования параметров уравнения экспоненты по (Караванова, Орлов, 1996) в локальных условиях исследуемых тестовых участков необходима корректировка этих параметров. Одним из возможных вариантов для оценки содержания гумуса в почвах тестовых участков является использование для черноземов следующих параметров: $\rho_{750,h} = 8.0$, $A = 29.1$ и $k = 0.1256$. Для серых лесных почв $\rho_{750,h} = 8.5$, $A = 40.5$ и $k = 0.28$. В табл. 3 приведены вычисленные значения содержания гумуса H для пяти тестовых площадок при данных коэффициентах уравнения экспоненты.

Отличие полученных значений процентного содержания гумуса H по уравнению (табл. 3) от значений, полученных в лабораторных условиях (табл. 1), составляет по абсолютной величине не более 1.5% для 2019 г. Источники погрешностей лежат в первую очередь в недостаточном количестве наземных данных. Для каждого типа почв (черноземы, серые лесные почвы) необходимо порядка 20 и более наземных измерений, одна часть которых используется для получения параметров экспоненты и вторая часть для валидации полученного уравнения. Чем больше таких наземных данных, тем надежнее формула. Вторым

Таблица 3. Параметры уравнения экспоненты и определенное по уравнению процентное содержание гумуса в почве тестовых площадок Новосибирской области

Почвы	Значения параметров уравнения экспоненты			№ площадки	Н, % 2019	Н, % 2020
	$\rho_{750,h}$	A	k			
Серые лесные	8.5	40.5	0.28	4	6.0	6.4
				5	5.8	5.4
Черноземы: выщелоченные, обыкновенные, типичные, лугово-черноземные почвы	8.0	29.1	0.126	1	9.9	7.5
				2	6.8	7.1
				3	7.7	8.6

моментом, приводящим к погрешностям, является выбор исходного оптического снимка, для которого наиболее важным параметром является значение спектрального индекса NBR. Увеличение значения $NBR > 0.05$ значительно сокращает число пикселей, удовлетворяющих условию сухой оголенной почвы. И тем не менее некоторые выводы о количественном содержании гумуса в почве сделать можно, прежде всего, об изменении значений Н за год (2019–2020 гг.). Наибольшее отличие получено для площадки № 1 – уменьшение содержания гумуса за год на 2.4%. Для остальных площадок изменения за год незначительные от 0.3 до 0.9% (см. табл. 3).

Оценка содержания глины в верхнем слое почвы по оптическим данным спутника S2

Многочисленные работы посвящены оценке компонентов текстуры почвы с использованием дистанционных оптических данных (Украинский, Чепелев, 2011; Shabou et al., 2015; Bousbih et al., 2019; Vaudouret et al., 2019; Gholizadehet al., 2018 и другие). Так в работе (Gholizadehet al., 2018) показано, что наилучшей корреляцией с содержанием глины в почве обладает коэффициент отражения канала B7 спутника S2, а также спектральные индексы $V = B8/B4$ (Vegetation index), $SAVI = 1.5 \times (B8 - B4)/(B8 - B4 + 0.5)$ (Soil Adjusted Vegetation Index) и другие. Отмечена слабая корреляция S2 с илом и песком. Авторы (Bousbih et al., 2019) получили, что каналы B11 (SWIR1) и B12 (SWIR2) S2 наиболее чувствительны к изменениям содержания глины в почве, и обладают отрицательной корреляцией с этим содержанием. Причем, для использования этих каналов условием для получения количественной оценки содержания глины является сухая оголенная почва. В работе (Hengl, 2007) введен спектральный индекс глины $CI = B11/B12$ (Clay Index), который отличается сильной отрицательной корреляцией с содержанием глины в почве. Следует отметить,

что количественная оценка содержания глины в почве проводится локально для исследуемой территории, и точность оценки напрямую связана с числом тестовых измерений образцов почвы.

На рис. 5, а приведены графики значений $CI = B11/B12$ для двух сеансов съемки S2 23.04.2019 и 22.04.2020, что позволяет сделать качественное сравнение изменений за год в содержании глины в верхнем слое почвы исследуемых тестовых площадок № 1–№ 5. Изменения за год по содержанию глины не коснулись площадки № 5, для площадок № 2–№ 4 есть небольшое увеличение содержания глины, и небольшое уменьшение для площадки № 1.

Количественной оценкой процентного содержания глины в почве может стать регрессионная модель (Castaldi et al., 2019) экспоненциальной связи содержания в почве органического углерода с КО. Для случая с глиной в качестве переменной в экспоненте используем индекс глины $CI = B11/B12$, имеющий отрицательную корреляцию с содержанием глины в почве. Формула для количественной оценки процентного содержания глины в почве такая: $Clay(\%) = 802 \times \exp(-2.69CI)$ – для черноземов, $Clay(\%) = 5123.6 \times \exp(-4.29CI)$ – для серых лесных почв. Часть наземных измерений содержания глины в почве тестовых участков Новосибирской области была использована для получения параметров экспоненты, а оставшаяся часть – для валидации. Полученные формулы носят локальный характер, и точность полученных коэффициентов в них напрямую зависит от числа наземных измерений.

Проверка на наличие корреляции CI с элементами текстуры почвы показала, что отрицательная корреляция CI с илом и физической глиной отсутствует. В формулах Clay – это частицы с диаметром больше 0.001 мм и меньше 0.01 мм.

На рис. 5, б приведены графики значений процентного содержания глины в почвах пяти тестовых

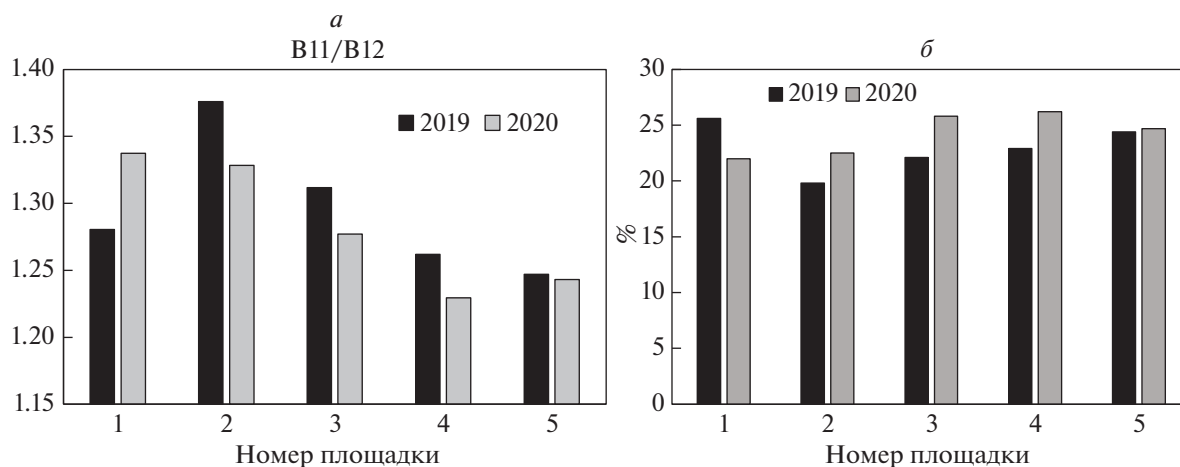


Рис. 5. Качественная оценка изменений значений индекса глины CI за год (а) и количественная оценка изменений значений процентного содержания глины в почвах тестовых площадок (б)

вых участков (измеренные значения) и подсчитанные по формулам выше для 2020 г.

Качественная оценка содержания глины в почвах тестовых участков по значению индекса глины не противоречит количественной оценке по регрессионной модели.

Оценка влажности в верхнем слое почвы по оптическим и радарным данным S1 и S2

Рассмотрим возможность оценки влажности почвы по оптическим данным, радарным данным, а также по совместному использованию оптических и радарных данных.

Оптические данные. В работе (Bugarapol, Nagasawa, 2016) используется индекс NDDI (normalized difference drought index) для оценки влажности почвы:

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}, \quad (2)$$

где $NDWI = \frac{B8A - B11}{B8A + B11}$ или $NDWI = \frac{B8A - B12}{B8A + B12}$ (normalized difference wet index), B8A, B11 и B12 – спектральные каналы S2. Авторами показано, что большие значения NDDI соответствуют меньшим значениям влажности почвы. В данной работе для вычисления NDWI использовался канал B12. График NDDI для исследуемых площадок с черноземами (площадки № 1, № 2, № 3 (целина)) и серыми лесными почвами (№ 4, № 5, № 6 (лес)) показан на рис. 6 для сеансов оптической съемки за апрель (20, 27 и 30) и май (10, 12 и 17) 2020 г.

Выявилась сильная дифференциация значений NDDI для разных площадок для сеанса съем-

ки 20.4.2020 и группировка тестовых участков по близким значениям влажности почвы. Самой большой влажностью обладает почва площадки № 6 (лес). Самой малой влажностью отличаются площадки №№ 4, 5 (серые лесные почвы, пашня) и № 3 (черноземы, целина). Между этими крайними значениями группируются площадки №№ 1 и 2 (черноземы несмытые и смытые, пашня). При переходе от апреля к маю дифференциация площадок по значениям NDDE значительно уменьшается, приводя к близости значений влажности почвы для всех тестовых площадок.

Радарные данные. В работе (N. Baghdadi et al., 2016) предложена полу-эмпирическая модель для определения влажности оголенной почвы, основанная на модели Dubois (Dubois et al., 1995). Параметры модели получены на базе большого числа измерений для сенсоров X, C и L диапазонов длин волн с углами обзора 20°–45°. Авторы (Baghdadi et al., 2016) демонстрируют более точную оценку влажности почвы. Приведем формулы этой модели для поляризации VV и VH, что соответствует поляризациям моды IW GRD Sentinel 1:

$$\sigma_{VV}^0 = 10^{-1.138} (\cos \theta)^{1.528} 10^{0.008 \text{ctg}(\theta) m_v} f(h)^{0.71 \sin(\theta)}, \quad (3)$$

$$\sigma_{VH}^0 = 10^{-2.325} (\cos \theta)^{-0.01} 10^{0.011 \text{ctg}(\theta) m_v} f(h)^{0.44 \sin(\theta)}, \quad (4)$$

где σ_{VV}^0 и σ_{VH}^0 – коэффициенты обратного рассеяния для поляризаций VV и VH, θ – угол обзора, m_v – объемная влажность почвы в %, $f(h)$ – функция, зависящая от шероховатости поверхности почвы. Напомним, что для применимости модели Dubois (Dubois et al., 1995) необходимо выпол-

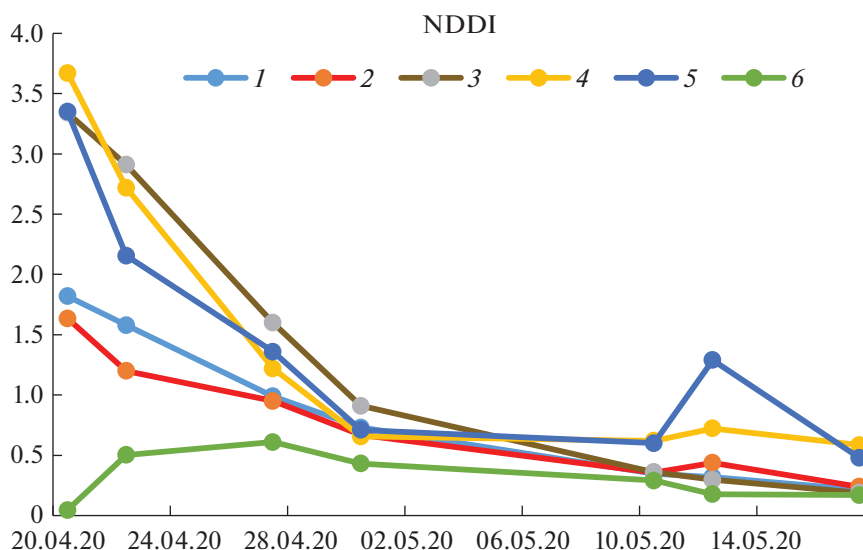


Рис. 6. Графики NDDI для исследуемых площадок с черноземами и серыми лесными почвами за апрель, май 2020 г.

нение ряда условий, а именно, шероховатость поверхности $kh \leq 2.5$, $m_v \leq 35\%$, $\theta \geq 30^\circ$, $k = 2\pi/\lambda$.

Из формул (3), (4) для определения m_v получаем следующее выражение:

$$m_v = (\lg_{10} A - \lg_{10} B)/C, \quad (5)$$

где $A = 10^{1.15} (\cos \theta)^{0.6794}$, $B = (\sigma_{VV}^0)^{0.44} / (\sigma_{VH}^0)^{0.71}$, $C = 0.00429 \operatorname{ctg} \theta$, (6)

Для угла обзора 43° значение $A = 11.4204$ ($\lg_{10} A = 1.05768$), $C = 0.0046$.

Из полученных численных значений влажности почвы можно использовать только значения $\leq 35\%$.

Совместное использование радарных и оптических данных. Авторами (Y. Bao et al., 2018) предложен новый метод восстановления поверхностной влажности почвы SSM (surface soil moisture) в условиях частичной растительности на основе совместного использования радарных данных Sentinel 1 и оптических данных Landsat 8 OLI и модели водяного облака (water cloud model). Авторами показано, что 1) для поверхности, покрытой растительностью, $NDWI = (B8A - B11)/(B8A + B11)$ наиболее подходит для устранения влияния растительности при оценке влажности почвы, 2) данные Sentinel 1 VV поляризации более подходят для восстановления SSM в сравнении с HV поляризацией в том числе из-за большей точности, 3) модель позволяет получать SSM с высокой точностью, о чем свидетельствует коэффициент корреляции $R = 0.911$ со среднеквадратичной ошибкой $0.053 \text{ см}^3/\text{см}^3$ между измеренной и полученной по модели SSM. С учетом положений 1)–3) формула для определения объемной влажности почвы SSM в слое 0–5 см такова:

$$\begin{aligned} SSM = & 0.539 + 0.044\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VV}^0 \sec \theta \times \\ & \times (-0.008 + 0.016NDWI + 0.031NDWI^2) + \\ & + NDWI(0.444 + 2.964NDWI + \\ & + 11.15NDWI^2 - 33.75NDWI^3), \end{aligned} \quad (6)$$

где SSM измеряется в $\text{см}^3/\text{см}^3$, σ_{VV}^0 в дБ. Следует отметить (Bao et al., 2018), что модель (7) игнорирует влияние шероховатости поверхности и типа растительности.

В данной работе для вычисления NDWI в (7) использовался канал B12, как и выше при вычислении NDDI. Для вычисления SSM использовались радарные данные за 23 апреля и 5 мая 2020 г., а оптические, соответственно, за 22 апреля и 10 мая 2020 г. В последнем случае из-за отсутствия безоблачных сеансов с 30 апреля по 10 мая. На рис. 7 показаны графики изменения SSM ($\text{см}^3/\text{см}^3$) для двух соседних дат радарной съемки 23 апреля и 5 мая 2020 г. Отметим отрицательное значение SSM для площадки № 1, которое является следствием ограниченной точности модели (Bao et al., 2018).

Полученные оценки влажности верхнего слоя почвы как качественные по оптическим данным (рис. 6), так и количественные по радарным данным (учитывая значения, не превышающие 35%) и совместном использовании радарных и оптических данных (рис. 7) показали их непротиворечивость, общие тренды и возможность сравнить степень влажности верхнего слоя почвы для разных участков дистанционно при отсутствии наземных измерений.

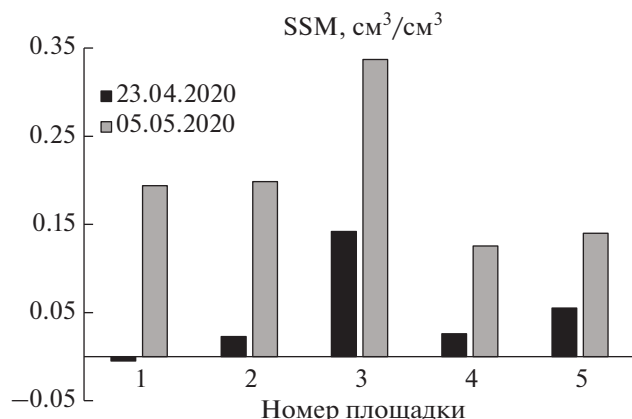


Рис. 7. Графики изменения SSM (cm^3/cm^3) для двух соседних дат радарной съемки 23 апреля и 5 мая 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено использование радарных и оптических данных спутников Sentinel 1 и Sentinel 2 за 2019–2020 г. для оценки содержания гумуса, процентного содержания глины и влажности в верхнем слое почвы на примере черноземов и серых лесных почв Новосибирской области. На основе показаний температурных датчиков, установленных на тестовых площадках и данных спутника Sentinel 1, показано наличие положительной корреляции КОР со значениями температуры воздуха, поверхности почвы и температуры почвы на глубине 5 см с коэффициентом корреляции Спирмена, соответственно, 0,8, 0,44 и 0,6 для VH поляризации и 0,69, 0,41 и 0,6 для VV поляризации (площадка № 3).

Сделана оценка влажности верхнего слоя почвы тестовых участков на основе радарных и оптических данных, а также на основе их совместного использования на базе существующих моделей.

Качественная и количественная оценка изменения за год содержания гумуса и глины в верхнем слое почвы тестовых участков на основе мультиспектральных данных Sentinel 2 и регрессионных моделей, показала наибольшее изменение в процентном содержании гумуса и глины для площадки № 1 (чернозем выщелоченный, несмытая пашня), а именно, уменьшение процентного содержания гумуса на 2,4% и глины на 3,6%. Для остальных площадок изменение за год процентного содержания гумуса в сравнении с площадкой № 1 незначительное, а глины несколько увеличенное в 2020 г. в сравнении с 2019 г. Сравнить изменения за год в процентном содержании гумуса и глины в почвах тестовых участков по данным ДЗЗ с наземными измерениями не уда-

лось из-за приостановки полевых работ в 2020 г. вследствие пандемии.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0008 “Космос”, а также в рамках государственного задания ИПА СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Караванова Е.И., Орлов Д.С. Оценка содержания гумуса в почвах по их спектральной отражательной способности // *Агрохимия*. 1996. № 1. С. 3–9.
- Караванова Е.И. Оптические свойства почв и их прихода. М.: Изд-во МГУ, 2003. 151 с.
- Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.
- Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: МГУ, 2001. 175 с.
- Украинский П.А., Ченелев О.А. Изучение гранулометрического состава почв Поосколья по данным дешифрирования космических снимков// *Изв. Самарского науч. центра РАН*. 2011. Т. 13. № 1(5). С. 1225–1229.
- Baghdadi N., Choker M., Zribi M., El Hajj M., Paloscia S., Verhoest N.E.C., Lievens H., Baup F., Mattia F. A New Empirical Model for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces // *Remote Sens*. 2016. V. 8. 920. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/rs8110920>
- Bao Y., Lin L., Wu Sh., Deng Kh.A.K., Petropoulos G.P. Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*. 2018. V. 72. P. 76–85.
- Burapapol K., Nagasawa R. Mapping Soil Moisture as an Indicator of Wildfire Risk Using Landsat 8 Images in Sri Lanka National Park, Northern Thailand // *J. Agricultural Science*. 2016. V. 8. № 10. P. 107–119. ISSN 1916-9752 E-ISSN 1916-9760.
- Bousbih S., Zribi M., Pelletier Ch., Gorrab A., Lili-Chabaane Z., Baghdadi N., Ben Aissa N. and Mougnot B. Soil Texture Estimation Using Radar and Optical Data from Sentinel-1 and Sentinel-2 // *Remote Sens*. 2019. 11. 1520. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs11131520>
- Castaldi F., Chabrilat S., Don A., van Wesemael B. Soil Organic Carbon Mapping Using LUCAS Topsoil Database and Sentinel-2 Data: An Approach to Reduce Soil Moisture and Crop Residue Effects // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. 18. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs11182121>
- Demattèa J.A.M., Fongaroa C.T., Rizzob R., Safanellia J.L. // *Remote Sensing of Environment*. 2018. 212. P. 161–175.
- Dubois P.C., Van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // *IEEE Trans. GRS*. 1995. V. 33. P. 915–926.
- Gholizadeh A., Žižala D., Saberioon M., Borůvka L. Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging // *Rem. Sens. of Environment*. 2018. V. 218. P. 89–103.

Hengl T. A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. 2007. EUR (Luxembourg). EUR. Scientific and technical research series (V. 22904). Publications Office. 2007. 143 p. ISBN 9279069047.

Musick H.B., Pelletier R.E. Response to soil moisture of spectral indexes derived from bidirectional reflectance in thematic mapper wavebands // *Remote Sens. Environ.* 1988. V. 25. P. 167–184.

Shabou M., Mougenot B., Lili-Chabaane Z., Walter C., Boulet G., Aissa N., Zribi M. Soil Clay Content Mapping Using a Time Series of Landsat TM Data in Semi-Arid Lands // *Remote Sens.* 2015. V. 7. P. 6059–6078.

Vaudour E., Gomez C., Fouad Y., Lagacherie P. Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperate and Mediterranean agroecosystems // *Remote Sens. Environ.* 2019. V. 223. P. 21–33.

Estimation of Some Parameters of the Upper Soil Layer by Radar and Optical Data of Sentinel 1/2 Satellites in Conditions of the Novosibirsk Region

N. V. Rodionova¹, S. Ya. Kudryashova², and A. S. Chumbaev²

¹*Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Fryazino, Moscow Region, Russia*

²*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian branch of RAS, Novosibirsk, Russia*

This paper considers the use of radar and optical data from the Sentinel 1 and Sentinel 2 satellites for 2019–2020 to assess the content of humus, clay and humidity in the upper (0–10 cm) soil layer on the example of chernozems and gray forest soils of the Novosibirsk region. Special attention is paid to the selection of satellite images, it is necessary to meet the conditions for the soil to be dry and bare. The humus content was estimated for five test sites based on a regression model (Karavanova and Orlov, 1996) and S2 spectral band B6 (740 nm). The model parameters were adjusted for the conditions of the study area separately for chernozems and gray forest soils. The clay content in the soil was estimated using S2 optical data, ground-based measurements, and regression models with an exponential dependence of the clay content on the reflection coefficients from the soil at the SWIR channels of S2 (Bousbih et al., 2019; Shabou et al., 2015). The change in the percentage of humus and clay content in the test sites soils per the year is shown. The topsoil moisture content is estimated for radar, optical and combined use of radar and optical data.

Keywords: C-band radar data, backscattering coefficient, multispectral optical data, reflection coefficient, soil humus, soil clay content, soil moisture

REFERENCES

Baghdadi N., Choker M., Zribi M., El Hajj M., Paloscia S., Verhoest N.E.C., Lievens H., Baup F., Mattia F. A New Empirical Model for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces // *Remote Sens.* 2016. V. 8. P. 920. P. 1–14. DOI: 10.3390/rs8110920.

Bao Y., Lin L., Wu Sh., Deng Kh. A.K., Petropoulos G.P. Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation.* 2018. V. 72. P. 76–85.

Burapapol K., Nagasawa R. Mapping Soil Moisture as an Indicator of Wildfire Risk Using Landsat 8 Images in Sri Lanna National Park, Northern Thailand // *J. Agricultural Science.* 2016. V. 8. № 10. P. 107–119. ISSN 1916-9752 E-ISSN 1916-9760.

Bousbih S., Zribi M., Pelletier Ch., Gorraab A., Lili-Chabaane Z., Baghdadi N., Ben Aissa N. and Mougenot B. Soil Texture Estimation Using Radar and Optical Data from Sentinel-1 and Sentinel-2 // *Remote Sens.* 2019. 11. 1520. DOI: 10.3390/rs11131520. P. 1–20.

Castaldi F., Chabrilat S., Don A., van Wesemael B. Soil Organic Carbon Mapping Using LUCAS Topsoil Database and Sentinel-2 Data: An Approach to Reduce Soil Moisture and Crop Residue Effects // *Remote Sensing.* 2019. V. 11. 18. P. 1–15.

<http://doi.org/10.3390/rs11182121>

Demattêa, J.A.M., Fongaroa C. T., Rizzob R., Safanellia J.L. // *Remote Sensing of Environment.* 2018. 212. P. 161–175.

Dubois P. C., Van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // *IEEE Trans. GRS.* 1995. V. 33. P. 915–926.

Gholizadeh A., Žižala D., Saberioon M., Borůvka L. Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging // *Rem. Sens. of Environment.* 2018. V. 218. P. 89–103.

Hengl T. A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. 2007. EUR (Luxembourg). EUR. Scientific and technical research series (V. 22904). Publications Office. 2007. 143 p. ISBN 9279069047.

Kachinskij N.A. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения [Mechanical and micro-aggregate composition of soil, methods of its study]. М.: Изд-во АН СССР. 1958. 192 с. (In Russian)

Karavanova E.I., Orlov D.S. Оценки содержания гумуса в почвах по их спектральной отражательной способности [Assessment of humus content in soils by their spectral reflectivity] // *Агрохимия.* 1996. № 1. P. 3–9. (In Russian)

Karavanova E.I. Оптические свойства почвы и их природа [Optical properties of soils and their nature]. МГУ, Москва. 2003. 151 с. (In Russian)

Musick H.B., Pelletier R.E. Response to soil moisture of spectral indexes derived from bidirectional reflectance in

thematic mapper wavebands // *Remote Sens. Environ.* 1988. V. 25. P. 167–184.

Orlov D.S., Sukhanova N.I., Rozanova M.S. Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' pochv i ikh komponentov [Spectral reflectivity of soils and their components]. MGU, Moscow. 2001. 175 s. (In Russian)

Shabou M., Mougnot B., Lili-Chabaane Z., Walter C., Boulet G., Aissa N., Zribi M. Soil Clay Content Mapping Using a Time Series of Landsat TM Data in Semi-Arid Lands // *Remote Sens.* 2015. V. 7. P. 6059–6078.

Ukrainskii P.A., Chepelev O.A. Izuchenie granulometricheskogo sostava pochv Pooskol'ya po dannym deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov [Study of the granulometric composition of the soils of Pooskolya according to the data of decoding satellite images] // *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN.* 2001. V. 13. № 1(5). P. 1225–1229. (In Russian)

Vaudour E., Gomez C., Fouad Y., Lagacherie P. Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperate and Mediterranean agroecosystems // *Remote Sens. Environ.* 2019. V. 223. P. 21–33.

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦИАНОБАКТЕРИЙ В ЧЁРНОМ
И АЗОВСКОМ МОРЯХ**

© 2022 г. Е. А. Морозов*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: frisman@list.ru*

Поступила в редакцию 29.10.2020 г.

Использованы данные гиперспектрального спутникового датчика Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO, NASA) для идентификации и качественной оценки содержания цианобактерий (ЦБ) в прибрежных акваториях Черного и Азовского морей. Применены три алгоритма обработки данных: два использующие анализ формы спектра и один полуаналитический. Первый алгоритм использует определение минимума спектра коэффициента отражения для дистанционного зондирования в области спектра около 680 нм, так называемый индекс присутствия ЦБ. На основе данного алгоритма разработан второй алгоритм для идентификации присутствия в воде фикоцианина, являющегося пигментом-маркером для ЦБ. Второй алгоритм анализирует минимум спектра коэффициента отражения для дистанционного зондирования (Rrs) в области 620 нм. Третий полуаналитический алгоритм позволяет определять концентрацию фикоцианина. Произведено сопоставление результатов автоматической идентификации присутствия ЦБ с визуальным анализом спектров. Произведено сопоставление результатов применения трех алгоритмов к изображениям. Сделан вывод, что фикоцианин присутствует в исследованных акваториях, и что его присутствие является следствием наличия ЦБ.

Ключевые слова: Гиперспектральные спутниковые данные, HICO, цианобактерии, фикоцианин, Черное море, Азовское море

DOI: 10.31857/S0205961422010055

ВВЕДЕНИЕ

Исследования фитопланктона с помощью спутниковых данных шагнуло далеко за пределы определения концентрации хлорофилла-а (Хл-а). Активно разрабатываются как методы, нацеленные на исследования других параметров фитопланктона, например, размерной структуры, видового состава, идентификации вредоносных цветений водорослей, так и идентификации других пигментов помимо, Хл-а (Uitz et al., 2008; ЮССГ, 2014; Bracher et al., 2017). Такое развитие данного научного направления связано как с необходимостью извлекать максимум информации из спутниковых данных о цвете океана (ЮССГ, 2014), так и с увеличением количества и качества разнообразных датчиков цвета океана на околоземной орбите, включая новые гиперспектральные (Groom et al., 2019).

В данном исследовании была поставлена задача идентификации ЦБ (сине-зеленых водорослей) по данным спутникового дистанционного зондирования. Сине-зеленые водоросли привлекают внимание исследователей в виду их токсичности и способности создавать обширные интен-

сивные цветения. Это может приводить к негативному воздействию на рыболовную и рекреационную отрасли. Немаловажным также является учащение таких цветений в различных частях света вследствие увеличивающейся антропогенной нагрузки на водные объекты, изменения климата и, возможно, и других факторов. Исследование данной проблемы требует методов, не только позволяющих регистрировать аномальные цветения, но и идентифицировать присутствие этих водорослей в небольших количествах. Цель — исследования проложить путь к определению содержания ЦБ, содержащихся в воде в любом количестве, создать работоспособные алгоритмы обработки гиперспектральных данных.

Пигмент фикоцианин является уникальным пигментом для ЦБ в пресноводных акваториях (Randolph et al., 2008; Castenholz, 2001). Этот факт неоднократно использовался различными авторами для разработки алгоритмов идентификации экстремальных цветений ЦБ в озерах. В морских водах фикоцианин может встречаться не только в цианобактериях, но и в классах Rhodophyta и Cryptophyta (Wright et al., 2005). Несмотря на то,



Рис. 1. Карта исследуемых районов. Расположение приводимых ниже в статье спутниковых изображений показано черными прямоугольниками.

что в морских акваториях этот пигмент не уникален для ЦБ, количество видов фитопланктона, которые его содержат весьма ограничено.

Существует множество методов идентификации и картирования ЦБ (Stumpf et al., 2016). Для целей нашего исследования можно условно разделить их на методы, которые идентифицируют ЦБ с использованием максимума поглощения фикоцианина на 620 нм (Schalles & Yacobi, 2000; Randolph et al., 2008) и те, которые ориентируются на косвенные спектральные признаки. Например, на основе общей формы спектра R_{rs} (Sun et al., 2015; Карабашев и Евдошенко, 2015) или максимума коэффициента отражения в области 680 нм (Wynne et al., 2008; Wynne et al., 2013). Обе группы содержат алгоритмы как для определения концентрации, так и для качественной идентификации.

В данном исследовании была поставлена задача идентификации (обнаружения) ЦБ Черном и Азовском морях. Данный выбор обусловлен следующими причинами:

1) ЦБ уже исследовались коллективом МГИ по данным мультиспектральных датчиков MODIS и Landsat (Алескерова и др., 2018; Kubriakov et al., 2021). с использованием статистической взаимосвязи между формой спектра в сине-зеленой области и вероятностью присутствия сине-зеленых водорослей в северо-западе ЧМ и АМ. Таким образом, данное исследование является развитием существующего направления и попыткой осветить вопрос цветения ЦБ в Черном и Азовском морях с использованием нового типа данных.

2) Использование максимума поглощения фикоцианина в качестве спектрального признака присутствия сине-зеленых водорослей предпо-

читительно с точки зрения интерпретации результатов. Именно фикоцианин является однозначным индикатором присутствия ЦБ. Такой подход позволит однозначно определить наличие сине-зеленых водорослей без привлечения дополнительной информации (например, данных о частоте или интенсивности цветений сине-зеленых водорослей в исследуемой области). Использование же особенностей других областей спектра требует набора *in situ* и спутниковых данных, с количеством измерений, достаточным, чтобы статистически достоверно определить взаимосвязь между областями спектра не подверженными интенсивному влиянию фикоцианина и присутствием ЦБ.

3) Использование гиперспектральные данные о цвете моря позволяет исследовать содержание отдельных пигментов в воде с недоступной для мультиспектральных датчиков точностью, благодаря детальному спектральному разрешению. Также для исследовательской работы полезно иметь более одного канала в области 620 нм, для изучения интенсивности и ширины спектральных особенностей, обусловленных присутствием фикоцианина. На данный момент гиперспектральные данные, особенно спутниковые используются не очень интенсивно. С учетом планируемого в 2022 запуске гиперспектрального датчика цвета вод Ocean Color Imager (Groom et al., 2019) следует ожидать увеличения доступности такого типа данных и разрабатывать алгоритмы их обработки.

ИССЛЕДУЕМЫЙ РЕГИОН

Регион исследования определялся исходя из сочетания двух факторов: наиболее вероятного района присутствия ЦБ в Азовском море (АМ) и

Черном море (ЧМ) и расположения областей с наилучшим покрытием спутниковыми данными гиперспектрального датчика HICO. Исследуемыми районами являются северо-запад ЧМ (СЗЧМ), район устья Дуная и Таганрогский залив (ТЗ) с близлежащими акваториями в АМ.

АМ является полузамкнутым внутренним водоемом, сообщаемым в своей южной части с ЧМ через неглубокий Керченский пролив. Средняя соленость вод АМ изменяется (1988–2000 гг.) от 10.4 до 11.8 и Таганрогского залива от 5.7 до 7.8. АМ и Таганрогский залив являются водоемами, соответственно, прибрежного и эстуарийного типа (Студеникина и др., 1999; Ларионов и Макаревич, 2001). Эвтрофикация и пониженные значения солености способствуют цветению ЦБ в бассейне, – таких как *Microcystis aeruginosa*, *Aphanisomenon flosaquae*, *Anabaena* spp. и др. (Макаревич, Ларионов, 2006; Матишов и др., 2009; Лужняк, 2011; Lomakin, 2018).

Фитопланктонное сообщество СЗЧМ характеризуется тем, что уже в 2008–2010 г. наблюдается тенденция появления 3–4 пиков развития фитопланктона шельфовых водах: весна, лето, осень и зима, ранее исследователи отмечали, только 2–3: весенне–летний, осенний (Попов и др., 2010). Весенний максимум фитопланктона в значительной степени определяется влиянием весенних половодий на реках СЗЧМ (Попов и др., 2010). Наибольшее влияние оказывают Днепр и Южный Буг. Вклад различных видов в структуру фитопланктонного сообщества в открытых водах СЗЧМ изменился. Наиболее значительный рост числа видов наблюдался у *Chlorophyta* и *Cyanobacteria*. Увеличение видового разнообразия часто происходит за счет представителей пресноводных и солоноватоводных комплексов, среди которых много зеленых и сине-зеленых водорослей. Снижение солености создало благоприятные условия для развития этих представителей фитопланктона. (Попов и др., 2010, Теренько и Нестерова, 2015; Дорофеев и Сухих, 2020).

Учитывая распресненность прибрежных вод исследуемых акваторий, сообщения о присутствии ЦБ в них и тот факт, что Фц в морских акваториях встречается преимущественно в цианобактериях, мы можем принять Фц в качестве однозначного индикатора присутствия ЦБ.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

В данном исследовании было применено три алгоритма обработки спутниковых данных с целью идентификации ЦБ и фикоцианина. Первый алгоритм разработан Вэйном с соавторами (Wynne et al., 2008; Wynne et al., 2013) и использует параметр, описывающий форму спектра на длине

волны 681 нм. Второй алгоритм разработан автором статьи и использует параметр описывающий форму спектра в области 620 нм. Третий алгоритм разработан Рандольфом с соавторами (Randolph et al., 2008) и является полуаналитическим алгоритмом для определения концентрации Хл-а и фикоцианина.

В качестве исходных данных для алгоритмов были использованы данные уровня L2 гиперспектрального спутникового датчика HICO космического агентства NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/hico/>). На данный момент это единственный гиперспектральный спутниковый датчик, разработанный специально для исследования цвета прибрежных вод. HICO получил более 10000 изображений по всему миру за период пока он был установлен на Международной Космической Станции с сентября 2009 по сентябрь 2014. Недолгий период существования HICO делают затруднительным сбор синхронной базисных *in situ* и спутниковых данных, но несомненной выгодой является возможность использования специализированных гиперспектральных спутниковых данных видимого диапазона пока не доступны данные перспективных гиперспектральных спутниковых данных видимого диапазона. Длины волн (каналы) для данных L2 датчика HICO распределены в диапазоне 353–719 нм с шагом 5.7 нм. Данные представляют собой значения спектрального коэффициента рассеяния (коэффициента отражения для дистанционного зондирования), определяемого как $Rrs(0, \lambda) = Lu(0, \lambda)/Ed(0, \lambda)$, где $Lu(0, \lambda)$ и $Ed(0, \lambda)$ – соответственно, спектральная яркость восходящего света над поверхностью воды в надирном направлении и освещенность водной поверхности; λ – длина волны.

Алгоритм идентификации цветений ЦБ

Это эмпирический алгоритм, использующий статистическую связь формы спектра исходящего из воды излучения с наличием цветения ЦБ. Существуют и используются для мониторинга цветений ЦБ модификации алгоритма для датчиков MERIS (Wynne et al., 2008) и MODIS (Wynne et al., 2013). В данном исследовании использованы данные гиперспектрального датчика HICO. В алгоритме использованы три канала датчика HICO и выбраны длины волн близкие к длинам волн использованным в наиболее разработанной версии этого алгоритма, а именно версии для датчика MERIS. Таким образом, для HICO $\lambda = 679$ нм, $\lambda^- = 662$ нм и $\lambda^+ = 708$ нм и расхождение с оригинальными длинами волн MERIS не превышает 3 нм.

Форма спектра при 681 нм используется для того, чтобы отличить цветение ЦБ от цветения другого фитопланктона с помощью изображений

спутникового датчика MERIS. Во время интенсивного цветения ЦБ спектр около 681 нм имеет понижение, поскольку рассеяние, вызванное ЦБ, подавляет сигнал флуоресценции, создавая тем самым понижение значений nLw или Rrs относительно значений в соседних каналах. Эта взаимосвязь согласуется как с данными дистанционного зондирования, так и с данными *in situ* (Wynne и др., 2008, Wynne и Stumpf, 2015).

$$SS(\lambda) = nLw(\lambda) - nLw(\lambda^-) - \{nLw(\lambda^+) - nLw(\lambda^-)\}(\lambda - \lambda^-)/(\lambda^+ - \lambda^-),$$

$$\text{ИЦ} = -SS,$$

где SS — это параметр, описывающий форму спектра (от “spectral shape”, Wynne и др., 2008), nLw — нормализованная яркость восходящего из воды излучения, λ составляет 681 нм, а λ^+ и λ^- составляют 709 и 665 нм, соответственно. При положительных значениях $SS(681)$ — это высота линии флуоресценции (FLH) (Wynne и др., 2008; Gower и др. 1999). При исследовании цветений ЦБ автoрами было выявлено, что $SS(681)$ имеет отрицательные значения. Это вызывается падением значений $nLw(681)$ (длина волны линии флуоресценции) ниже базового уровня флуоресценции в областях цветения ЦБ. Базовый уровень определялся прямой линией, проведенной между nLw на 665 нм (λ^-) и nLw на 709 нм (λ^+).

Несколько биофизических факторов могут приводить к провалу в спектре в области 681 нм по сравнению с каналами 667 (или 665 нм). Поглощение Хл-а более интенсивно в области спектра около 680 нм, чем около 665 нм (Bricaud et al. 1995), что понижает коэффициент отражения или яркость в области 680 нм относительно соседних областей спектра. Существует также свидетельство того, что ЦБ не флуоресцируют так же сильно, как другие типы водорослей (Seppälä et al. 2007). Существуют и другие интерпретации и исследования, посвященные механизмам образования максимума или минимума в области 680 нм, например, (Huot, Brown и Cullen, 2005; Gower и др., 1999; Wynne и др., 2013).

Алгоритм идентификации фикоцианина

Алгоритм идентификации фикоцианина в воде по спутниковым данным был разработан автором статьи по аналогии с предыдущим алгоритмом. Был выбран подход на основе анализа максимума поглощения фикоцианина на 620 нм с использованием гиперспектральных спутниковых данных. Теоретическим обоснованием является тот факт, что фикоцианин, содержащийся в ЦБ, имеет единственный максимум поглощения на длине волны 620 нм. Величина провала (минимума) в этой области должна коррелировать с содержанием фикоцианина. Подход на основе определения

высоты линии флуоресценции, аналогичный Wynne и др. (2008) может быть использован для идентификации и количественной оценки этого провала. Использование гиперспектральных данных позволяет экспериментировать с выбором λ , λ^- и λ^+ и подобрать сочетание каналов, для выделения минимума, обусловленного фикоцианином в спектре Rrs на фоне влияния других оптически активных компонентов воды.

Было протестировано несколько вариантов алгоритма (с использованием различных комбинаций каналов в области 620 нм). Результаты получились качественно и количественно сходными. В статье приводятся данные для двух наиболее сильно различающихся вариантов исполнения, с λ^- , λ и λ^+ равными, соответственно, 605, 622 и 633 нм, и 610, 622 и 627 нм. Наиболее оптимальными можно считать длины волн 610, 622 и 633 нм, позволяющие получить один из наиболее строгих критериев идентификации. На рис. 2 и рис. 3 видно, что провал в спектрах в диапазоне 600–645 нм присутствует практически всегда, поэтому использование каналов, наиболее близких к длине волны 620 нм, позволяет минимизировать влияние пигментов с максимумом поглощения, близким к 620 нм. Алгоритм рассматривает область спектра вблизи 620 нм — это максимум поглощения света фикоцианином. Недостатком может являться то, что вблизи поглощают другие пигменты (Хл-с, Хл-в, фикоэритрин), которые могут снижать точность определения этим методом, особенно если набор пигментов в воде будет сильно меняться во времени или в пространстве. Эту особенность нужно учитывать, сравнивая значения ФЦИ полученные в разные сезоны и в различных акваториях, так как одни и те же значения индекса могут соответствовать различным концентрациям Фц.

Коэффициент корреляции между результатами, получаемыми по вышеприведенным вариантам исполнения алгоритма определения ФЦИ составил 0.76 для 9-ти изображений в СЗЧМ и 0.87 для 4 изображений в ТЗ.

Информационный продукт, получаемый в результате применения данного алгоритма, был назван фикоцианиновым индексом (ФЦИ). Преимуществом ФЦИ перед ИЦ является то, что он реагирует непосредственно на максимум поглощения фикоцианина, а не на результат сложного взаимодействия флуоресценции Хл-а любого фитопланктона с поглощением и рассеянием различными оптически активными компонентами в воде. Тем не менее, область максимума поглощения фикоцианина подвержена влиянию Хл-а, хлорофилла-б (Хл-б) и поглощения желтым веществом. Это может являться причиной неустойчивости ФЦИ при различных гидрооптических условиях, например, возможны различные типы

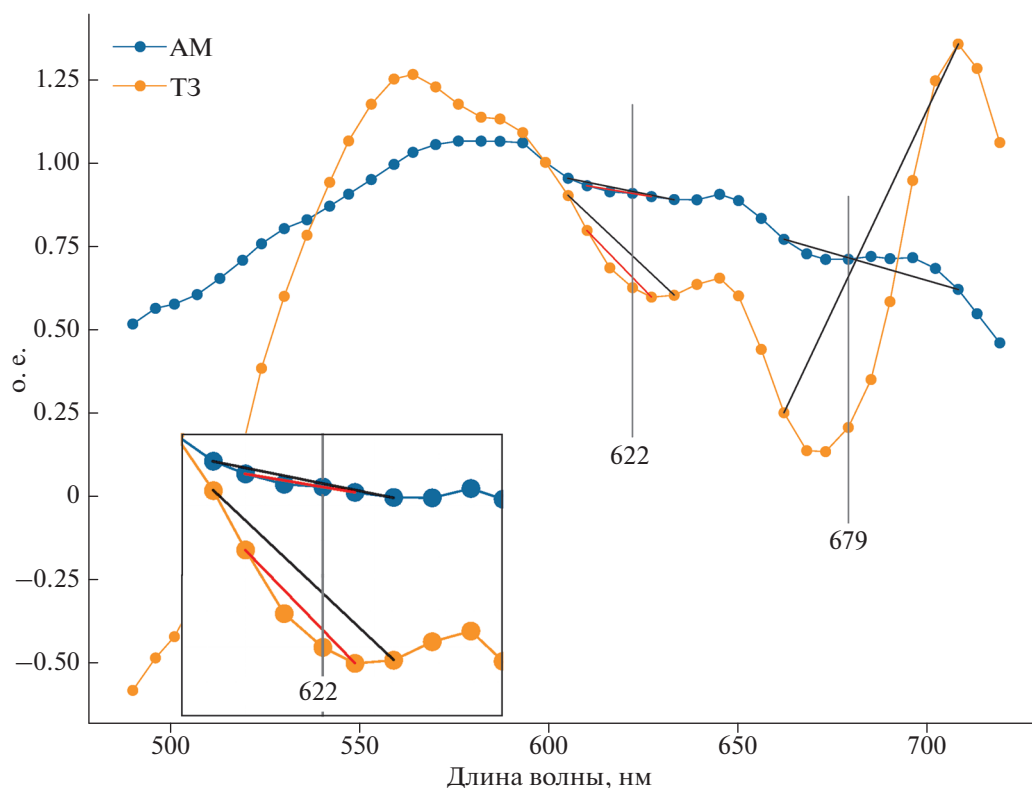


Рис. 2. Иллюстрация каналов, используемых для расчета ИЦ ($\lambda^- = 662$ нм, $\lambda = 679$ нм и $\lambda^+ = 708$ нм) и ФЦИ (Вариант № 1: $\lambda^- = 605$ нм, $\lambda = 622$ нм и $\lambda^+ = 633$ нм; Вариант № 2: $\lambda^- = 610$ нм, $\lambda = 622$ нм и $\lambda^+ = 627$ нм). Цифры 622 и 679 обозначают λ для ФЦИ и ИЦ, соответственно. Врезка в левой нижней стороне иллюстрирует базовый уровень для ФЦИ в варианте № 1 – черная линия, и варианте № 2 – красная линия. Спектры Rrs уровня L2, NICO, 2 сентября 2014 г.

ошибок при повышенных прибрежных стоках и цветениях фитопланктона, не являющегося ЦБ. Приближение λ^- и λ^+ к 620 нм является попыткой, избежать ложных положительных идентификаций. В качестве примера можно взять также спектры 1 и 4 на рис. 3, приведенном ниже. Спектр 1, соответствующий водам с меньшим содержанием фитопланктона содержит два минимума в интересующей нас области: 620 нм (Фц) и 630–640 нм (предположительно, Хл-б). В более эвтрофных водах, которым соответствует спектр 4 эти два минимума сливаются. В такой ситуации разнесение λ^- и λ^+ дальше от 620 нм повышает вероятность что алгоритм будет срабатывать не на Фц, а на какой-то другой пигмент или их комбинацию.

Полуэмпирический алгоритм

Алгоритм был разработан для определения количественных значений концентрации фикоцианина (Simis et al., 2005).

Алгоритм был применен Randolph (2008) с соавторами к гиперспектральным судовым данным в двух водохранилищах. Детальное описание при-

менение алгоритма к гиперспектральным данным Rrs дано в (Randolph et al., 2005). Авторы определяют поглощение Хл-а и Фц на 665 и 620 нм, соответственно. Для оценки концентрации Фц был применен коэффициент удельного поглощения Фц на 620 нм, равный $0.0070 \text{ м}^2 \text{ мг Фц}^{-1}$. В результате проверки по контактными данным точность алгоритма характеризовалась коэффициентом детерминации $r^2 = 0.85$ (при числе проверочных измерений *in situ*, $n = 48$, и уровне значимости $p < 0.0001$), и среднеквадратической ошибке СКО = 19.54 мг/м^3 .

С целью успешного применения данного алгоритма к спутниковым данным датчика NICO уровня L2, в алгоритме были произведены модификации. Была произведена интерполяция каналов, чтобы соответствовать длинам волн, использованным Randolph et al., 2008. Rrs620 был получен интерполяцией данных Rrs622 и Rrs616. Использовалось поглощение водой на 719 нм (Pope and Fry, 1997) вместо 778 нм, так как 719 нм – это максимальная длина волны содержащаяся в стандартных данных NICO уровня L2.

В процессе расчетов определяется концентрация Хл-а которая используется для введения по-

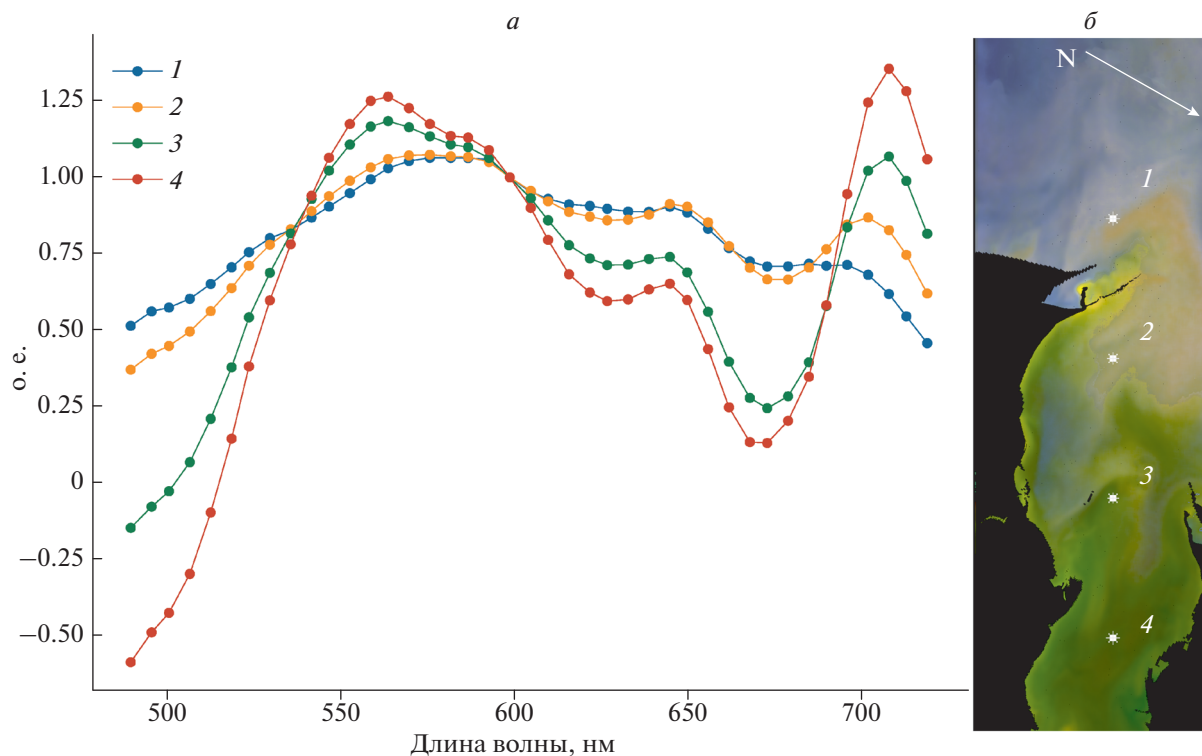


Рис. 3. Изменение спектров от мористой к устьевой части ТЗ (а). Спектры нормированы на длину волны 599 нм и представлены в относительных единицах. Расположение точек, для которых построены спектры на фоне RGB изображения ТЗ (б). Белая стрелка указывает направление на север. Изображение NICO за 2 сентября 2014 г.

правки на поглощение Хл-а в области поглощения фикоцианина. Затем рассчитывается концентрация фикоцианина в $\text{мг}/\text{м}^3$. Несмотря на то, что алгоритм определяет количественные значения, в нашем случае их стоит использовать как ориентировочные, так как алгоритм был разработан для другого региона и нами были внесены упомянутые выше изменения, а данные *in situ* для проведения проверки и настройки алгоритма на момент проведения исследования не доступны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование, описываемое в данной статье, состоит из двух частей. В первой визуально анализируются спектры прибрежных вод с целью идентификации признаков присутствия ЦБ и фикоцианина. Во второй части производится применение трех вышеописанных алгоритмов к данным NICO в исследуемых регионах.

Анализ спектров

На рис. 3 представлено изменение спектров коэффициента отражения для дистанционного зондирования от мористой части ТЗ к кутовой его части. На спектре № 1 просматриваются отдельные небольшие минимумы в каналах 616 и 633–

639 нм, являющиеся следствием поглощения Фц и Хл-б, соответственно. Максимум поглощения Фц и Хл-б располагается на 620 и 650 нм, соответственно (Ruiz-Verdú и др., 2008). Эти минимумы смещены в синюю сторону спектра вследствие влияния поглощения желтым веществом. На спектре № 2, соответствующем устьевой части залива, слияние этих максимумов обуславливает общий минимум Rrs. На спектрах № 3 и 4 (рис. 3, а), расположенных в более биопродуктивных водах в ТЗ, эти минимумы полностью объединяются в один большой минимум, который в литературе часто интерпретируется как поглощение Фц и может использоваться для идентификации и определения концентрации Фц (Gitelson et al., 2011; Sun et al., 2015).

Обработка изображений

В данном разделе рассматриваются три изображения обработанные каждое тремя алгоритмами. На рис. 4 представлен ТЗ. Все три алгоритма показывают очень схожие пространственные распределения. Это подтверждается коэффициентами корреляции в табл. 1, колонка “27 июня 2013, ТЗ”. Столь хорошая согласованность между тремя алгоритмами, скорее всего, связана с сильным влиянием стока реки Дон, что

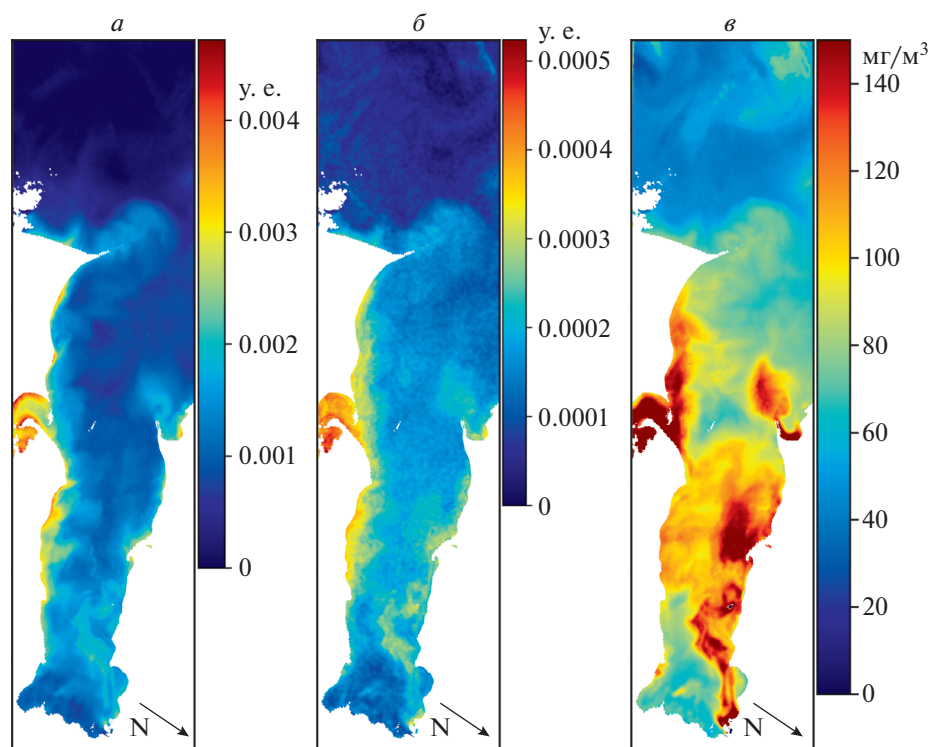


Рис. 4. Сравнение распределения ИЦ (*a*), ИФЦ (*б*) и концентрации Фц (*в*) в прибрежных водах СЗЧМ. Черные стрелки указывают направление на север. Изображение за 27 июня 2013 г.

приводит к взаимосвязанным изменениям распределения фитопланктона, минеральной взвеси, желтого вещества и других параметров. Три алгоритма используют различные области спектра подверженные влиянию различного набора факторов, но мощный речной сток приводит к практически одновременному изменению этих факторов.

Рис. 5 и 6 иллюстрируют применение трех алгоритмов к данным в СЗЧМ в середине лета и начале осени, соответственно. Для изображения от 10 июля 2014 (рис. 5) важно отметить, что ИФЦ (рис. 5, *б*) в плане категоричности оценки ситуации занимает промежуточное положение между результатами, получаемыми по ИЦ (рис. 5, *а*) и распределением концентрации Фц (рис. 5, *в*). ИЦ идентифицирует ЦБ только в акватории озера Разим и в части плюма реки Дунай. ИФЦ и концентрация Фц (рис 5, *б* и 5, *в*, соответственно) пока-

зывают более плавное пространственное распределение. Это может быть связано с тем, что ИЦ является продуктом, разработанным для идентификации интенсивных и опасных цветений ЦБ и нечувствителен к низким концентрациям ЦБ. Полуаналитический алгоритм, напротив, определяет концентрацию Фц, которая по сути своей не может изменяться в пространстве резко, и показывает присутствие ЦБ, а не только их цветение. ИФЦ был разработан в данном исследовании, именно для того, чтобы иметь возможность качественно отслеживать пространственные вариации Фц, даже если он присутствует в концентрации ниже, чем при цветении (интенсивном развитии) ЦБ. Окончательный ответ на вопрос какое пространственное распределение является более соответствующим действительности может дать только привлечение данных *in situ*. Тем не менее, можно предположить, что алгоритмы построены

Таблица 1. Коэффициенты корреляции (r) между ИЦ, ФЦИ и концентрацией Фц для данных, проиллюстрированных на рис. 4, 5 и 6.

Параметр	27 июня 2013, ТЗ		10 июля 2014, СЗЧМ		9 сентября 2014, СЗЧМ	
	ФЦИ	концентрация Фц	ФЦИ	концентрация Фц	ФЦИ	концентрация Фц
ИЦ	0.937	0.798	0.707	0.465	0.808	-0.036
ФЦИ	—	0.890	—	0.669	—	0.072

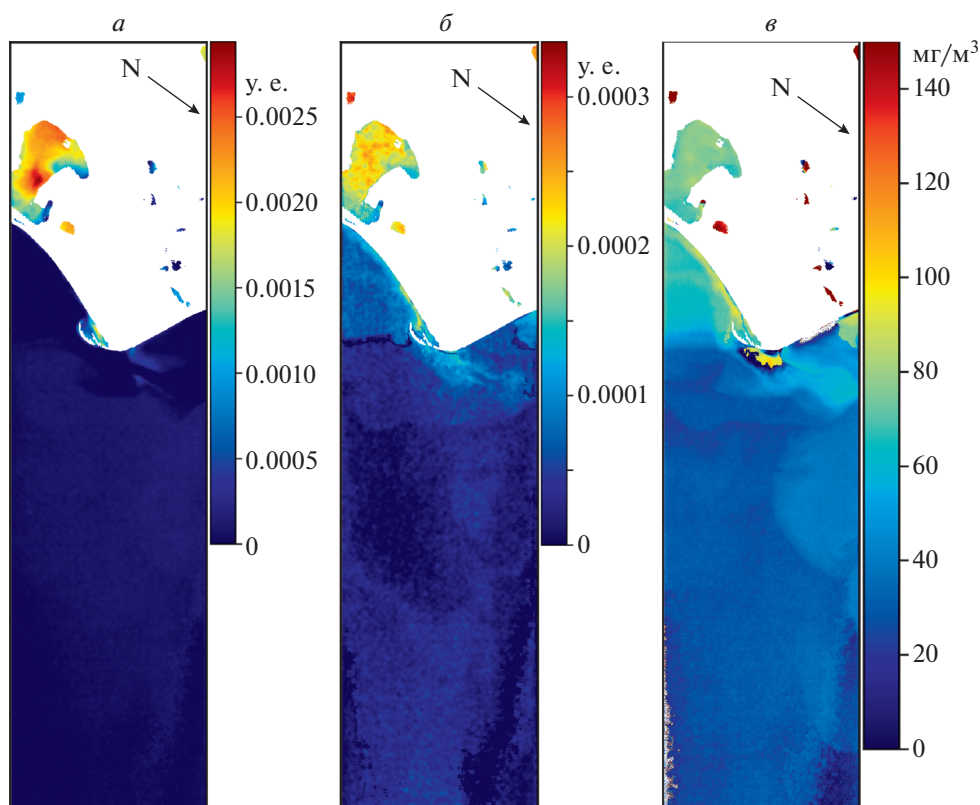


Рис. 5. Сравнение распределения ИЦ (*a*), ИФЦ (*б*) и концентрации ФЦ (*в*) в прибрежных водах СЗЧМ. Черные стрелки указывают направление на север. Изображение NICO за 10 июля 2014 г.

ные на основе использования канала максимума поглощения ФЦ в области 620 нм (ИФЦ и ФЦ) должны давать физически более обоснованный результат.

На рис. 6 представлено распределение ИЦ (рис. 6, *a*), ИФЦ (рис. 6, *б*) и концентрации ФЦ (рис. 6, *в*) 9 сентября 2014 г. Комментарии к распределению совпадают с таковыми для ситуации 10 июля 2014 г. Особенность же состоит в наличии в изображении большой области с ошибками атмосферной коррекции (рис. 6, *в*) в большей части изображения с мористой стороны. Эти области специально не были замаскированы, чтобы продемонстрировать устойчивость алгоритмов на основе анализа формы спектра (рис. 6, *a*, *б*) к ошибкам атмосферной коррекции. Дополнительной причиной расхождений между ИФЦ и ФЦ может быть использование в алгоритме определения концентрации ФЦ коррекции учитывающей влияние поглощения Хл-а на область максимума спектра поглощения фикоцианина.

И ИЦ, и ФЦИ являются эмпирическими алгоритмами при картировании результатов обработки спутникового изображения они дают качественную картину распределения ЦБ. При наличии достаточного количества измерений *in situ*, есть возможность также эмпирически (статисти-

чески) связать значения ИЦ и ФЦИ в ограниченном регионе с концентрацией ЦБ. В литературных источниках можно встретить оптические данные с гиперспектральным разрешением, полученные в областях цветения ЦБ (см., например, Gitelson et al., 2011; Sun et al., 2015; Ruiz-Verdu et al., 2008), но эти примеры относятся в большинстве своем, к пресноводным акваториям и интенсивным цветениям ЦБ. В данном исследовании освещается вопрос как изменяется спектр (с гиперспектральным разрешением) R_{rs} при изменении содержания ЦБ в прибрежных морских водах и производится качественное картирование этого процесса с использованием различных алгоритмов обработки спутниковых данных.

Эмпирические алгоритмы ИЦ и ИФЦ показывают схожие результаты, что подтверждается результатами анализа пространственных распределений и коэффициентами корреляции. Это согласуется с литературными данными об устойчивости такого типа к ошибкам атмосферной коррекции (Stumps et al., 2016). Результаты применения полуэмпирического алгоритма в общем, согласуются со значениями ИЦ и ФЦИ (см. рис. 4 и 5, табл. 1, колонки “27 июня 2013, ТЗ” и “10 июля 2014, СЗЧМ”). Явным исключением являются случаи, когда полуэмпирический алгоритм определения концен-

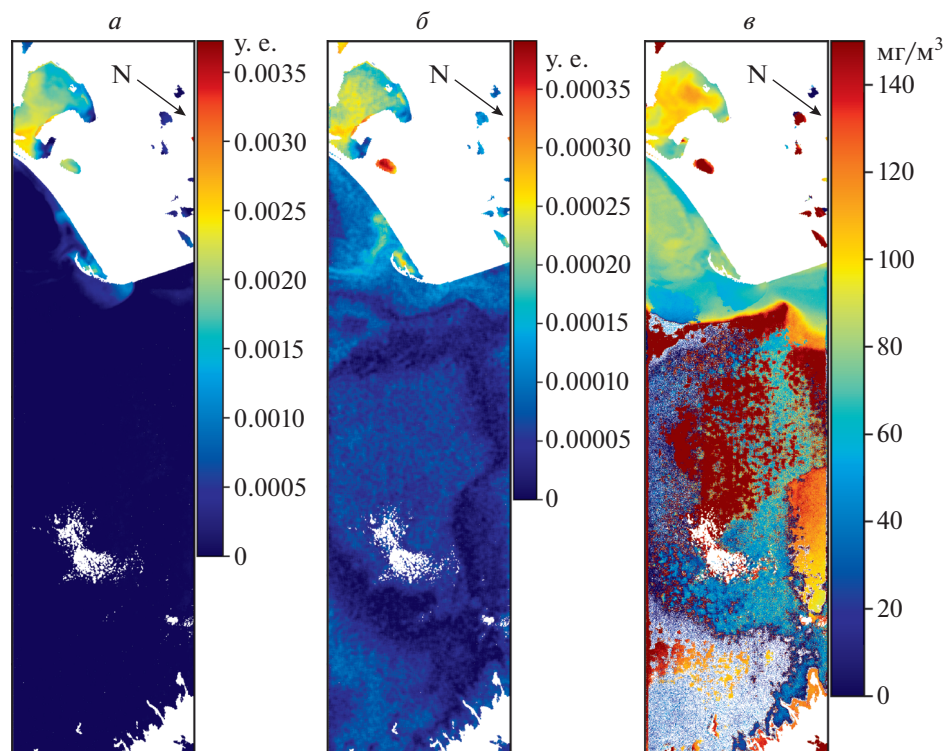


Рис. 6. Сравнение распределения ИЦ (*a*), ИФЦ (*б*) и концентрации ФЦ (*в*) в прибрежных водах СЗЧМ. Черные стрелки указывают направление на север. Изображение НИСО за 9 сентября 2014.

трации Фц применяется к областям с ошибками в атмосферной коррекции (рис. 6 и табл. 1, колонка “9 сентября 2014, СЗЧМ”). Это является серьезной проблемой для практического применения, но не является внутренним недостатком алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) К отдельным акваториям ЧМ и АМ применены три различных алгоритма: два для идентификации ЦБ и один для качественной оценки концентрации Фц.

2) Разработан и протестирован эмпирический алгоритм оценки присутствия Фц в водах природных объектов по гиперспектральным оптическим данным. Разработанный алгоритм может быть применен к гиперспектральным данным и прошедшим атмосферную коррекцию и позволяет на качественном уровне определять присутствие фикоцианина в природных водах. В таком виде он может считаться глобальным. Алгоритм может использоваться в автоматическом режиме. Данный алгоритм может являться основой для регионального эмпирического алгоритма количественного определения Фц или ЦБ в воде, в таком случае потребуются привлечение региональных данных *in situ*.

3) На основе гиперспектральных спутниковых данных идентифицировано присутствие Фц в

прибрежных акваториях ЧМ и АМ. Сделано обоснованное предположение, что Фц является следствием присутствия ЦБ.

Для пикселей с качественной атмосферной коррекцией все три алгоритма показывают схожие результаты с корреляцией 0.47–0.94. Для пикселей, у которых в результате ошибок атмосферной коррекции наблюдались отрицательные значения R_{rs} в красной области спектра полуаналитический алгоритм не применим. Алгоритмы определения ИЦ (Wynne et al., 2005) и ИФЦ (данное исследование) даже в пикселях с некачественной атмосферной коррекцией срабатывают и дают схожие результаты ($r = 0.71–0.94$).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по проекту гранта РФФИ, 20-35-70034, Стабильность-2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Лишаев П.Н., Мизюк А.И. Цветение цианобактерий в Азовском море по данным сенсоров спутников серии Landsat // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 52–64.
Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Исследование потоков компонентов морской экосистемы с северо-западного шельфа в глубоководную часть Черного моря // Мор-

- ской гидрофизический журн. 2020. Т. 36. № 5. С. 501–513.
<https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-501-513>
- Карабаев Г.С., Евдошенко М.А.* Спектральные признаки цветения цианобактерий в Балтийском море по данным сканера MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 158–170.
- Ларионов В.В., Макаревич П.П.* Общие закономерности развития фитопланктонных сообществ эстуарных областей Азовского и северных морей России // Среда, биота и моделирование экологических процессов в Азовском море. Апатиты: Изд-во Кольск. НЦ РАН. 2001. С. 88–97.
- Лужняк О.Л.* Развитие фитопланктона Таганрогского залива в весенне-летний период после исключительно теплой зимы 2006/2007 гг. // Изв. высш. уч. зав. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2011. № 1. С. 67–71.
- Макаревич П.П., Ларионов В.В.* Особенности строения фитопланктонных сообществ в зонах градиентов солености бассейна Азовского моря // Альгология. 2006. Т. 16. № 2. С. 216–226.
- Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Степанян О.В., Аксенов Д.С.* Комплексные исследования Азовского, Черного и Каспийского морей на научно-исследовательском судне “Денеб” в 2007 г. // Океанология. 2009. Т. 49. № 2. С. 313–318.
- Попов Ю.И., Ковалишина С.П., Грандова М.А., Матыгин А.С.* Многолетние изменения характеристик морских вод и фитопланктона северо-западного шельфа Черного моря // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона. 20–23 июня 2012. Керчь, Крым, УДК 551.465. С. 171–178.
- Теренько Д.А., Нестерова Л.М.* Суанопроکاریота планктона северо-западной части Черного моря (Украина) // Al-gologia. 2015. Т. 25. № 3. С. 278–296.
- Bracher A., Bouman H.A., Brewin R.J.W., Bricaud A., Brotas V., Ciotti A.M., Clementson L., Devred E., Di Cicco A., Dutkiewicz S., Hardman-Mountford N.J., Hickman A.E., Hieronymi M., Hirata T., Losa S.N., Mouw C.B., Organelli E., Raitsos D.E., Uitz J., Vogt M., Wolanin A.* Obtaining phytoplankton diversity from ocean color: a scientific roadmap for future development // Front. Mar. Sci. 2017. 4. 55. P. 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00055>.
- Castenholz R.W.* Phylum BX. Cyanobacteria // Bergey’s Manual of Determinative Bacteriology. 2001. V. 2. P. 473–599.
- Gitelson A.A., Gao B.-C., Li R.-R., Berdnikov S., Saprygin V.* Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean – the Azov Sea case study // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6. P. 1–6.
- Gower J.F.R., Doerffer R., Borstad G.A.* Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of uorescence, absorption and scattering, and its observation by M ERIS // Int. J. Remote Sensing. 1999. V. 20 № 9. P. 1771–1786.
- Groom S., Sathyendranath S., Ban Y., Bernard S., Brewin R., Brotas V., Brockmann C., Chauhan P., Choi J., Chuprin A., Ciavatta S., Cipollini P., Donlon C., Franz B., He X., Hirata T., Jackson T., Kampel M., Krasemann H., Lavender S., Pardo-Martinez S., Mélin F., Platt T., Santoleri R., Skakala J., Schaeffer B., Smith M., Steinmetz F., Valente A., Wang M.* Satellite Ocean Colour: Current Status and Future Perspective // Frontiers in Marine Science. 2019. V. 6. P. 485.
- Huot Y., Brown C.A., Cullen J.J.* New Algorithm for MODIS Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence and a Comparison with Present Data Products // Limnology and Oceanography Methods. 2005. V. 3. P. 108–130.
- IOCCG*, 2014. Phytoplankton functional types from space. In: *Sathyendranath, S.* (Ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 15, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Aleskerova A.A., Stanichny S.V.* Spatio-temporal variability of cyanobacteria blooms in the North-Western shelf of the Black Sea from MODIS and Landsat satellite data // Harmful algae. 2021. (в печати)
- Lomakin P.D.* Field of the Dissolved Organic Matter Content in the Taganrog Bay (the Sea of Azov) // Physical Oceanography. 2018. V. 25. № 6. P. 459–471. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-6-4-59-471>
- Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum ~380–700 nm of pure water. II. Integrating cavity measurements // Applied Optics. 1997. V. 36. № 33. P. 8710–8723.
- Randolph K., Wilson J., Tedesco L., Li L., Pascual D.L., Soy-eux E.* Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll-a and phycocyanin // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. P. 4009–4019.
- Ruiz-Verdú A., Simis S.G.H., de Hoyos C., Gons H.J., Peña-Martínez R.* An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112 P. 3996–4008.
- Schalles J.F., Yacobi Y.Z.* Remote detection and seasonal patterns of phycocyanin, carotenoid and chlorophyll pigments in eutrophic waters // Archiv fur Hydrobiologie Special Issues Advances in Limnology. 2000. V. 55. P. 153–168.
- Simis S., Peters S., Gons H.* Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water // American Society of Limnology and Oceanography. 2005. V. 50. № 11. P. 237–245.
- Stumpf R.P., Davis, T.W., Wynne T.T., Graham J.L., Loftin K.A., Johengen T.H., Gossiaux D., Palladino D., Burtner A.* Challenges for mapping cyanotoxin patterns from remote sensing of cyanobacteria // Harmful Algae. 2016. V. 54. P. 160–173.
- Sun D., Hu C., Qiu Z., Shi K.* Estimating phycocyanin pigment concentration in productive inland waters using Landsat measurements: A case study in Lake Dianchi // Optics Express. 2015. V. 23. № 3. P. 3055.
- Uitz, J., Huot, Y., Bruyant, F., Babin, M., Claustre, H.* Relating phytoplankton photophysiological properties to community structure on large scales // Limnol. Oceanogr. 53(2), 2008. 614–630.

Wright S.W., Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C. Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods. UNESCO Pub. 2005. 667 p.

Wynne T.T., Stumpf R.P., Tomlinson M.C., Warner R.A., Tester P.A., Dyble J., Fahnenstiel G.L. Relating spectral shape to cyanobacterial blooms in the Laurentian Great Lakes // International J. Remote Sensing. 2008. V. 29. № 12. P. 3665–3672.

Wynne T.T., Stumpf R.P., Briggs T.O. Comparing MODIS and MERIS spectral shapes for cyanobacterial bloom detection // International J. Remote Sensing. 2013. P. 1–11.

Wynne T.T., Stumpf R.P. Spatial and Temporal Patterns in the Seasonal Distribution of Toxic Cyanobacteria in Western Lake Erie from 2002–2014 // Toxins. 2015. V. 7. P. 1649–1663.
<https://doi.org/10.3390/toxins7051649>

Use of Hyperspectral Satellite Data for Cyanobacteria Identification in the Black and Azov Seas

E. A. Morozov

Marine Hydrophysical Institute, RAS, Sevastopol, Russia

The data of the hyperspectral satellite sensor HICO (NASA) were used for identification and qualitative assessment of the content of blue-green algae in some areas of the Black and Azov seas. Three data processing algorithms are applied. Two algorithms were based on the spectrum shape analysis and one is semi-analytical. The first algorithm uses the determination of the minimum of the reflectance spectrum for remote sensing in the spectral region around 680 nm, the so-called cyanobacteria index. Based on this algorithm, a new algorithm has been developed to identify the presence of phycocyanin in water, which is a pigment-marker for blue-green algae. The second algorithm analyzes the spectrum minimum in the 620 nm region. The third semi-analytical algorithm allows the determination of the phycocyanin concentration. The results of automatic identification of the presence of blue-green algae were compared with visual analysis of the spectra. Comparison of the results of the three algorithms application to images was made. It was concluded that phycocyanin is present in the studied areas, and that its presence is a consequence of the presence of blue-green algae.

Keywords: Hyperspectral satellite data, HICO, cyanobacteria, phycocyanin, Black Sea, Azov Sea

REFERENCES

Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichnyy S.V., Lishaev P.N., Mizyuk A.I. Tsvetenie tsyanobakteriy v Azovskom more po dannym sensorov sputnikov serii Landsat [Cyanobacteria bloom in the sea of azov according to Landsat data] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2018. № 6. P. 52–64. (In Russian).

Dorofeev V.L., Suhil L.I. Issledovanie potokov komponentov morskoy ekosistemy s severo-zapadnogo shelfa v glubokovodnuyu chast Chernogo morya [Investigation of marine ecosystem components flow from north-west shelf to the deep part of the Black Sea] // Marine hydrophysical j. 2020. V. 36. № 5. P. 501–513. (In Russian)
Doi: 10.22449/0233-7584-2020-5-501-513

Karbashev G.S., Evdoshenko M.A. Spektralnye priznaki tsveteniya tsyanobakteriy v Baltoyskom more po dannym skanera MODIS [Spectral features of cyanobacteria blooms in the Baltic Sea as revealed by MODIS instrument] // Sovremennye problemy distantsyonnogo issledovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. № 3. P. 158–170. (In Russian)

Larionov V.V., Makarevich P.R. Obschie zakonomernosti razvitiya fitoplanktonnykh soobshchestv estuarnykh oblastey Azovskogo i severnykh morey Rossii [General patterns of phytoplankton community in the estuarine regions of Azov and northern seas of Russia] // Environment, biota, and modelling of ecological processes in the Azov Sea. Apatity: Publisher Kolsk. NC RAS. 2001. P. 88–97. (In Russian)

Luzhnyak O.L. Razvitiye fitoplanktona Taganrogskogo zaliva v vesenne-letniy period posle iskluyuchitelno tepley zimy

2006/2007 [Development of phytoplankton in the Gulf of Taganrog during spring-summer after an exceptionally warm winter of 2006/2007] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. 2011. № 1. P. 67–71. (In Russian)

Makarevich P.R., Larionov V.V. Osobennosti stroeniya fitoplanktonnykh soobshchestv v zonah gradientov solenosti basseyna Azovskogo morya [Features of the phytoplankton community structure in salinity gradient zones of the Azov Sea] // Algologiya. 2006. V. 16. № 2. P. 216–226. (In Russian)

Matishov G.G., Matishov D.G., Stepanyan O.V., Aksenov D.S. Kompleksnyee issledovaniya Azovskogo, Chernogo i Kaspiyskogo morey na nauchno issledovatel'skom sudne "Deneb" v 2007 [Complex study of Azov, Black, and Caspian seas on research vessel "Deneb" in 2007] // Okeanologiya. 2009. T. 49. № 2. P. 313–318. (In Russian)

Popov Yu.I., Kovalishina S.P., Grandova M.A., Matygin A.S. Mnogoletnie izmeneniya harakteristik morskikh vod i fitoplanktona severo-zapadnogo shelfa Chernogo morya [Interannual variations of marine water and phytoplankton properties in the north-west shelf of the Black Sea] // Sovremennye rybohozaystvennye i ekologicheskiye poblemy Azovo-Chernomorskogo regiona. 20–23 june 2012. Kerch, Crimea, УДК 551.465. P. 171–178. (In Russian)

Teren'ko D.F., Nesterova L.M. Cyanoprocarionta planktona severo-zapadnoy chasti Chernogo morya (Ukraina) [Cyanoprocarionta of the plankton in the north-west part of the Black Sea (Ukraine)] // Algologia. 2015. V. 25. № 3. P. 278–296. (In Russian).

- Bracher A., Bouman H.A., Brewin R.J.W., Bricaud A., Brotas V., Ciotti A.M., Clementson L., Devred E., Di Cicco A., Dutkiewicz S., Hardman-Mountford N.J., Hickman A.E., Hieronymi M., Hirata T., Losa S.N., Mouw C.B., Organelli E., Raitso D.E., Uitz J., Vogt M., Wolanin A. Obtaining phytoplankton diversity from ocean color: a scientific roadmap for future development // *Front. Mar. Sci.* 2017. 4. 55. P. 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00055>.
- Castenholz R.W., *Phylum BX. Cyanobacteria* // *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. 2001. V. 2. P. 473–599.
- Gitelson A.A., Gao B.-C., Li R.-R., Berdnikov S., Saprygin V. Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean – the Azov Sea case study // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. P. 1–6.
- Gower J.F.R., Doerffer R., Borstad G.A. Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of uorescence, absorption and scattering, and its observation by M ERIS // *Int. J. Remote Sensing*. 1999. V. 20 № 9. P. 1771–1786.
- Groom S., Sathyendranath S., Ban Y., Bernard S., Brewin R., Brotas V., Brockmann C., Chauhan P., Choi J., Chuprin A., Ciavatta S., Cipollini P., Donlon C., Franz B., He X., Hirata T., Jackson T., Kampel M., Krasemann H., Lavender S., Pardo-Martinez S., Mélin F., Platt T., Santoleri R., Skakala J., Schaeffer B., Smith M., Steinmetz F., Valente A., Wang M. Satellite Ocean Colour: Current Status and Future Perspective // *Frontiers in Marine Science*. 2019. V. 6. P. 485.
- Huot Y., Brown C.A., Cullen J.J. New Algorithm for MODIS Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence and a Comparison with Present Data Products // *Limnology and Oceanography Methods*. 2005. V. 3. P. 108–130.
- IOCCG, 2014. Phytoplankton functional types from space. In: Sathyendranath, S. (Ed.), *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 15*, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Aleskerova A.A., Stanichny S.V. Spatio-temporal variability of cyanobacteria blooms in the North-Western shelf of the Black Sea from MODIS and Landsat satellite data // *Harmful algae*. 2021. (in press)
- Lomakin P.D. Field of the Dissolved Organic Matter Content in the Taganrog Bay (the Sea of Azov) // *Physical Oceanography*. 2018. V. 25. № 6. P. 459–471. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-6-4 59-471
- Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum ~380–700 nm of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. V. 36. № 33. P. 8710–8723.
- Randolph K., Wilson J., Tedesco L., Li L., Pascual D.L., Soyeux E. Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll-a and phycocyanin // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. P. 4009–4019.
- Ruiz-Verdú A., Simis S.G.H., de Hoyos C., Gons H.J., Peña-Martínez R. An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112 P. 3996–4008.
- Schalles J.F., Yacobi Y.Z. Remote detection and seasonal patterns of phycocyanin, carotenoid and chlorophyll pigments in eutrophic waters // *Archiv fur Hydrobiologie Special Issues Advances in Limnology*. 2000. V. 55. P. 153–168.
- Simis S., Peters S., Gons H. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water // *American Society of Limnology and Oceanography*. 2005. V. 50. № 11. P. 237–245.
- Stumpf R.P., Davis, T.W., Wynne T.T., Graham J.L., Loftin K.A., Johengen T.H., Gossiaux D., Palladino D., Burtner A. Challenges for mapping cyanotoxin patterns from remote sensing of cyanobacteria // *Harmful Algae*. 2016. V. 54. P. 160–173.
- Sun D., Hu C., Qiu Z., Shi K. Estimating phycocyanin pigment concentration in productive inland waters using Landsat measurements: A case study in Lake Dianchi // *Optics Express*. 2015. V. 23. № 3. P. 3055.
- Uitz, J., Huot, Y., Bruyant, F., Babin, M., Claustre, H. Relating phytoplankton photophysiological properties to community structure on large scales // *Limnol. Oceanogr.* 53(2), 2008. 614–630.
- Wright S.W., Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C. *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods*. UNESCO Pub. 2005. 667 p.
- Wynne T.T., Stumpf R.P., Tomlinson M.C., Warner R.A., Tester P.A., Dyle J., Fahnenstiel G.L. Relating spectral shape to cyanobacterial blooms in the Laurentian Great Lakes // *International J. Remote Sensing*. 2008. V. 29. № 12. P. 3665–3672.
- Wynne T.T., Stumpf R.P., Briggs T.O. Comparing MODIS and MERIS spectral shapes for cyanobacterial bloom detection // *International J. Remote Sensing*. 2013. P. 1–11.
- Wynne T.T., Stumpf R.P. Spatial and Temporal Patterns in the Seasonal Distribution of Toxic Cyanobacteria in Western Lake Erie from 2002–2014 // *Toxins*. 2015. V. 7. P. 1649–1663. DOI: 10.3390/toxins7051649

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала “Исследование Земли из космоса” РАН находится по адресу 117342 Москва, ул. Бултерова, 17Б, ООО “ИКЦ “Академ-книга”, 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 сопроводить 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, мето-

дике 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 (нумерация 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 вверху 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 подписанные под ними 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: заголовок статьи; © год; инициалы и фамилии всех авторов (через запятую); полное название учреждения (или учреждения города, в котором выполнялась работа, с указанием города, в котором оно находится; адрес электронной почты одного из авторов (около адреса, как и возле фамилии 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, радиояркость 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, издатель-

ство, 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, датируемых одним и тем же годом, к указываемому году следует добавлять буквы а, б, в, ... (на русском языке) или a, 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. Сликы 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.

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 mnogospetral'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 введения их в текст для информативности и целостности публикации, обязательно следует пред-

ставлять еще файлами отдельно от текста, и их качество должно позволять при печати их репродукцию 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 подрисуночные 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 подрисовочных подписях, заменяя (дополняя) их цифрами;

3.2. Цветные линии графиков желательно размечать обозначениями, цифрами или спецсимво-

лами 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