
СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2021

Использование космической информации о Земле

Анализ причин экологического происшествия на Камчатке осенью 2020 г., связанного с красным приливом, на основании космических данных

В. Г. Бондур, В. В. Замшин, О. И. Четркова, Е. Р. Матросова, В. Н. Ходаева 3

Оценка баланса взвешенных наносов в дельте р. Лена по данным дистанционного зондирования Земли

С. Р. Чалов, К. Н. Прокопьева 19

Сезонная и суточная изменчивость характеристик термического скин-слоя на основе сопоставления спутниковых измерений SEVIRI и данных термопрофилирующих буев

В. А. Рубакина, А. А. Кубряков, С. В. Станичный 30

Выявление палеосейсмодислокаций в районе Санкт-Петербурга на основе данных дистанционного зондирования

С. Н. Неволин 45

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

Информативность спектральных вегетационных индексов для оценки засоренности посевов сельскохозяйственных культур по наземным и спутниковым данным

*Т. И. Письман, М. Г. Ерунова, И. Ю. Ботвич, Д. В. Емельянов, Н. А. Кононова,
А. В. Бобровский, А. А. Крючков, А. А. Шпедт, А. П. Шевырьегов* 55

Цифровая модель Апшеронского полуострова на основе спутниковой информации

Н. Р. Джафарова, Х. Р. Исмадова 67

Влияние пространственного разрешения снимков ИСЗ на получаемые значения характеристик разрывов в ледяном покрове Арктических морей

Л. Н. Дымент, П. В. Аксенов, С. М. Лосев, В. С. Порубаев 81

Физические основы исследования Земли из космоса

Параметрические модели микроволнового излучения земных покровов в навигации летательных аппаратов

А. И. Козлов, В. П. Савиных, В. И. Троицкий 87

Краткие сообщения

Россия—США: 50 лет сотрудничества в космосе (итоги научно-технического сотрудничества с США по программе “Интеркосмос”)

Л. А. Ведешин 94

Contents

No 3, 2021

Utilization of the Earth Space Data

- Analysis of the Causes of the Kamchatka Environmental Disaster in Autumn 2020 Related with a Red Tide, Based on Satellite Data
V. G. Bondur, V. V. Zamshin, O. I. Chvertkova, E. R. Matrosova, V. N. Khodaeva 3
- Assessment Suspended Sediment Budget of the Lena River Delta Based on the Remote Sensing Dataset
S. R. Chalov, K. N. Prokop'eva 19
- Characteristics of Seasonal and Diurnal Variability of the Thermal Skin Layer Based on Comparison of Satellite Measurements of SEVIRI and Temperature-Profiling Drifters Data
V. A. Rubakina, A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny 30
- Revealing Paleoseismic Dislocations in the St. Petersburg Region Based on Remote Sensing Data
S. N. Nevolin 45
-

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

- Informative Value of Spectral Vegetation Indices for Assessment of Weediness of Agricultural Crops According to Ground-Based and Satellite Data
T. I. Pisman, M. G. Erunova, I. Yu. Botvich, D. V. Emelyanov, N. A. Kononova, A. V. Bobrovsky, A. A. Kryuchkov, A. A. Shpedt, A. P. Shevyrnogov 55
- Digital Model of the Apsheron Peninsula Based on Satellite Information
N. R. Jafarova, Kh. R. Ismatova 67
- Influence of the Spatial Resolution of Satellite Images on the Obtained Values of the Characteristics of Leads in the Ice Cover of the Arctic Seas
L. N. Dymant, P. V. Aksenov, S. M. Losev, V. S. Porubaev 81
-

Earth Research from Space Physical Ground

- Parametric Models of Microwave Radiation of the Earth's Covers in Aircraft Navigation
A. I. Kozlov, V. P. Savinykh, V. I. Troitsky 87
-

Short Communications

- Russia–USA: 50 Years of Cooperation in Space (Results of Scientific and Technical Cooperation with the USA under the Intercosmos Program)
L. A. Vedeshin 94
-
-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНАЛИЗ ПРИЧИН ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСШЕСТВИЯ НА КАМЧАТКЕ ОСЕНЬЮ 2020 Г., СВЯЗАННОГО С КРАСНЫМ ПРИЛИВОМ, НА ОСНОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

© 2021 г. В. Г. Бондур^а,*, В. В. Замшин^а, О. И. Чверткова^а, Е. Р. Матросова^а, В. Н. Ходаева^а

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

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 13.04.2021 г.

Приводятся результаты комплексных космических исследований чрезвычайной экологической ситуации у п-ва Камчатка, вызвавшей массовую гибель гидробионтов осенью 2020 г. На основании обработки и анализа долговременных рядов оптических многоспектральных оптических и радиолокационных космических изображений морской поверхности (~22 тыс. сцен), в том числе данных о температуре морской поверхности (с 1981 по 2020 г.) и концентрации хлорофилла *a* (с 2000 по 2020 г.), установлено, что в июле–сентябре 2020 г. в исследуемом районе наблюдались сильные положительные аномалии температуры (отклонения от климатической нормы достигали 6°C), которые привели к существенному изменению биогенного режима и аномальному росту концентрации хлорофилла *a* (почти в 3.5 раза) в конце сентября–начале октября 2020 г. Это являлось основной природной причиной, которая привела к развитию вредоносного цветения водорослей (красный прилив), вызвавшего гибель гидробионтов как в Авачинском заливе, так и в прибрежных акваториях всего п-ва Камчатка. На основании результатов анализа спутниковых данных показано, что возможный антропогенный вклад и вклад других природных факторов в экологическое происшествие является незначительным.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, спутниковые данные, прибрежные акватории, вредоносное цветение водорослей, красный прилив, хлорофилл *a*, Камчатка

DOI: 10.31857/S020596142103009X

ВВЕДЕНИЕ

В конце сентября–начале октября 2020 г. у тихоокеанского побережья п-ва Камчатка регистрировались случаи негативного воздействия на морские экосистемы. Фиксировались изменения органолептических свойств океанской воды, массовая гибель гидробионтов, а также ухудшение самочувствия людей, взаимодействовавших с водной средой (Бондур, Замшин, Чверткова, 2021). Наибольшее количество случаев было зафиксировано в акватории Авачинского залива.

Для выявления причин, вызвавших указанные негативные явления в прибрежных акваториях п-ва Камчатка, были проведены комплексные исследования этого экологического происшествия с использованием космических средств дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ).

Космические методы и средства ДЗЗ обладают широким спектром возможностей для исследования морских акваторий, к которым, в первую очередь, относятся (Бондур, 2010, Bondur, 2011): большая обзорность; оперативность; возмож-

ность работы в любых труднодоступных районах морей и океанов; получение информации с различным пространственным и временным разрешением в различных участках спектра электромагнитных волн; широкий спектр регистрируемых параметров водной среды и высокая достоверность получаемых данных. Методы и средства ДЗЗ обеспечивают проведение мониторинга антропогенных воздействий на акватории морей и океанов путем анализа различных аномалий на поверхности и в приповерхностном слое, регистрируемых на космических оптических и радиолокационных изображениях (Бондур, 2010; Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2012, 2017; Bondur, 2005, 2011).

Космические методы ДЗЗ перспективны для проведения исследований различных процессов и явлений, происходящих в морях и океанах, например, поверхностных проявлений внутренних волн (Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур и др., 2009), приливно-отливных явлений (Бондур и др., 2008), растворенной органики (Kopelevich et al., 2002; Pugach et al., 2018), оценки состава микро-

дорослей (Алексанин и др., 2014, 2012) и др. Эффективность методов и средств ДЗЗ существенно повышается с привлечением данных подспутниковых измерений (Bondur, 2011; Bondur, Tsidilina, 2005; Bondur, Zamshin, 2018), методов математического (Бондур и др. 2006; Bondur, 2011) и физического (Бондур и др. 2009) моделирования.

В настоящей работе приводятся результаты комплексных космических исследований экологического происшествия на Камчатке, произошедшего осенью 2020 г., и выясняются его причины.

ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в прибрежных акваториях всего п-ва Камчатка, в том числе у тихоокеанского побережья полуострова в районе Авачинского залива, протяженностью около 40 км от бухты Спасения до бухты Лиственничной, включая область Халактырского пляжа, длиной приблизительно 30 км, где впервые были выявлены основные признаки экологического происшествия (скопления погибших гидробионтов, интенсивное пенообразование и необычный цвет воды), а также поступали жалобы серферов и местных жителей на першение в горле и ожоги роговицы глаз после купания. Кроме того, исследовались также акватории у охотоморского побережья на юго-западе Камчатки, в том числе в районе поселка Озерновский Усть-Большерецкого района, где были зафиксированы локальные выбросы морских обитателей.

На рис. 1 приведена карта-схема района проведения исследований с обозначением мест регистрации негативных проявлений экологического происшествия. На этом рисунке красным цветом показаны места обнаружения скоплений погибших гидробионтов, желтым – места регистрации пенных образований и необычного цвета воды (<https://www.dvfu.ru/news/fefu>). Наибольшие последствия экологического происшествия были зарегистрированы в Авачинском заливе. Поэтому в настоящей работе данная акватория исследовалась наиболее детально.

На начальных стадиях анализа рассматривались следующие версии, объясняющие происхождение этого экологического происшествия (<https://www.dvfu.ru/news/fefu>):

А) техногенные: утечки ракетного топлива (полигон Родыгино); утечки с Козельского полигона ядохимикатов через р. Налычева и ее притоки; разливы нефтепродуктов; сброс льяльных вод.

Б) природные: вулканическая активность (в т.ч. подводная); сейсмическая активность; цветение токсичных микроводорослей; недостаток

растворенного кислорода в морской воде (гипоксия).

Кроме этого, возможными источниками антропогенных воздействий являются мелиоративные каналы осушительной системы, расположенной вблизи Халактырского пляжа, в которые сбрасываются неочищенные сточные воды. Они могут содержать бактерии группы кишечной палочки и тяжелые металлы в количествах, превышающих предельно-допустимые нормы. Стоки транспортируются по мелиоративным каналам осушительной системы, а затем попадают в морские акватории и могут нести потенциальную угрозу заражения всей близлежащей экосистемы (<https://kamchatinfo.com/news/ecology/detail/21528/>).

Еще одним возможным источником антропогенного воздействия на прибрежную акваторию в районе Халактырского пляжа является добыча строительного песка и освоения титаномагнетитового месторождения (<https://kamchatinfo.com/news/society/detail/32620/>).

На первых этапах анализа техногенные версии рассматривались в качестве основных. Однако по результатам анализов проб воды, измерений радиационного фона, а также исследований образцов донных осадков и гидробионтов значимых превышений предельно допустимых концентраций вредоносных веществ зафиксировано не было. В связи с этим, а также принимая во внимание рассредоточенность мест регистрации негативных последствий происшествия на сотни км вдоль береговой линии (см. рис. 1), версии о ряде техногенных причин возникновения экологического происшествия утратили приоритет. Особенности проведения полевых работ подробно рассмотрены в устном докладе ДВФУ (<https://www.dvfu.ru/news/fefu>).

Среди версий блока “Б” (природные причины) не нашедшими подтверждений оказались предположения о влиянии вулканической и сейсмической активности. Это связано с тем, что вулканы Ключевской, Безымянный, Шивелуч, находятся на расстоянии 300–400 км от мест регистрации негативных последствий экологического происшествия и не могли спровоцировать гибель гидробионтов.

Исходя из данных службы срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (<http://www.gs-ras.ru/new/ssd.htm>) и онлайн-каталога землетрясений USGS “Геологическая служба США” (<https://earthquake.usgs.gov/>), в период с 10 сентября по 31 октября 2020 г. включительно вблизи исследуемого региона было обнаружено 7 сейсмических событий с магнитудами от 3.9 до 4.5 и средними глубинами проявления в диапазоне от 54 до 119 км. Такие сейсмические события не мог-



Рис. 1. Карта-схема района исследования с обозначением мест регистрации негативных индикаторов экологического происшествия (красным показаны места обнаружения скопления погибших гидробионтов, желтым – места регистрации пенных образований и необычного цвета воды).

ли вызвать экологическое происшествие на Камчатке.

Поэтому дальнейшие исследования были посвящены анализу других возможных причин этого аномального события.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнялись путем сбора, систематизации, обработки и анализа значительного объема разнородных спутниковых данных, в

том числе оптических многоспектральных и радиолокационных космических изображений морской поверхности, информационных продуктов спутниковых сканеров цвета и других данных. В общей сложности были проанализированы 21954 сцены, сформированные на основе результатов космической съемки. Глубина ретроспективы анализируемых данных о температуре морской поверхности составила ~40 лет (с 1981 по 2000 г.), а о концентрации хлорофилла a ~20 лет (с 2000 по 2020 г.),

Для оценки возможного влияния антропогенных факторов на возникновение происшествия с использованием космических радиолокационных изображений (далее – РЛИ), полученных со спутников Sentinel-1A/B (<https://sentinels.copernicus.eu>), были изучены пленочные загрязнения в акватории Авачинского залива и экологическая обстановка в устье р. Налычева.

Благодаря резонансному механизму рассеяния радиоволн взволнованной водной поверхностью с помощью космических РЛИ возможно осуществлять мониторинг пленочных образований, в том числе антропогенного происхождения, таких как судовые разливы, синтетические поверхностно-активные вещества (далее – ПАВ), бытовые и промышленные стоки, утечки при разработке морских месторождений и др. (Бондур, 2010; Бондур, Гребенюк, 2001).

Основной сложностью регистрации антропогенных пленочных образований по РЛИ является их распознавание на фоне других сликообразующих процессов, в частности, на фоне пленочных образований естественного происхождения, таких как выходы нефти со дна моря, биогенные ПАВ и др. (Бондур, 2010; Бондур, Гребенюк, 2001).

Для повышения достоверности дешифрирования антропогенных пленочных образований по космическим РЛИ и обеспечения возможности проведения комплексного анализа разнородной информации был разработан специализированный геоинформационный проект, содержащий полученные космические изображения, географические особенности района, метеорологическую информацию и другие данные (Bondur, Zamshin, 2018).

При попадании речного стока в море, в том числе стока р. Налычева, образуются прилегающие к устью мезомасштабные структуры – “плюмы”. Они обладают пониженной соленостью, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворенной органики, а также повышенной или пониженной (в зависимости от сезона) температурой (Завьялов и др., 2014; Nogner-Devine et al., 2015). От образовавшихся естественным образом “плюмов” распространяются шлейфы распресненных вод, которые хорошо регистрируются на космических многоспектральных изображениях, по-

лученных в видимом и ИК-диапазонах спектра электромагнитных волн (Бондур, Зубков, 2005; Иванов и др., 2018).

Для изучения экологической обстановки в устье р. Налычева использовались космические оптические многоспектральные данные, полученные со спутников Sentinel-2A/B (<https://sentinels.copernicus.eu>) и Landsat-8 (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview>).

При анализе версии о природном происхождении экологического происшествия оценивалась интенсивность цветения фитопланктона на основании исследования изменчивости концентраций хлорофилла a , измеренных по спутниковым данным. Оценка изменчивости концентраций хлорофилла a в акватории Авачинского залива (где в результате береговых наблюдений регистрировались наиболее интенсивные негативные последствия происшествия) выполнялась путем анализа двух типов информационных продуктов, а именно:

1. Временной серии карт пространственных распределений концентрации хлорофилла a в исследуемой акватории в период времени сентябрь–октябрь 2020 г., полученных по данным многоспектральной аппаратуры VIIRS спутников NOAA (NASA GSFC, 2021a). В общей сложности анализировалось 45 сцен.

2. Среднемесячных значений концентраций хлорофилла a (NASA GSFC, 2021b) в акватории Авачинского залива, полученных путем обработки 7269 сцен, снятых спектрорадиометрами MODIS спутников Aqua/Terra за период времени с мая по октябрь с 2000 по 2020 г. Они рассчитывались с использованием комбинаций алгоритмов “CI” (Hu et al, 2012) и “OCx” (O’Reilly et al., 2000).

Алгоритм CI основан на вычислении спектрального индекса, использует измеренные из космоса значения спектральной отражательной способности морской поверхности в синем, зеленом и красном каналах ($R_{rs}(\lambda_{blue})$, $R_{rs}(\lambda_{green})$, $R_{rs}(\lambda_{red})$) и применяется для вычисления концентраций хлорофилла a $chlor_{aCI} < 0.15$ мг/м³ (Hu et al., 2012; NASA GSFC, 2021a):

$$chlor_{aCI} = R_{rs}(\lambda_{green}) - \left[R_{rs}(\lambda_{blue}) + \frac{\lambda_{green} - \lambda_{blue}}{\lambda_{red} - \lambda_{blue}} (R_{rs}(\lambda_{red}) - R_{rs}(\lambda_{blue})) \right]. \quad (1)$$

Алгоритм OCx основан на полиномиальной функции и применяется для вычисления концентраций хлорофилла a при условии $chlor_{aCI} > 0.20$ мг/м³ (O’Reilly et al., 2000; NASA GSFC, 2021b):

$$\log_{10}(chlor_{a_{OCx}}) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \left(\log_{10} \left(\frac{Rrs(\lambda_{blue})}{Rrs(\lambda_{green})} \right) \right)^i, \quad (2)$$

где коэффициенты a_0 – a_4 являются уникальными для разных сканеров цвета (для MODIS $a_0 = 0.2424$, $a_1 = -2.7423$, $a_2 = 1.8017$, $a_3 = 0.0015$, $a_4 = 1.2280$).

В диапазоне значений концентраций хлорофилла a $0.15 \text{ мг/м}^3 < chlor_{a_{CI}} < 0.20 \text{ мг/м}^3$ алгоритмы CI и OCx смешиваются с использованием весового подхода, что обеспечивает плавность перехода от одной модели к другой (NASA GSFC, 2021б).

В нашем исследовании при обработке среднемесячных информационных продуктов данные о пространственном распределении хлорофилла ($chlor_a$) усреднялись по площади Авачинского залива. Кроме того, для каждого месяца анализируемого периода проведения исследований вычислялись среднее значение и стандартное отклонение (σ) концентрации хлорофилла a за 20 лет (с 2000 по 2019 г.), предшествующих изучаемому событию:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}, \quad (3)$$

где \bar{x} – выборочное среднее значение, а n – размер выборки.

При проведении исследований анализировались также данные о температуре морской поверхности в Авачинском заливе, так как повышение температуры морской воды может приводить к увеличению биомассы микроводорослей (Суханова, Флинт, 1998).

Оценка влияния температуры морской поверхности на интенсивное цветение водорослей в Авачинском заливе осуществлялась на основании анализа временного ряда 14002 пространственных распределений суточных значений оптимизированной интерполяционной температуры морской поверхности NOAA OISST, полученных в период с 1981 по 2020 г. (Reynolds, Vanzon, 2008). Кроме того, к исследованию привлекались ежесуточные информационные продукты о температуре морской поверхности, полученные в период времени июнь–июль с 2002 по 2020 г. с помощью спектрорадиометров MODIS спутника AQUA. При проведении исследований анализировалось 598 сцен, полученных с борта этого спутника.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Исследование пленочных образований

В процессе исследования пленочных образований было обработано 12 сцен космических РЛИ, полученных с борта спутников Sentinel-1A/B в период времени с 25 августа по 5 октября 2020 г. Использовались продукты первого и второго уровня обработки, включая данные о характеристиках приповерхностного ветра (Sentinel-1-OCN, 11 сцен). На 2-х РЛИ были обнаружены судовые разливы, на 11-ти РЛИ – пленки ПАВ, примеры которых иллюстрируются на рис. 2. Выявленные пленочные образования анализировались с целью оценки возможного вклада этих явлений в сложившуюся экологическую ситуацию.

На космических РЛИ, полученных 11 и 23 сентября 2020 г., были обнаружены судовые разливы. При этом разлив, обнаруженный 11 сентября 2020 г. (маркер “6” на рис. 2), имел площадь 0.5 км^2 , а разлив, обнаруженный 23 сентября 2020 г. (маркер “9а” на рис. 2), имел площадь 1.8 км^2 . Удаленность от Халактырского пляжа судового разлива, обнаруженного 23 сентября 2020 г., составила $\sim 10 \text{ км}$, а удаленность от этого пляжа судового разлива, обнаруженного 11 сентября 2020 г., составила $\sim 9 \text{ км}$.

Судовые разливы обычно обусловлены проведением штатных операций во время судоходства, например такими как мойка танков, сбросы балластных вод, танкерных моечных и льяльных вод и т.д. При этом в водную среду поступают нефтепродукты, горюче-смазочные и другие загрязняющие вещества, образующие пленки на поверхности моря (Иванов и др., 2013).

Параметры обнаруженных в Авачинском заливе судовых разливов были сопоставлены со статистическими сведениями о 873-х судовых разливах, зарегистрированных ранее при выполнении космических исследований прибрежных акваторий (Bondur, Zamshin, 2018; Замшин, Воробьев, 2020) и содержащихся в базе данных НИИ “АЭРОКОСМОС” (Bondur, Zamshin, 2018). В процессе такого сопоставления было установлено, что размер разлива, выявленного 11 сентября 2020 г. (маркер “6” на рис. 2), можно охарактеризовать как “средний”, имеющий площадь около 0.5 км^2 , а размер судового разлива, выявленного 23 сентября 2020 г. (маркер “9а” на рис. 2), может быть охарактеризован как “относительно крупный”, имеющий площадь более 1.8 км^2 .

Из анализа рис. 2 можно видеть, что в результате мониторинга Авачинского залива было зарегистрировано множество случаев выявления пленок ПАВ (зеленые маркеры). При этом в 4-х случаях (маркеры “4”, “8а”, “1а” и “7” на рис. 2) пленки ПАВ были зарегистрированы в Авачин-

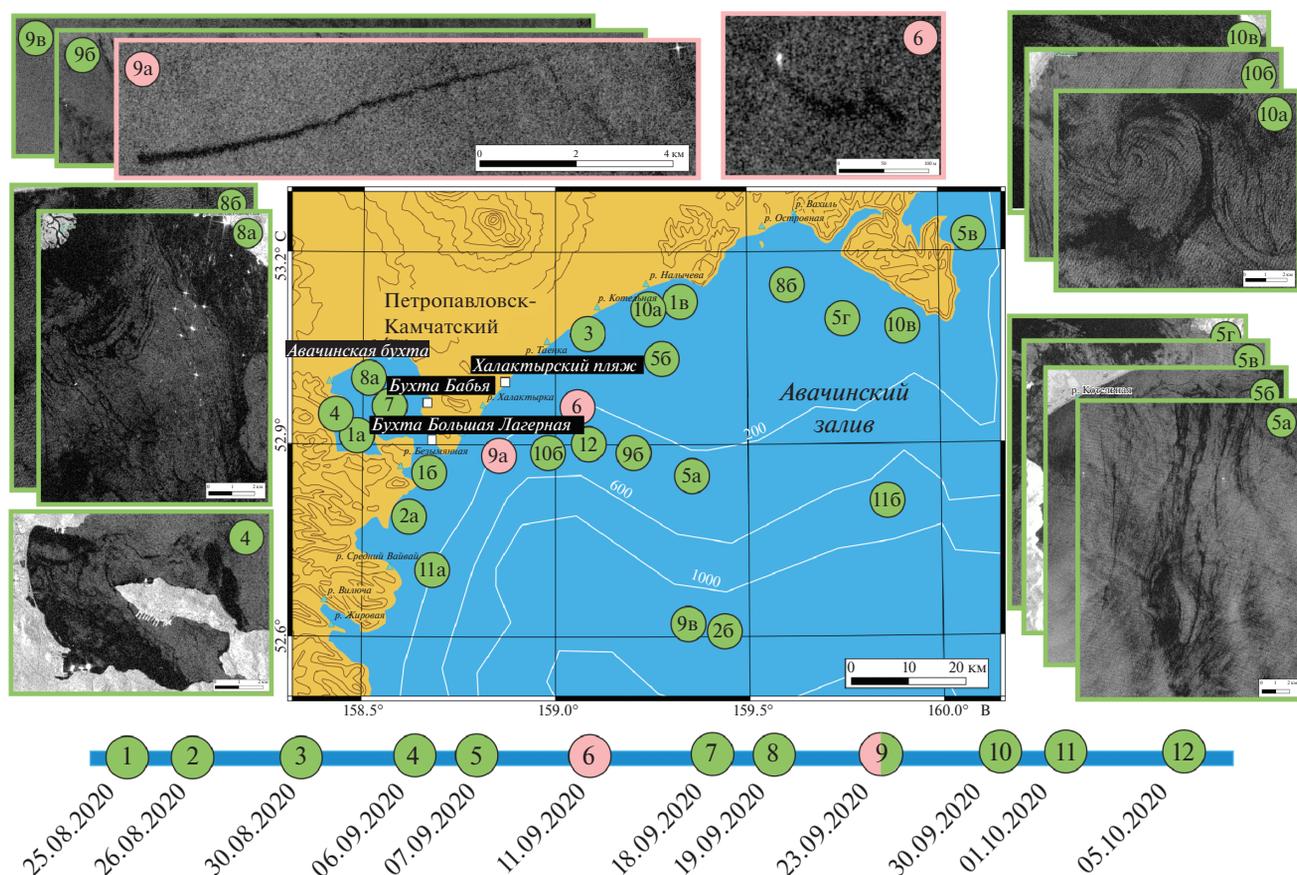


Рис. 2. Результаты дешифрирования космических радиолокационных изображений Авачинского залива и Авачинской бухты, полученных со спутников Sentinel-1A/B в период с 25 августа по 5 октября 2020 г. Места обнаружения пленочных образований показаны кругами с нумерацией (судовые разливы показаны розовым цветом, пленки ПАВ естественного и антропогенного происхождения показаны зеленым цветом).

ской бухте (25 августа 2020 г., 6, 18 и 19 сентября 2020 г.). Исходя из географического положения, эти ПАВ могут быть обусловлены, в том числе, антропогенными факторами, так как в Авачинскую бухту осуществляется сброс хозяйственно-бытовых сточных вод, которые могут быть причиной распространения здесь пленочных загрязнений, в том числе сформированных синтетическими ПАВ (http://greenpatrol.ru/sites/default/files/doklad_ob_ekologicheskoy_situacii_v_kamchastkom_krae_2014.pdf). Эти антропогенные загрязнения носят локальный характер и расположены в бухте, удаленной от мест регистрации негативных индикаторов экологического происхождения. Поэтому они не могут быть его причиной.

Следует отметить, что высокая антропогенная нагрузка характерна для большинства прибрежных акваторий морей и океанов, где высока плотность населения и интенсивность хозяйственной деятельности (Бондур, Гребенюк, 2001; Bondur, 2005, 2011).

В отличие от судовых разливов и антропогенных пленочных загрязнений, сосредоточенных в

околобереговой зоне акватории, биогенные ПАВ зарегистрированы на более обширных пространствах. Сликотворные образования, обладающие дешифровочными признаками биогенных ПАВ, обнаруживались на участках, отмеченных на рис. 2 маркерами "16", "1в", "2а", "2б", "3", "5а", "5б", "5в", "5г", "8б", "9б", "9в", "10а", "10б", "10в", "11а", "11б" и "12". Биогенные ПАВ образуются в результате жизнедеятельности водорослей, бактерий и других организмов. Ниже будет показано, что в Авачинском заливе в период развития экологического происшествия зарегистрированы аномально высокие концентрации хлорофилла *a*, что согласуется с результатами обнаружения на РЛИ многочисленных ПАВ биогенного происхождения.

В результате анализа космических РЛИ было установлено, что район исследований в период развития экологического происшествия подвергался как незначительному локальному антропогенному, так и интенсивному естественному негативному воздействию. Выявленные на основании анализа прямых и косвенных дешифровоч-

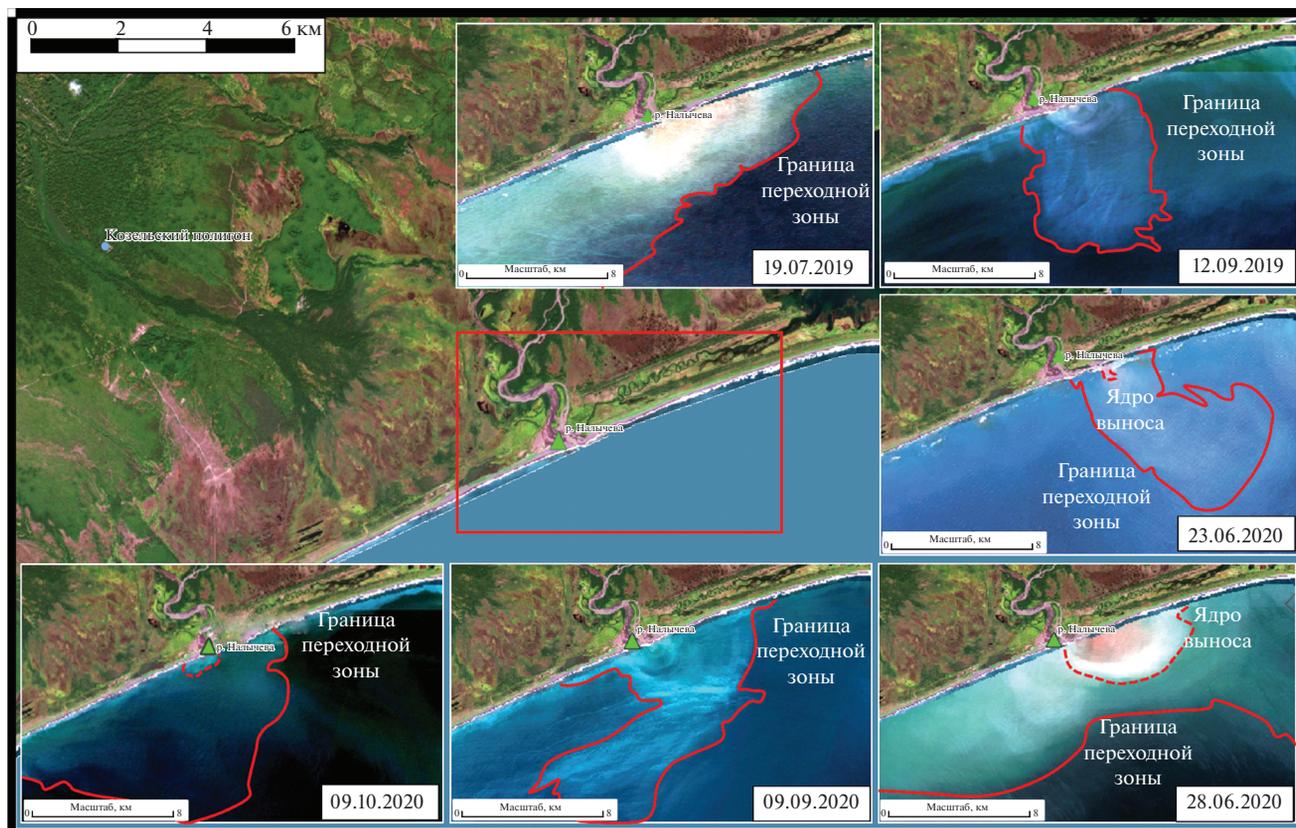


Рис. 3. Примеры регистрации оптических неоднородностей, связанных с поступлением стока р. Нальчева в Авачинский залив. Космические оптические многоспектральные изображения получены со спутников Sentinel-2A/B. Выделены элементы “плюмов” (ядро и граница переходной зоны).

ных признаков антропогенные воздействия были выражены в 2-х локальных судовых разливах, а также в 4-х пленочных образованиях, отнесенных к синтетическим ПАВ. Сопоставительный анализ зарегистрированных особенностей с результатами ранее выполненных работ, посвященных космическому мониторингу прибрежных акваторий (Бондур, 2010; Бондур и др. 2012, 2017; Бондур, Гребенюк, 2001; Bondur, Zamshin, 2018), показал, что уровень интенсивности антропогенных воздействий может быть оценен как нормальный или средний.

При этом обращает на себя внимание масштабный характер биогенных ПАВ, зарегистрированных в Авачинском заливе (большинство зеленых маркеров на рис. 2). Это свидетельствует в пользу гипотезы о естественных причинах возникновения экологического происшествия.

Исследование стока р. Нальчева

В качестве одной из версий возникновения рассматриваемого экологического происшествия в Авачинском заливе, повлекшего изменение свойств водной среды и гибель гидробионтов,

рассматривалось привнесение в залив ядовитых веществ с речным стоком р. Нальчева. Предполагалось, что вещества могли поступать из захоронений Козельского полигона.

В настоящем исследовании для оценки изменчивости выноса р. Нальчева использовались данные оптического многоспектрального сенсора MSI спутников Sentinel-2A/B и оптического многоспектрального сенсора OLI спутника Landsat-8. В процессе проведения исследований анализировалось 17 сцен, полученных с борта этих спутников. Наибольший интерес представляли 6 безоблачных космических изображений, полученных со спутников Sentinel-2A/B: 3 изображения за 2019 г. и 3 изображения за 2020 г.

В ходе обработки этих космических изображений были выделены границы зон (ядро, переходная зона) речного “плюма” (Иванов и др., 2018). На рис. 3 выделенные границы ядра и переходной зоны “плюма” показаны на фоне обработанных космических изображений, представленных в натуральных цветах.

Анализ космических оптических изображений, приведенных на рис. 3, показывает, что размеры и форма “плюма” р. Нальчева, зарегистри-

рованного в разные даты (в том числе в 2019 и 2020 гг.) в целом схожи и стабильны. “Плюм” распространялся преимущественно на юго-запад, размер ядра иногда превышал 5 км, протяженность границы переходной зоны могла достигать десятков км.

Наиболее яркие контрасты, свидетельствующие о существенном отличии свойств выносимых рекой вод от вод залива, наблюдались в июле 2019 г. и июне 2020 г., что может быть обусловлено половодьем или сезонными осадками.

Анализ полученных результатов показал, что речной “плюм”, зарегистрированный в дату, близкую к времени экологического происшествия (9 сентября 2020 г.), не может быть охарактеризован как аномальный, поскольку контрасты в нем незначительны, размер — средний (см. рис. 3). Формы и элементы стока р. Нальчева типичны для такого вида явлений (Иванов и др., 2018).

*Исследование концентрации хлорофилла *a**

Важным биотическим элементом приповерхностного слоя океана является фитопланктон, к разновидностям которого относятся многочисленные одноклеточные водоросли. Эти водоросли восприимчивы к изменениям параметров водной среды, в связи с чем под воздействием природных и антропогенных факторов в морских экосистемах могут формироваться благоприятные условия для их интенсивного развития и существенного увеличения объемов биомассы (Алексанин и др., 2014). Размножение фитопланктона может повлечь за собой феномен вредоносного цветения водорослей (далее — ВЦВ), в некоторых случаях образующего так называемые “красные приливы” — скопления токсичных микроводорослей, негативно влияющих на морские организмы и свойства морской среды. Последствиями красных приливов являются неблагоприятные изменения водного режима, ухудшение кислородных условий водоема, отравление организмов токсинами (Орлова, 2005; Burkholder, 1998; Paerl, Huisman, 2009). Оседающая после цветения масса органического вещества разлагается в придонном слое, изымая из воды растворенный кислород и тем самым снижая его содержание, а также выделяет токсины. Случай ВЦВ и, в частности, красных приливов время от времени регистрируются в различных морях и регионах Мирового океана, в том числе и в акваториях дальневосточных морей России (Орлова, 2005; Anderson, 1989).

Контроль развития микроводорослей можно осуществлять путем оценки концентрации хлорофилла *a*, определяемой по данным спутниковых сканеров цвета (Левин и др., 2007; Kopelevich et al., 2002). Хлорофилл *a* является основным пиг-

ментом зеленых растений, в том числе морского фитопланктона, благодаря которому реализуются процессы фотосинтеза. Информация о концентрации хлорофилла *a* служит инструментом для оценки запасов биомассы фитопланктона и его продукции, а также индикатором загрязнения вод. Увеличение концентрации хлорофилла *a* свидетельствует о наличии в акватории значительных объемов биомассы фитопланктона (Левин, 2007).

В настоящей работе для исследования изменчивости концентрации хлорофилла *a* анализировалась выборка из 45-ти сцен, сформированных по данным аппаратуры VIIRS спутников NOAA (NASA GSFC, 2021a) в сентябре–октябре 2020 г., а также 7269 сцен, сформированных по данным аппаратуры MODIS спутников Aqua/Terra за период времени с мая по октябрь с 2000 по 2020 гг. (NASA GSFC, 2021b).

Представительный временной ряд из 16-ти суточных пространственных распределений концентрации хлорофилла *a* (в относительных единицах) в сентябре–октябре 2020 г., полученный по данным аппаратуры VIIRS, приведен на рис. 4, а.

На рис. 4, б приведены графики, характеризующие среднемесячные значения концентраций хлорофилла *a*, измеренных аппаратурой MODIS с мая по октябрь 2020 г. (красная линия), а также с мая по октябрь за период времени с 2000 по 2019 г. (синяя линия — средние значения, а пунктирные линии — стандартное отклонение), характеризующие климатическую норму. Методика получения информационных продуктов кратко рассмотрена выше (см., в том числе, формулы (1)–(3)).

Анализ данных, представленных на рис. 4, а, позволил выявить резкое увеличение концентрации хлорофилла *a*, произошедшее 24 сентября 2020 г. практически на всей площади залива, по сравнению с предыдущими днями (с 4 по 21 сентября 2020 г.). Высокий уровень концентрации хлорофилла *a* в данной акватории наблюдался и в последующие дни, с максимумом 1 октября 2020 г. (см. рис. 4, а). По сравнению с фоновыми значениями, например 4 сентября 2020 г. (см. рис. 4, а), концентрация хлорофилла *a*, измеренная 1 октября 2020 г. выросла приблизительно на порядок с 0.1 до 1.0 усл. ед. и более.

Из анализа рис. 4, б следует, что значения среднемесячных концентраций хлорофилла *a* в сентябре–октябре 2020 г. значительно (более чем в 3.5 раза) превышали среднее значение концентраций хлорофилла *a* в эти же месяцы, осредненные за предшествующие 20 лет (климатическая норма).

При этом следует учитывать, что спутниковые информационные продукты о концентрации хлорофилла *a*, рассчитанные на основе глобальных алгоритмов, необходимо анализировать с учетом,

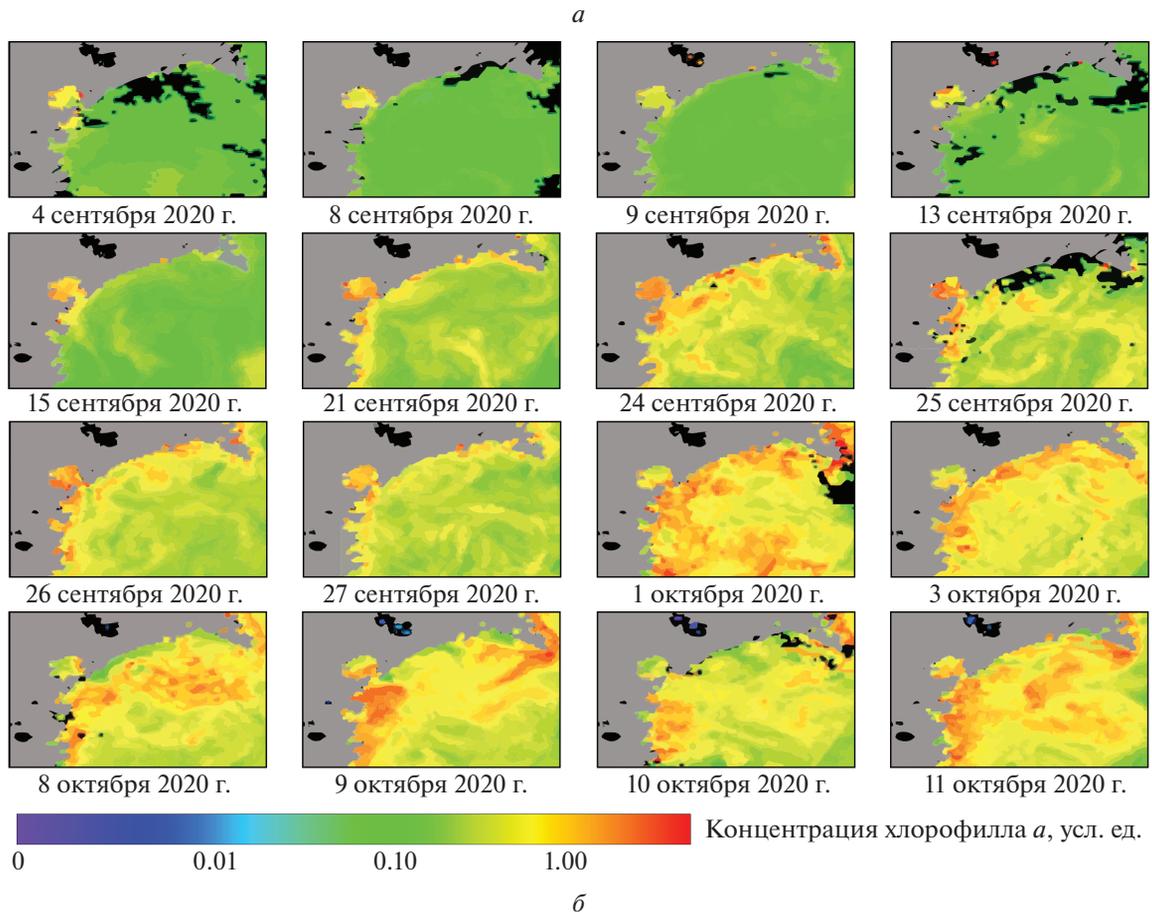


Рис. 4. Информационные продукты, сформированные в ходе оценки интенсивности цветения фитопланктона в Авачинском заливе: *a* – суточные пространственные распределения концентрации хлорофилла *a* (в относительных единицах) в сентябре–октябре 2020 г., полученные на основании обработки данных аппаратуры VIIRS спутников NOAA; *b* – графики, характеризующие среднемесячные значения концентраций хлорофилла *a* с мая по октябрь 2020 г. (красная линия), а также с мая по октябрь, усредненные за период времени с 2000 по 2019 г. (синяя линия – средние значения, пунктирные линии – стандартное отклонение), характеризующие климатическую норму (получены на основании обработки данных MODIS (спутники AQUA и TERRA)).

в том числе, региональных особенностей исследуемой акватории и атмосферных условий (Kopelevich et al., 2002; Алексанин и др., 2012, 2014). Однако беспрецедентно высокие измеренные значения хлорофилла *a*, полученные в настоящем исследовании для октября 2020 г., свидетельствуют о существенных изменениях оптических свойств приповерхностного слоя морской среды, обусловленных биологическими факторами. Возможное влияние атмосферных явлений и региональной специфики оптических характеристик вод на точность полученных данных в значительной степени компенсируется использованием накопленных осредненных ежемесячных значений концентраций хлорофилла *a* за 2020 г. и их сопоставлением с ежемесячными значениями концентраций хлорофилла *a*, осредненными за 20-летний период (2000–2019 гг.).

Зарегистрированный в настоящей работе резкий и аномально высокий рост концентрации хлорофилла *a* в Авачинском заливе свидетельствует о том, что в его акватории происходило интенсивное цветение микроводорослей. Это соответствует сведениям, внесенным в международную базу данных ВЦВ HAEDAT (<http://haedat.iode.org>). В этой базе данных представлены основные характеристики водорослей, обнаруженных в пробах воды в районе экологического происшествия. Отражены 3 информационных листа (4, 12 и 13 октября 2020 г.), согласно которым характер вредоносного цветения проявился в изменении цвета воды, массовой смертности гидробионтов, образовании пены/слизи на побережье. Во всех пробах была выявлена высокая концентрация токсических веществ, относящихся к яду, вызывающему отравление типа DSP (diarrhetic shellfish poisoning). Основными возбудителями таких отравляющих веществ являются водоросли динофлагелляты вида *Karenia*. Концентрация вредоносных водорослей, по данным информационных листов HAEDAT (<http://haedat.iode.org>), увеличивалась с 152000 кл/л (4 октября 2020 г.) до 482208 кл/л (12 октября 2020 г.) и до 622000 кл/л (13 октября 2020 г.).

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРИЧИН И МАСШТАБОВ ПРОИСШЕСТВИЯ

Для установления возможных причин аномального роста концентрации хлорофилла *a* (развития фитопланктона), а следовательно, и вредоносного цветения водорослей, вызвавшего массовую гибель гидробионтов, были проанализированы данные о температуре морской поверхности в Авачинском заливе, а также вдоль всего побережья п-ва Камчатка.

Обобщенные результаты этих исследований представлены на рис. 5, 6.

На рис. 5. приведен график (синяя линия) осредненных за 1981–2020 гг. суточных значений температуры морской поверхности в исследуемой акватории, построенный на основе продукта NOAA OISST (соответствует климатической норме), а также диапазон стандартных отклонений температуры (пунктирные линии). На этом рисунке приведен также график ежедневных значений температуры морской поверхности в Авачинском заливе в 2020 г. (красная линия).

На карте (врезка *a*), приведенной на рис. 5 (слева вверху), представлено пространственное распределение накопленных средних значений температуры морской поверхности у восточного побережья Камчатки в периоды сильных положительных отклонений температуры от климатической нормы (с 22 июня по 9 августа 2020 г., данные MODIS Aqua/Terra). На фрагменте карты (врезка *б*), представленной на рис. 5 (справа внизу), приведено пространственное распределение отклонений от климатической нормы накопленных средних значений температуры морской поверхности в Авачинском заливе в период времени с 22 июня по 9 августа 2020 г.

Из анализа данных, приведенных на рис. 5, следует, что с 22 июня по 12 июля и с 15 июля по 8 августа 2020 г. фиксировались существенные аномальные превышения (достигающие 6°C) температуры морской поверхности в Авачинском заливе и окружающих его акваториях по сравнению со средними многолетними значениями и стандартным отклонением температуры для этих месяцев. Это свидетельствует о том, что именно аномально высокие температуры водной среды, зарегистрированные летом 2020 г., явились наиболее значимым фактором, повлиявшим на развитие экологического происшествия, связанного с красным приливом, в результате которого произошла массовая гибель гидробионтов.

Для оценки масштабов происшествия исследовались данные о пространственных распределениях усредненных значений температуры морской поверхности в июле 2020 г. и концентрации хлорофилла *a* в сентябре 2020 г. для прибрежных акваторий всего п-ва Камчатка, которые сопоставлялись с аналогичными данными в анализируемые месяцы 2019 г. Результаты сопоставления приведены на рис. 6 для июля 2019 (*a*) и 2020 (*б*) гг., а также для сентября 2019 (*в*) и 2020 (*г*) гг.

По итогам анализа сформированных карт (см. рис. 6, *в*, *г*) установлено, что в сентябре 2020 г. повышенные значения концентраций хлорофилла *a* фиксировались не только в Авачинском заливе, но и практически вдоль всей береговой линии п-ва Камчатка.

Этому предшествовали положительные температурные аномалии, зафиксированные в летние месяцы 2020 г. также на значительной части пло-

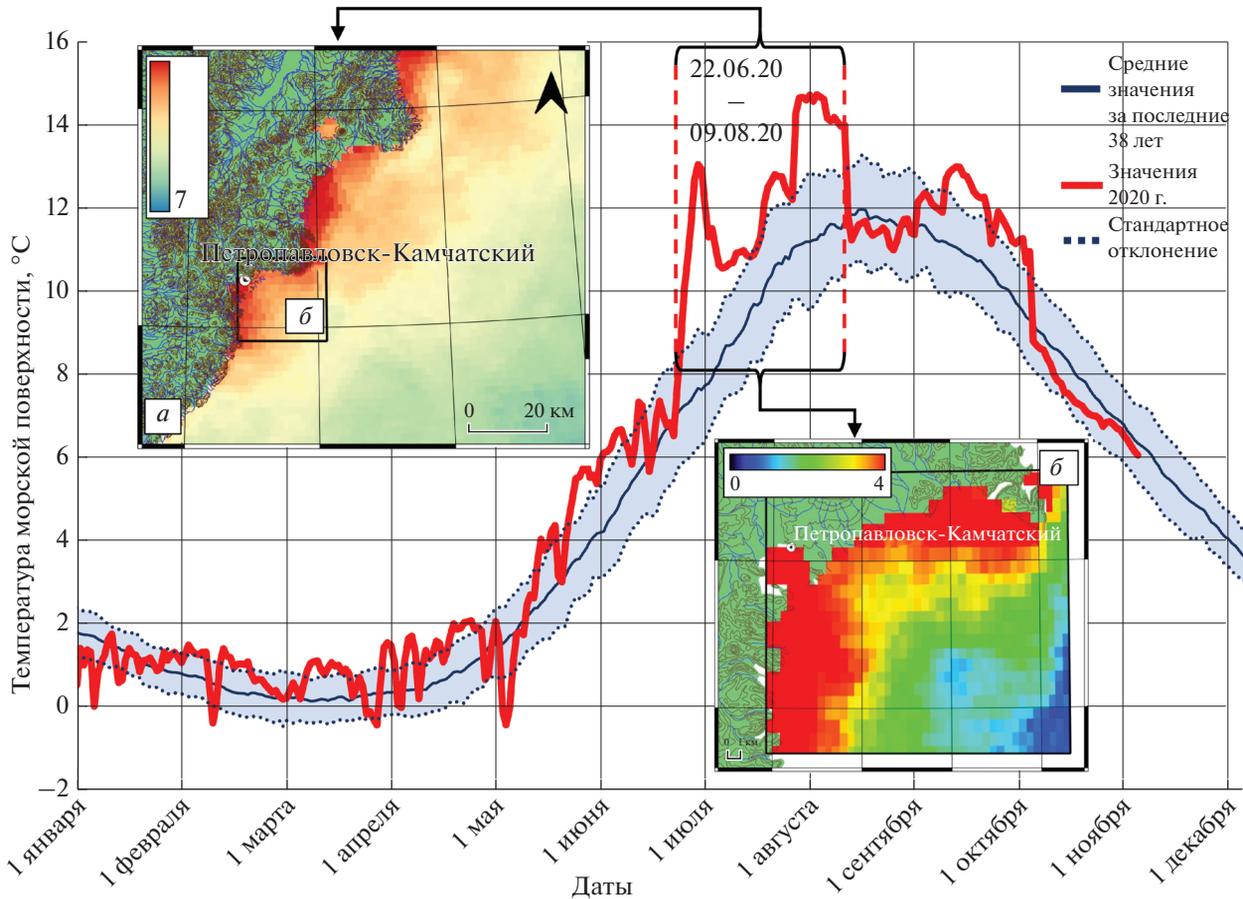


Рис. 5. Графики осредненных за 1981–2020 гг. суточных значений температуры морской поверхности в Авачинском заливе (на основе продукта NOAA OISST) – климатическая норма (синяя линия), диапазон стандартных отклонений (пунктирные линии), а также температуры морской поверхности в этом заливе для различных дней 2020 г. (красная линия). На врезке *a* – пространственные распределения накопленных средних значений температуры морской поверхности у восточного побережья Камчатки в периоды сильных отклонений от климатической нормы (с 22 июня по 9 августа 2020 г., данные MODIS Aqua/Terra). На врезке *б* – отклонения накопленных средних значений температуры от климатической нормы в Авачинском заливе. Все значения приведены в °С.

щадей прибрежных акваторий всего п-ва Камчатка (рис. 6, *a*, *б*, и 5, *a*).

Исходя из полученных результатов, следует, что экологическое происшествие характеризуется масштабами, значительно превышающими размеры Авачинского залива. Это согласуется с данными о регистрации скоплений погибших гидробионтов в различных точках побережья Камчатки (см. рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием ~22 тыс. сцен, сформированных на основе разнородных спутниковых данных, выполнен комплексный космический мониторинг чрезвычайной экологической ситуации, произошедшей осенью 2020 г. в прибрежных акваториях п-ва Камчатка, в том числе в акватории Авачинского залива, результаты которого

позволили проанализировать антропогенные и природные факторы, способные вызвать это негативное событие.

В период развития происшествия в Авачинском заливе по космическим данным выявлены незначительные локальные антропогенные аномалии, связанные с пленками поверхностно-активных веществ, а также двумя судовыми разливами, площади которых составляли 0.5 и 1.8 км² и находились на расстояниях 9–10 км от берега. Эти аномалии, а также выявленные в Авачинской бухте загрязнения, обусловленные хозяйственно-бытовыми стоками, не могли оказать существенного влияния на экологическую ситуацию в прибрежной акватории в районе Халактырского пляжа, ввиду их локального характера и удаленности от места событий.

На основании результатов исследований стока р. Налычева, выполненных по многоспектраль-

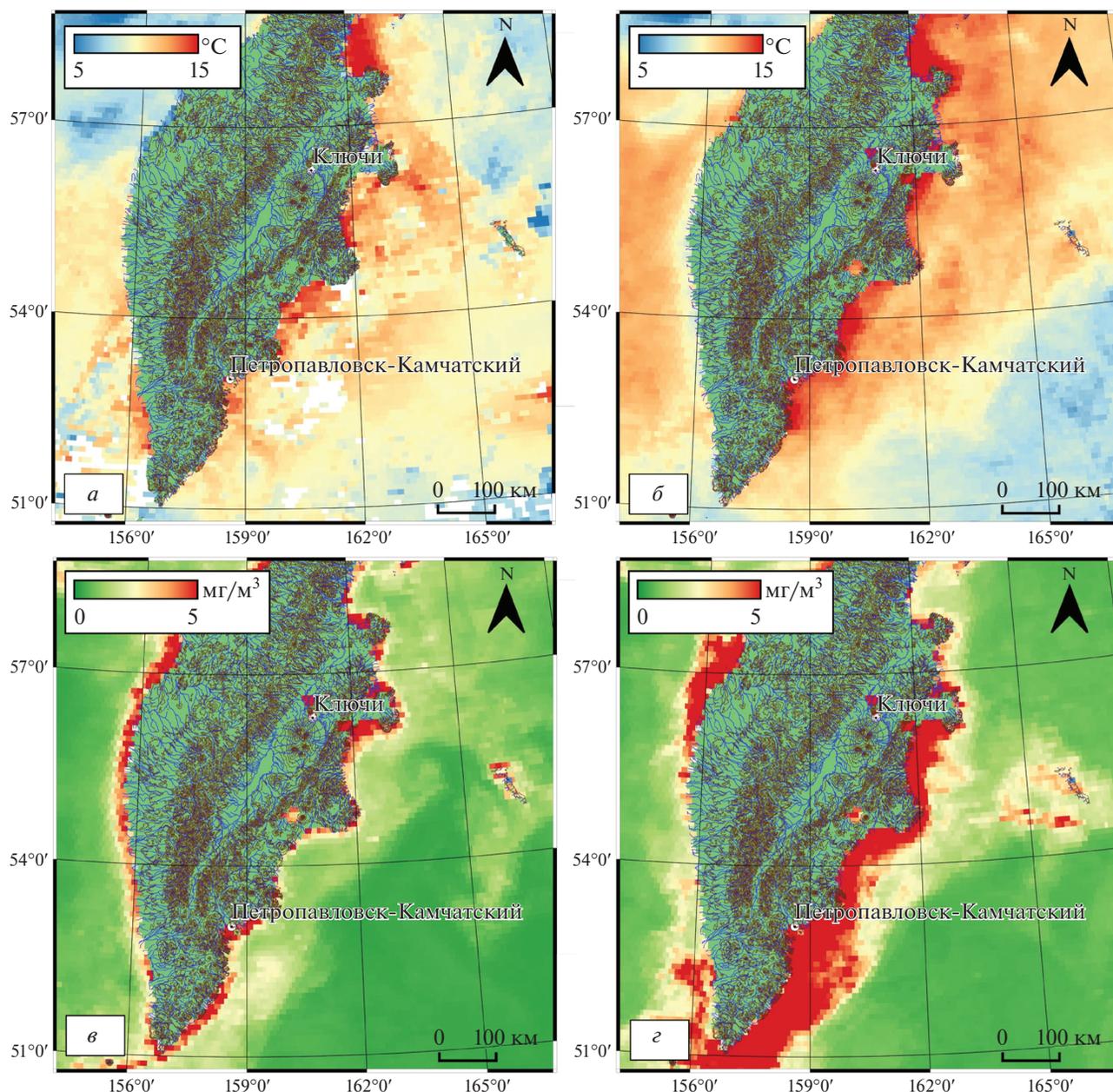


Рис. 6. Пространственные распределения усредненных значений температуры морской поверхности в июле 2019 (а) и 2020 (б) гг. и пространственные распределения значений концентрации хлорофилла *a* в сентябре 2019 (в) и 2020 (г) гг.

ным космическим данным, показано, что его оптические и пространственно-геометрические характеристики были стабильными в течение 2019–2020 гг. Исследованный речной вынос не являлся источником антропогенных воздействий и не оказывал существенного влияния на экологическое состояние Авачинского залива.

Таким образом, результаты исследований, проведенных на основании спутниковых и других данных, показали, что антропогенные факторы не могли являться причиной возникновения эко-

логического происшествия на Камчатке осенью 2020 г.

С использованием долговременных рядов спутниковых данных о концентрации хлорофилла *a* (с 2000 по 2020 г.) и температуре морской поверхности (с 1981 по 2020 г.) установлено, что в исследуемом районе в конце сентября–начале октября 2020 г. наблюдался аномальный (по сравнению с предыдущими 20-ю годами) рост концентрации хлорофилла *a* (более чем в 3.5 раза). В совокупности с другими факторами это свидетельствовало об интенсивном вредоносном цве-

тении микроводорослей, сопровождавшемся выделением токсинов. Этому способствовали сильные положительные аномалии температуры водной среды (отклонения от климатической нормы на границе раздела океан–атмосфера достигали 6°C), зарегистрированные в исследуемом регионе летом 2020 г.

Другие природные факторы, в том числе извержения вулканов и землетрясения, не влияли на экологическую обстановку в Авачинском заливе и в прибрежных акваториях всего п-ва Камчатка, ввиду удаленности действующих вулканов от исследуемых акваторий и слабой сейсмической активности в анализируемый период времени.

Таким образом, результаты исследований, проведенных на основании космических данных, показали, что главной причиной чрезвычайной экологической ситуации, вызвавшей массовую гибель гидробионтов в Авачинском заливе и у побережья всего п-ва Камчатка осенью 2020 г., являлись природные факторы. Они связаны с вредоносным цветением водорослей – красным приливом, произошедшим из-за аномального повышения температуры водной среды по сравнению с климатической нормой.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексанин А.И., Качур В.А., Ким В., Орлова Т.Ю., Павлов А.Н., Салюк П.А., Стоник И.В., Шевченко О.Г. К определению состава фитопланктона по спутниковым данным // Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации / Под ред. А.В. Адрианова. Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 325–353

Алексанин А.И., Ким В., Орлова Т.Ю., Стоник И.В., Шевченко О.Г. Фитопланктон залива Петра Великого и задача его дистанционного зондирования // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 2. С. 239–250.

Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // *Исслед. Земли из космоса*. 2010. № 6. С. 3–17

Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // *Исслед. Земли из космоса*. 2012. № 4. С. 3–11.

Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.Н., Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В., Хурчак А.П., Гринченко Д.В. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям //

Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 3–22.
<https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // *Исслед. Земли из космоса*. 2001. № 6. С. 49–67

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.

Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В. Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 6. С. 805–820.

Бондур В.Г., Замшин В.В., Четверткова О.И. Исследование из космоса экологического происшествия у полуострова Камчатка в сентябре–октябре 2020 года, связанного с красным приливом // *Докл. АН*. 2021. Т. 497. № 1. С. 61–68.

<https://doi.org/10.31857/S2686739721030014>

Бондур В.Г., Зубков Е.В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // *Исслед. Земли из космоса*. 2005. № 4. С. 54–61.

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1. Механизм генерации внутренних волн // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 6. С. 833–845.

Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А., Хлебопашев П.В., Пелевин В.В., Грабовский А.Б., Ижицкий А.С., Гончаренко И.В., Соловьев Д.М., Полухин А.А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек Российского побережья Черного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 3. С. 293.

<https://doi.org/10.7868/S0030157414030150>

Замшин В.В., Воробьев В.Е. Применение комплексной наземно-космической системы для мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 5. С. 25–42.

<https://doi.org/10.31857/S0205961420050097>

Иванов А.Ю., Кучейко А.А., Филимонова Н.А., Евтушенко Н.В., Антонок А.Ю., Терлеева Н.В. Использование космической радиолокационной съемки и данных автоматических систем идентификации судов для выявления судовых разливов в Черном море // *Исслед. Земли из космоса*. 2013. № 5. С. 84.

<https://doi.org/10.7868/S0205961413050011>

Иванов А.Ю., Хлебников Д.Б., Коновалов Б.Б., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В. Особенности отображения выносов рек в Черном море в данных дистанционного зондирования // *Соврем. пробл. дист. зондир. Земли*

- из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 191–202
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202>
- Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Задачи и проблемы спутникового информационного обеспечения мониторинга океана и атмосферы на Дальнем Востоке // Вестник ДВО РАН. 2007. № 4. С. 95–110
- Орлова Т.Ю. Красные приливы и токсические микроводоросли в дальневосточных морях России // Вестник ДВО РАН. 2005. № 1. С. 27–31.
- Суханова И.Н., Флинт М.В. Аномальное цветение кокколитофорид на восточном шельфе Берингова моря // Океанология. 1998. Т. 38. № 4. С. 557–560.
- Anderson D.M. Toxic algal blooms and red tides: A global perspective // Elsevier. 1989. С. 11–16
- Bondur V. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7p.
- Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book *Waste Water – Evaluation and Management*, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>
- Bondur V.G., Zamshin V.V. Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas // in book: K.V. Anisimov et al. (eds.). *Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”*. 2018. P. 625–637. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>
- Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea Truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Burkholder J.M. Implications of harmful microalgae and heterotrophic dinoflagellates in management of sustainable marine fisheries // *Ecological Applications*. 1998. № 8. P. 37–62. <https://doi.org/10.2307/2641362>
- Horner-Devine A.R., Hetland R.D., MacDonald D.G. Mixing and Transport in Coastal River Plumes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2015. Т. 47. № 1. P. 569–594. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141408>
- Hu C., Lee Z., Franz B. Chlorophyll *a* algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117(C1). <https://doi.org/10.1029/2011jc007395>
- Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Nikonov S., Vedernikov V.I., Yunev O., Finenko Z.Z., Basturk O. Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data // *J. Marine Systems*. 2002. Т. 36. № 3–4. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00184-7](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00184-7)
- NASA GSFC (CHL MODIS) Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group // Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Chlorophyll Data. 2021b. № 2018 reprocessing. <https://doi.org/data/10.5067/TERRA/MODIS/L3M/CHL/2018>
- NASA GSFC (CHL VIIRS) Ocean Biology Processing Group // Visible and Infrared Imager/Radiometer Suite (VIIRS) Chlorophyll Data. 2021a. № 2018 reprocessing. <https://doi.org/dta/10.5067/NPP/VIIRS/L3B/CHL/2018>
- O’Reilly, J.E., & 24 co-authors. *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892. Vol. 11 / S.B. Hooker and E.R. Firestone (eds.). NASA Goddard Space Flight Center, 49 p.*
- Paerl H.W., Huisman J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms // *Environ. Microbiol. Rep.* 2009. Т. 1. № 1. P. 27–37. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakova N.E., Shirshin E.A., Permynova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P. Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Sci.* 2018. Т. 14. № 1. P. 87–103. <https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
- Reynolds R.W., Banzon V.F. NOAA Optimum Interpolation 1/4 Degree Daily Sea Surface Temperature (OISST) Analysis, Version 2. NOAA National Centers for Environmental Information. 2008. <https://doi.org/10.7289/V5SQ8XB5>
- Научный доклад об итогах экспедиции ученых ДВФУ на Камчатку (26.10.2020). URL: <https://www.dvfu.ru/news/fevu>
<https://kamchatinfo.com/news/ecology/detail/21528/>
<https://kamchatinfo.com/news/society/detail/32620/>
<https://sentinels.copernicus.eu>
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview>
http://greenpatrol.ru/sites/default/files/doklad_ob_ekologicheskoy_situacii_v_kamchastkom_krae_2014.pdf
<http://haedat.iode.org>

Analysis of the Causes of the Kamchatka Environmental Disaster in Autumn 2020 Related with a Red Tide, Based on Satellite Data

V. G. Bondur¹, V. V. Zamshin¹, O. I. Chvertkova¹, E. R. Matrosova¹, and V. N. Khodaeva¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Here we present the results of comprehensive satellite study of an environmental disaster near the Kamchatka Peninsula that caused mass mortality of aquatic organisms in Autumn 2020. The processing and analysis of long-term series of optical multispectral and radar satellite images of sea surface (~22 thous. scenes), including satellite data on sea surface temperature (1981–2020) and chlorophyll *a* concentrations (2000–2020) have allowed us to reveal that in July–September 2020 in the studied region there were strong positive temperature anomalies (deviation of the climatic norm reached 6°C) that caused significant change of the biogenic mode

and abnormal increase in chlorophyll *a* concentrations (almost 3-fold) in the end of September–beginning of October 2020. It was the main cause of harmful algae bloom (red tide) that led to aquatic organism mortality both in Avacha Gulf and in certain coastal water areas of the whole Kamchatka Peninsula. The analysis of satellite data have shown that possible anthropogenic contribution and the contribution of other natural factors into the environmental disaster are insignificant.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, satellite data, coastal water areas, harmful algae bloom, red tide, chlorophyll *a*, Kamchatka

REFERENCES

- Aleksanin A.I., Kachur V.A., Kim V., Orlova T.Yu., Pavlov A.N., Saliuk P.A., Stonik I.V., Shevchenko O.G.* K opredeleniiu sostava fitoplanktona po sputneykovym dannym [Determination of phytoplankton composition from satellite data] // In book: “Biologicheskaya bezopasnost dalnevostochnykh morei Rossiiskoi Federatsii” [Biological safety of the Russian Far Eastern seas] / *Otv. red. A.V. Adrianov.* Vladivostok: Dalnauka, 2014. P. 325–353 (In Russian).
- Aleksanin A.I., Kim V., Orlova T.Y., Stonik I.V., Shevchenko O.G.* Phytoplankton of the Peter the Great Bay and its Remote Sensing Problem // *Oceanology.* 2012. V. 52. № 2. P. 219–230.
- Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G., Vorobjev V.E., Grebenjuk Y.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Study of fields of currents and pollution of the coastal waters on the Gelendzhik Shelf of the Black Sea with space data // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2013. V. 49. № 9. P. 886–896. DOI: 10.1134/S000143381309003X
- Bondur V.G., Vorobyev V.E., Zamshin V.V., Serebryany A.N., Latushkin A.A., Li M.E., Martynov O.V., Hurchak A.P., Grinchenko D.V.* Monitoring Anthropogenic Impact on Some Coastal Water Areas of the Black Sea Using Multi-spectral Satellite Imagery // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2018. V. 54. P. 1008–1022. DOI: 10.1134/S0001433818090098
- Bondur V.G., Grebenuk Y.V.* Remote indication of anthropogenic influence on marine environment caused by depth wastewater plume: Modelling, experiments // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* 2001. № 6. P. 49–67 (In Russian).
- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D.* Variability of internal tides in the coastal water area of Oahu Island (Hawaii) // *Oceanology.* 2008. V. 48. № 5. P. 611–621. DOI: 10.1134/S0001437008050019
- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D.* The spectral characteristics and kinematics of short-period internal waves on the Hawaiian shelf // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2009. V. 45. № 5. P. 598–607. DOI: 10.1134/S0001433809050077
- Bondur V.G., Zhurbas V.M., Grebenyuk Yu.V.* Mathematical Modeling of Turbulent Jets of Deep-Water Sewage Discharge into Coastal Basins // *Oceanology.* 2006. V. 46. № 6. P. 757–771. DOI: 10.1134/S0001437006060014
- Bondur V.G., Zamshin V.V., Chvertkova O.I.* Space Study of a Red Tide-Related Environmental Disaster near Kamchatka Peninsula in September–October 2020 // *Dokl. Earth Sc.* 2021. T. 497. № 1. C. 83–90. DOI: 10.1134/S1028334X21030016
- Bondur V.G., Zubkov E.V.* Vydelenie melkomasshtabnykh neodnorodnostey opticheskikh kharakteristik verkhnego sloya okeana po mnogoazonalnym sputnikovym izobrazheniyam vysokogo razresheniya. Chast 1. Effekty sbrosa drenazhnykh kanalov v pribrezhnye akvatorii [Showing up the small-scale ocean upper layer optical inhomogeneities by the multispectral space images with the high surface resolution. Part 1. The canals and channels drainage effects at the coastal zone] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* 2005. № 4. P. 54–61 (In Russian).
- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Ezhova E.V., Kazakov V.I., Sergeev D.A., Soustova I.A., Troitskaya Yu.I.* Surface manifestations of internal waves investigated by a subsurface buoyant jet: 1. The Mechanism of Internal-Wave Generation // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2009. V. 45. № 6. P. 779–790. DOI: 10.1134/S0001433809060115
- Zavialov P.O., Makkaveev P.N., Kononov B.V., Osadchiev A.A., Khlebopashev P.V., Pelevin V.V., Grabovskiy A.B., Izhitskiy A.S., Goncharenko I.V., Polukhin A.A., Soloviev D.M.* Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea // *Oceanology.* 2014. V. 54. № 3. P. 265–280. DOI: 10.1134/S0001437014030151
- Zamshin V.V., Vorobyev V.E.* Applying an Integrated System for Ground to Space Monitoring of Anthropogenic Impacts on Coastal Waters of the Black Sea // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2020. V. 56. № 12. P. 1705–1718. DOI: 10.1134/S0001437014030151
- Ivanov A. Yu., Kucheiko A.A., Filimonova N.A., Evtushenko N.V., Antoniyuk A. Yu., Terleeva N.V.* Ispolzovanie kosmicheskoi radiolokatsionnoi semki i dannykh avtomaticheskikh sistem identifikatsii sudov dlia vyivleniia sudovykh razlivov v Chernom more [Use of space-based radar surveys and data from automatic ship identification systems to detect ship spills in the Black Sea] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2013. № 5. P. 84 (In Russian). DOI: 10.7868/S0205961413050011
- Ivanov A. Yu., KHLebnikov D. B., Kononov B. B., Evtushenko N. B., Terleeva N. B.* Osobennosti otobrazheniia vynosov rek v Chyornom more v dannykh distantcionnogo zondirovaniia [Features of displaying river outflows in the Black Sea in remote sensing data] // *Sovremennye problemy distantcionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa.* 2018. V. 15. № 5. P. 191–202 (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202
- Levin V.A., Aleksanin A.I., Aleksanina M.G.* Tasks and problems of information technologies for satellite monitoring of ocean and atmosphere in the Far East // *Vestnik DVO RAN.* 2007. № 4. P. 95–110 (In Russian).
- Orlova T.Yu.* Krasnye prilivy i toksicheskie mikrovdorosli v dalnevostochnykh moriakh Rossii [Red tides and toxic microalgae in the Russian far Eastern seas] // *Vestnik DVO RAN.* 2005. № 1. P. 27–31 (In Russian).

- Sukhanova I.N., Flint M.V.* Anomalous blooming of coccolithophorids over the eastern Bering sea shelf // *Oceanology*. 1998. T. 38. № 4. P. 502–505.
- Anderson D.M.* Toxic algal blooms and red tides: A global perspective // Elsevier. 1989. P. 11–16.
- Bondur V.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // In book: *Waste Water - Evaluation and Management*, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas // in book: K.V. Anisimov et al. (eds.). *Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”*. 2018. P. 625–637. DOI: 10.1007/978-3-319-62870-7
- Bondur V., Tsidilina M.* Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Burkholder J.M.* Implications of harmful microalgae and heterotrophic dinoflagellates in management of sustainable marine fisheries // *Ecological Applications*. 1998. № 8. P. 37–62. DOI: 10.2307/2641362
- Horner-Devine A.R., Hetland R.D., MacDonald D.G.* Mixing and Transport in Coastal River Plumes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2015. T. 47. № 1. P. 569–594. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141408
- Hu C., Lee Z., Franz, B.* Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117(C1). DOI: 10.1029/2011jc007395
- Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Nikonov S., Vedernikov V.I., Yunev O., Finenko Z.Z., Basturk O.* Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data // *J. Marine Systems*. 2002. T. 36. № 3–4. DOI: 10.1016/S0924-7963(02)00184-7
- NASA GSFC (CHL MODIS) Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group // Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Chlorophyll Data. 2021b. № 2018 reprocessing. DOI: 10.5067/TER-RA/MODIS/L3M/CHL/2018
- NASA GSFC (CHL VIIRS) Ocean Biology Processing Group // Visible and Infrared Imager/Radiometer Suite (VIIRS) Chlorophyll Data. 2021a. № 2018 reprocessing. DOI: 10.5067/NPP/VIIRS/L3B/CHL/2018
- O’Reilly J.E., & 24 co-authors.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892. V. 11. S.B. Hooker and E.R. Firestone (eds.). NASA Goddard Space Flight Center, 49 p.
- Paerl H.W., Huisman J.* Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms // *Environmental Microbiology Reports*. 2009. T. 1. № 1. P. 27–37. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Sci.* 2018. T. 14. № 1. P. 87–103. <https://doi.org/DOI10.5194/os-14-87-2018>
- Reynolds R.W., Banzon V.F.* NOAA Optimum Interpolation 1/4 Degree Daily Sea Surface Temperature (OISST) Analysis, Version 2. NOAA National Centers for Environmental Information. 2008. <https://doi.org/10.7289/V5SQ8XB5>
- Scientific report on the results of the expedition of scientists to Kamchatka (26.10.2020). URL: <https://www.dvfu.ru/news/fevu>
- <https://kamchatinfo.com/news/ecology/detail/21528/>
- <https://kamchatinfo.com/news/society/detail/32620/>
- <https://sentinels.copernicus.eu>
- <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview>
- http://greenpatrol.ru/sites/default/files/doklad_ob_ekologicheskoy_situacii_v_kamchastkom_krae_2014.pdf
- <http://haedat.iode.org>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОЦЕНКА БАЛАНСА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2021 г. С. Р. Чалов^а, *, К. Н. Прокопьева^а

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
Москва, Россия

*E-mail: srchalov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 01.10.2020 г.

В статье представлены результаты оценки баланса взвешенных наносов в пределах крупнейшей много-рукавной дельты р. Лена. Адаптирована методика оценки мутности в рукавах на основе коллекции снимков (31 изображение) спутниковой системы Landsat за 2000–2019 гг. Сделан вывод о важнейшей роли криогенных процессов разрушения сложенных многолетнемерзлыми породами берегов в продольном изменении потока взвешенных наносов. Показано, что с возрастанием среднесуточных температур воздуха от 5 до 14°C наблюдается продольное увеличение мутности воды по длине основных рукавов дельты р. Лена, что объясняется активизацией процессов термоэрозии и термоденудации. Выявлено, что исключительно высокая интенсивность этих процессов характерна для левых берегов южной экспозиции субширотно ориентированной Быковской протоки дельты Лены.

Ключевые слова: дельта р. Лена, баланс наносов, дистанционное зондирование, космические снимки, Landsat, термоэрозия, термоденудация, криолитозона

DOI: 10.31857/S0205961421030027

ВВЕДЕНИЕ

Материковый литогеохимический сток – важнейшая составляющая взаимодействия суши и океана. Его изученность связана, в первую очередь, с гидрологическими наблюдениями на постах, расположенных в нижнем течении рек, однако часто – на значительном удалении от приемных водоемов. Ниже этих постов в устьевых областях рек происходят масштабные процессы осаждения и фильтрации растворенных и взвешенных веществ. Считается, что в океан выносятся около 5–7% от взвешенных и 60–80% от растворенных веществ речного стока, поступающих в устьевые зоны рек мира (Лисицын, 1994). Гидрологические наблюдения позволяют охарактеризовать лишь около 90% мирового речного стока в океан (Milliman, Farnsworth, 2013). Все это определяет задачу изучения процессов изменения материкового стока в устьевой зоне.

Наиболее сложные изменения материкового стока воды и стока наносов происходят в пределах дельт. Здесь, вследствие снижения уклонов водной поверхности и транспортирующей способности потока, наблюдается осаждение взвешенных наносов. При этом эрозионно-аккумулятивные процессы в дельтах имеют сезонный режим. В южных дельтах рек умеренного и субтропического пояса (рек Волга, Селенга, Верхняя Ангара) (Чалов и др., 2017) увеличение уровня воды приводит к затоплению пойм и осередков (поймы и осередки чаще всего покрыты травяни-

стой растительностью, удерживающей взвешенные наносы), и вследствие изменения шероховатости на их поверхности аккумулируются наносы. При малых расходах воды большая часть наносов проходит через эти дельты транзитом (Chalov et al., 2020).

В дельтах арктических рек, расположенных в условиях распространения вечной мерзлоты, закономерности переноса вещества осложняются криогенными процессами. Боковая и речная эрозия, термоэрозия и термоденудация льдистых берегов (Григорьев, 1993) приводят к разрушению и медленному таянию берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, и увеличению стока взвешенных наносов. Повсеместное усиление таяния вечной мерзлоты (Котляков и др., 2020; Gavrilov, Pizhankova, 2018) в условиях потепления климата может становиться определяющим процессом в изменении потока взвешенных наносов через дельты северных рек. Подобные явления, в частности, характерны для крупнейшей дельты полярных широт – дельты р. Лена, не изученные вследствие отсутствия регулярных наблюдений до настоящего времени. Разовые наблюдения за характеристиками стока наносов приводили к противоположным выводам о факторах и закономерностях формирования баланса наносов. Так, по данным экспедиций МГУ, лишь от 10 до 30% материала, поступающего в дельту Лены, достигает моря Лаптевых по основным рукавам дельты (Коротаев и др., 1990). Сходные цифры приводи-

лись в работах (Федорова и др., 2009; Чаркин и др., 2009). В работе, выполненной на основе дешифрования снимков Landsat 8, приводятся аргументы, подтверждающие теорию аккумуляции наносов в пределах дельтового участка (Кравцова, Инюшин, 2019). В то же время по данным (Rachold et al., 2000) большая часть твердого вещества проходит через дельту транзитом и достигает морского края, а М.Н. Григорьев (Григорьев, 1993) указывал на продольное увеличение концентрации взвешенных наносов.

Подобная неопределенность выводов о режиме эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте р. Лена связана с эпизодическим нерегулярным характером наблюдений, обусловленных трудоемкостью проведения гидрометрических работ по ее акватории. Доступные данные о мутности воды и распределении взвешенных наносов по рукавам характеризуют лишь случайные ситуации. Нет сведений о роли разрушения берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, в балансе наносов. Технология дистанционного определения мутности воды (по космическим снимкам), успешно применявшаяся ранее для речных (Park, Latrubesse, 2014; Wang et al., 2009) и дельтовых участков (Chalov et al., 2017; Long, Pavelsky, 2013; Pavelsky, Smith, 2009) крупных рек, позволяет на принципиально новом информационном уровне осветить эти проблемы. В данной работе проводится оценка трансформации стока взвешенных наносов по всей акватории дельты р. Лена для выявления роли криогенных процессов на основе дешифрирования мутности воды по снимкам Landsat при разных гидрологических и синоптических условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Дельта р. Лена — одна из крупнейших речных дельт мира. Она занимает первое место по площади среди дельт России и является важным седиментационным барьером, оказывающим влияние на поступление взвешенных наносов в воды моря Лаптевых (Лопатин, Федоров, 1947). Дельта Лены состоит из четырех крупных рукавов, которые стали объектом исследования — Быковская протока, Трофимовская протока, Туматская протока и Оленекская протока. На долю правых протоков — Быковской и Трофимовской — приходится 85% общего стока воды и примерно 75% общего стока твердого вещества. Туматская и Оленекская протоки являются старейшими на сегодняшний день частями дельты, которые отличаются небольшими глубинами и наличием многочисленных нешироких протоков. Вся территория дельты находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых достигает 500–600 м (Григорьев и др., 1996), в то время как мощность активного слоя составляет 20–40 см (Andreev et al., 2004). В толще многолетнемерзлых пород встречаются жилы, линзы и большие скопления под-

земного льда, так называемого “ледового комплекса”, участвующего в развитии криогенных процессов.

Изучение качества поверхностных вод с помощью методов дистанционного зондирования привлекло внимание ученых с момента запуска первого спутника Земли в 1972 г. (Лабутина и др., 1976; Кравцова, Антонова, 1974). Благодаря оптическим свойствам концентрации взвешенных наносов (мутность воды, S , мг/л) демонстрирует устойчивую связь с цветом поверхностной воды (Albanakis, 1990; Bhargava, Mariam, 1991; Doxaran et al., 2002; Forget et al., 1999; Novo et al., 1989). Отклики на видимую световую часть электромагнитного спектра в зависимости от концентрации наносов на поверхности воды позволяют получить абсолютные значения мутности воды по космическим снимкам, поскольку поверхностное отражение в значительной степени связано с рассеянием взвешенных веществ на поверхности воды (Kirk, 1989; Miller, Cruise, 1995). В работе при оценке мутности используется красный канал, так как в нем наблюдаются наибольшие корреляции параметра яркости с мутностью воды (Doxaran et al., 2002; Miller, Cruise, 1995; Wang et al., 2007).

Были использованы снимки, полученные со съемочных систем Landsat 5, Landsat 7 и Landsat 8, пространственное разрешение которых составляет 30 м. Всего обработан 31 космический снимок за период с 2000 по 2019 г. Расчет перехода от оптической яркости снимка к значениям мутности производился на основе привязки к полевым данным (Тарасов, Тутубалина, 2018). Для составления карт в физических величинах концентрации взвеси в воде была использована эмпирическая зависимость, связывающая коэффициент отражения с концентрацией взвешенных частиц. В работе используется модель с высокой точностью определения концентрации взвеси, полученная ранее авторами для участка среднего течения р. Лена (от г. Якутска до устья р. Вилюй), где на основе полевых данных и серии космических снимков была выведена зависимость между мутностью и коэффициентом отражения ($r = 0.91$):

$$S = \frac{540.27 \times \rho - 2.611}{10000},$$

где S — мутность воды, мг/л, ρ — коэффициент отражения на снимке. Точность методики подробно обсуждалась в (Чалов и др., 2019).

Оценка продольных изменений стока взвешенных наносов в пределах дельтовой области проводилась на основе 4 профилей по геометрическому центру русла (рис. 1): 1) Главное русло — Быковская протока, 2) Главное русло — Трофимовская протока, 3) Главное русло — Туматская протока, 4) Главное русло — Оленекская протока.

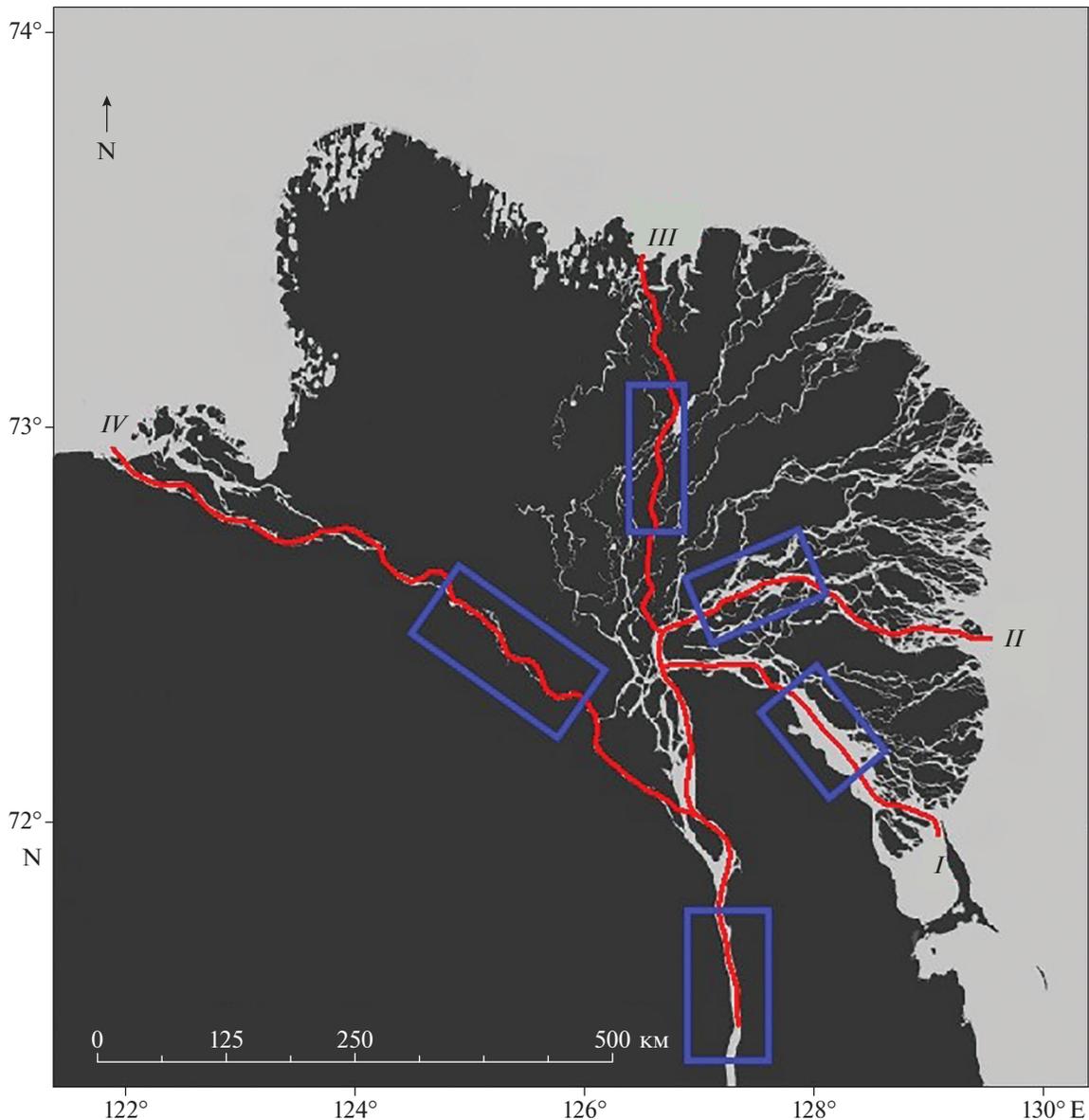


Рис. 1. Карта-схема дельты р. Лена: *I* – Быковская протока, *II* – Трофимовская протока, *III* – Туматская протока, *IV* – Оленекская протока. Квадратами обозначены полигоны определения мутности воды S для оценки баланса наносов по длине протоков.

Для каждого из выделенных рукавов строился продольный профиль изменения концентрации взвешенных наносов. Значение мутности в пределах рассматриваемых участков рассчитывалось как среднее между пикселями, содержащими данные о концентрации взвешенного вещества. Изменение концентрации взвеси (ΔS_0) по длине дельты рассчитывалось по формуле:

$$\Delta S_0 = S_2 - S_1,$$

где S_1 и S_2 , мг/л – значения концентрации взвешенных частиц в верхних (вершина дельты – участок Главного русла) и нижних частях рукавов соответственно (см. рис. 1). Нижние участки определения мутности воды были выделены на

удалении от морского края дельты для того, чтобы избежать влияния абразионных процессов. Для расчета относительного изменения концентрации взвеси в воде (ΔS , %) использовалось отношение:

$$\Delta S = \Delta S_0 / S_1.$$

По выделенным участкам в пределах четырех рукавов устанавливалось среднее значение мутности ΔS , далее проводилась оценка баланса взвешенных наносов в них на основе сопоставления рассчитанной величины с расходом воды в р. Лена выше дельты (по г/п Кюсюр) и температурами воздуха на метеостанции п. Тикси. Они соответствовали следующим неравенствам: $\Delta S > 0$,

Таблица 1. Осредненные значения баланса взвешенных наносов по длине главных рукавов дельты р. Лена

Название протоки	$\Delta S_{\text{ср}}$	$\Delta S_{\text{макс}}$	$\Delta S_{\text{мин}}$	Число изученных ситуаций		
				$\Delta S > 0$	$\Delta S < 0$	всего
Быковская протока	3.4	34.0	-37.1	11	5	16
Трофимовская протока	9.4	40.8	-38.4	12	4	16
Туматская протока	-7.3	32.7	-25.6	2	8	10
Оленекская протока	-5.8	27.7	-21.8	1	7	8

$\Delta S < 0$ и $\Delta S = 0$, которые указывают на положительный, то есть продольное увеличение мутности (преобладание эрозии), отрицательный (преобладание аккумуляции) и равновесный баланс взвешенных наносов соответственно. В качестве источника метеорологических данных с 2000 по 2019 г. использовался архив Государственного фонда данных о состоянии природной среды, который включает в себя максимальные, минимальные и среднесуточные температуры воздуха, а также данные о количестве осадков (aisori.meteo.ru/waisori/). Для характеристики водности р. Лена использовались архивные данные о суточных расходах воды с 1999 по 2019 г. по г/п Кюсюр, расположенного в 120 км выше по течению от дельты (arcticgreativers.org).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ снимков был направлен на выявление процессов аккумуляции или эрозии в Быковской, Трофимовской, Туматской и Оленекской протоках за период открытой воды, то есть с июня по октябрь. Данный промежуток охватывает только период средней и пониженной водности (менее $100000 \text{ м}^3/\text{с}$). Наибольшая разница в балансе взвешенных наносов ΔS наблюдается между правыми (Быковская и Трофимовская) и левыми (Туматская и Оленекская) протоками (табл. 1). В Быковской и Трофимовской преобладают ситуации продольного увеличения мутности воды $\Delta S > 0$. Если в сумме на обе протоки положительных балансов взвешенных веществ выявлено 33 случая, то отрицательных в 3.5 раза меньше – 9 случаев. В левых протоках (Туматская и Оленекская) на протяжении всего периода измерений преобладают процессы аккумуляции. На 15 случаев продольного уменьшения мутности выявлено всего лишь 3 случая повышения мутности по длине проток, последние случаи приурочены к максимальным расходам воды.

Для оценки гидрологических факторов этих отличий анализировались связи баланса взвешенных наносов и расходов воды (рис. 2). Для всего периода исследования наблюдается преобладание положительного баланса взвешенных наносов, то есть продольное увеличение расходов наносов, при разных интервалах расходов воды в разные периоды водности. Какая-либо сезонная закономерность изменения величины ΔS не прослеживается. Процессы эрозии доминируют в Быковской и Трофимов-

ской в течение всего периода открытой воды, вне зависимости от расходов воды. В меньших по размеру и более длинных протоках центральной и левой части дельты (Туматская и Оленекская) преобладают аккумулятивные процессы. Здесь эрозионные явления наблюдались только для ситуаций прохождения пика половодья (например, баланс в Туматской и Оленекской протоках 10 июня 2018 г. при $Q = 68000 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t = 12.0^\circ\text{C}$). Таким образом, в отличие от дельт южных рек (Чалов и др., 2017; Чалов и др., 2019) в анализируемом диапазоне расходов воды водность не является определяющим фактором формирования величины баланса взвешенных наносов ΔS .

Отдельно был проанализирован режим эрозионно-аккумулятивных процессов в разных рукавах. В Трофимовской протоке концентрации взвешенных веществ, определенные по спутниковым снимкам, изменяются в диапазоне от 13 до 34 мг/л. По длине рукава отмечается сильная вариация значений – от вершины русла до морского края дельты. Как правило, в районе морского побережья значения мутности начинают снижаться из-за воздействия подпорных явлений от морской акватории и непосредственно положения границы речных и морских вод (рис. 3, а). В пределах придельтового участка, то есть до первого ответвления русла, наблюдаются небольшие колебания мутности, значения которых увеличиваются в верхней части дельты.

Единичные ситуации продольного снижения мутности воды по длине Трофимовской и Быковской проток (рис. 3, б) характеризуются плавным снижением мутности воды в верхней части дельты и приурочены в основном к холодным погодным условиям. Так, при $Q = 21400 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t = 0.5^\circ\text{C}$ в Быковской протоке средние концентрации мутности составили 19.3 мг/л и уменьшались от 29 до 17 мг/л. Все случаи продольного уменьшения мутности воды в правых протоках наблюдались в период выпадения осадков при сплошной облачности.

Эти факты указывают на возможную роль в балансе наносов термодинамических процессов. Наиболее вероятной причиной этого является развитие разрушения берегов, вызванного установившимися в летний период положительными температурами и таянием многолетнемерзлых пород (Victorov, Trapeznikova, 2019; Суходровский, 1979), что отчетливо дешифрируется на снимках, сделанных в дни с высокими положительными температурами. В тече-

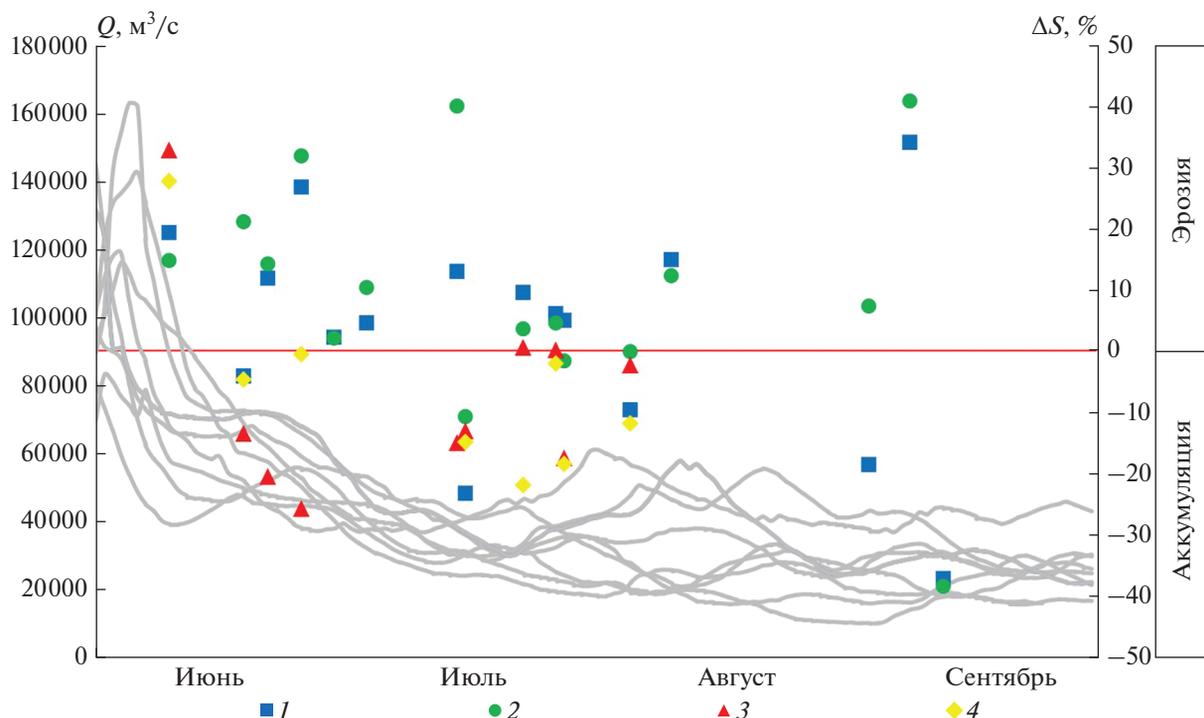


Рис. 2. Сезонные изменения баланса взвешенных наносов (ΔS , %) в пределах руслового сектора дельты для: 1 – Быковской протоки, 2 – Трофимовской протоки, 3 – Туматской протоки, 4 – Оленекской протоки. Линиями показаны ежедневные расходы р. Лена (г/п Кюсюр) за исследуемый период 2000–2019 гг.

ние всего теплого периода года на участке Быковской протоки, имеющей субширотное положение (рис. 4), прослеживаются ситуации с преимущественным увеличением мутности воды вдоль левого берега южной экспозиции. Такое распределение мутности характерно для рек криолитозоны (Дебольский и др., 2018) и связано с медленным таянием многолетнемерзлых пород и отступанием берегов (Григорьев, 1993).

Процессы термоденудации и термоэрозии вызывают повышение мутности на 10–15 мг/л вдоль левого берега южной экспозиции. У правых берегов северной экспозиции, менее подверженных прямой солнечной радиации, эти процессы прослеживаются слабее (см. рис. 4). Была проанализирована связь между среднесуточными температурами воздуха по метеостанции Тикси и балансом взвешенных наносов ΔS по длине разных рукавов (рис. 5).

С возрастанием среднесуточных температур воздуха от 5 до 14°C увеличивается влияние температуры воздуха на баланс взвешенных наносов. В Быковской и Трофимовской протоках уже при среднесуточных температурах воздуха более 5°C наблюдается продольное увеличение мутности воды за счет активизации размывов берегов. Сделан вывод, что влияние положительного притока суммарной солнечной радиации и повышение температуры воздуха способствуют деградации многолетнемерзлых пород и активизации процессов термоэрозии и термоденудации (Rachold et al., 2000). Оттаявшие ча-

стицы, находящиеся в мерзлоте, попадают в русло, повышая тем самым концентрацию твердого стока в верхнем слое речных вод. Несмотря на невысокие значения коэффициентов детерминации ($R^2 < 0.5$), полученные результаты (см. рис. 5) достоверно характеризуют тенденции зависимости баланса наносов в правых протоках от температуры воздуха. Неустойчивость связи объясняется многофакторностью процесса формирования стока наносов, в частности влиянием массообмена в системе потокдно. Вывод о роли криогенных процессов в балансе наносов подтверждается сведениями, приведенными по результатам исследования эрозионных процессов со спутника TerraSAR-X (Stettner et al., 2017), указывающим на влияние температур и количества осадков на интенсивность и скорость эрозии.

Противоположная ситуация – преобладание аккумулятивных процессов в левых протоках – объясняется снижением здесь скоростей и уклонов. Оленекская и Туматская протоки находятся на этапе отмирания и характеризуются относительно небольшими глубинами и неширокими рукавами. Именно в этих протоках наблюдается наибольшее число неглубоких и нешироких ответвлений, теряющих водообмен с ближайшими протоками при установлении меженных уровней (Большаянов и др., 2013). Оленекская протока получает около 7% от общего стока р. Лена в половодье за счет стока из Булкурской протоки. В межень Булкурская протока теряет свою значимую роль в жизни Оленекской, и по-

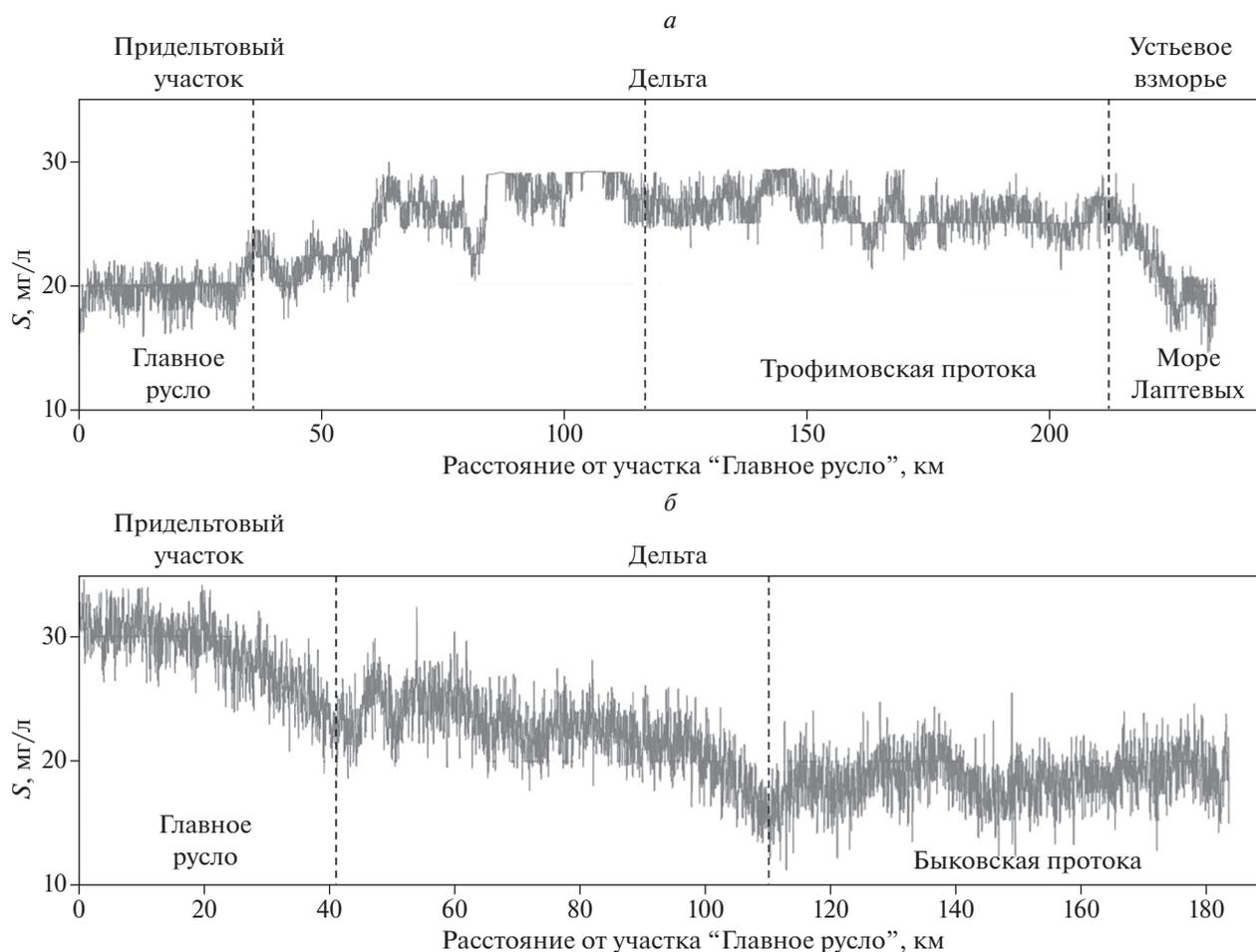


Рис. 3. Продольный профиль мутности воды через: *a* – Трофимовскую протоку при $Q = 66000 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t = 5.7^\circ\text{C}$ (по данным дешифрирования снимка Landsat 5 от 26 июля 2009 г.) и *б* – Быковскую протоку при $Q = 21400 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t = 0.5^\circ\text{C}$ (по данным дешифрирования снимка Landsat 7 от 12 сентября 2002 г.).

следняя, в свою очередь, получает стока еще меньше. При этом в обеих протоках также прослеживается зависимость величины ΔS от температуры воздуха, однако в пределах в основном отрицательного диапазона значений ΔS . Влияние криогенных процессов накладывается, таким образом, на гидродинамические факторы осаждения наносов, что приводит к постепенному ослаблению аккумуляции за счет поступления наносов от разрушаемых грунтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности технологии дистанционного определения мутности воды для дельтовых областей. Из-за невозможности охвата регулярными гидрометрическими наблюдениями обширного пространства дельты с большим числом водотоков дистанционные методы являются безальтернативными для детального исследования изменчивости баланса наносов в них (Chalov et al., 2017). Следует отметить, что выполненные оценки имеют ряд ограничений. В частности, резуль-

таты охватывают только период средней и низкой водности в связи с тем, что при максимальном стоке активизация ледовых явлений не позволяет использовать методику дистанционного определения мутности воды. Тем не менее, применение данных дистанционного зондирования и разработанных методик по их дешифрированию дает возможность впервые комплексно оценить дельту р. Лена с точки зрения баланса потоков вещества в ней. В перспективе эти методы также позволят подойти к количественной оценке термоабразионных процессов в пределах морского края дельты, проявляющихся часто в многократном увеличении мутности воды (рис. 6) и соотношения вклада различных термодинамических процессов в материковый сток.

Расчет баланса взвешенных наносов с привлечением данных о концентрации взвешенных наносов за 2000–2019 гг., полученных по снимкам Landsat, позволил впервые получить количественные данные о взаимосвязи криогенных и

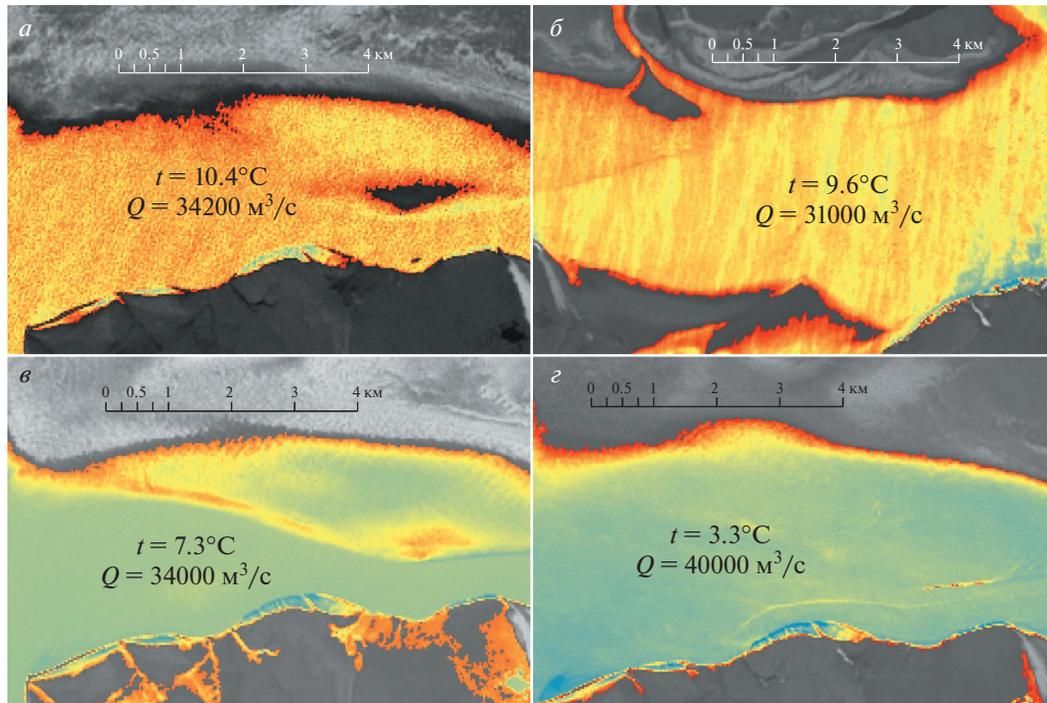


Рис. 4. Формирование шлейфов мутности за счет разрушения берегов Быковской протоки *а* – 5 августа 2000 г., *б* – 15 июля 2019 г., *в* – 23 июля 2013 г., *г* – 28 июня 2018 г.

эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте р. Лена:

1. Выявлены контрастные балансы взвешенных наносов в левых и правых протоках дельты Лены при средних и меженных расходах воды. В активизирующихся протоках – Быковской и Трофимовской – наблюдается продольное увеличение мутности воды. В большинстве случаев происходит увеличение мутности по длине про-

ток. Отмирающие правые протоки (Туматская и Оленекская) характеризуются преобладанием процессов аккумуляции. Во многих случаях здесь наблюдается продольное снижение мутности воды.

2. Дан анализ причин формирования баланса взвешенных наносов в летне-осенний период. На баланс взвешенных наносов правых протоков влияют процессы термоденудации и термоэрозии берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами. Раз-

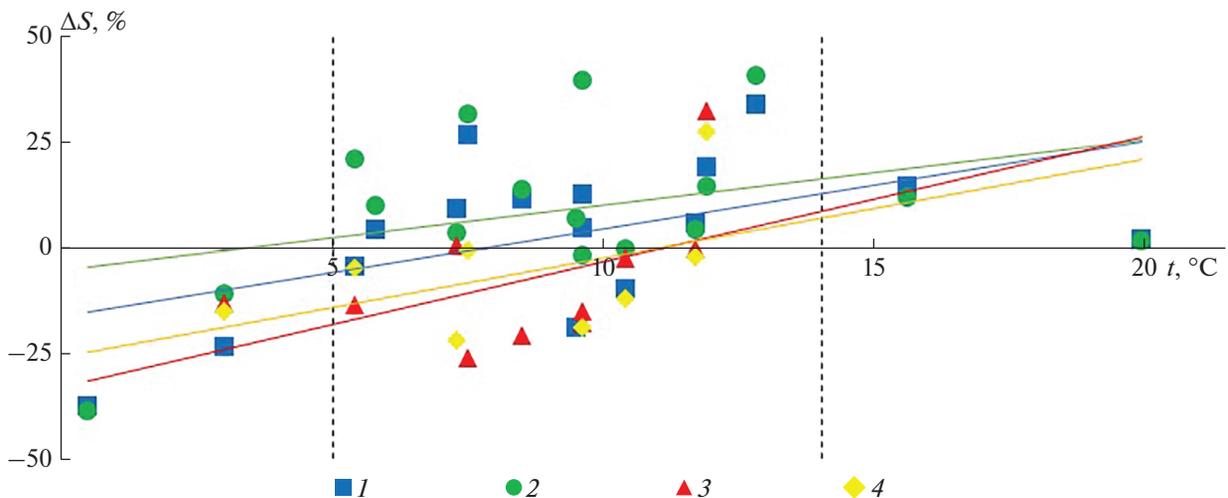


Рис. 5. Изменения баланса взвешенных наносов (ΔS , %, профили на рис. 1) в пределах руслового сектора дельты в зависимости от среднесуточных температур воздуха (по метеостанции п. Тикси) для: 1 – Быковской протоки, 2 – Трофимовской протоки, 3 – Туматской протоки, 4 – Оленекской протоки.

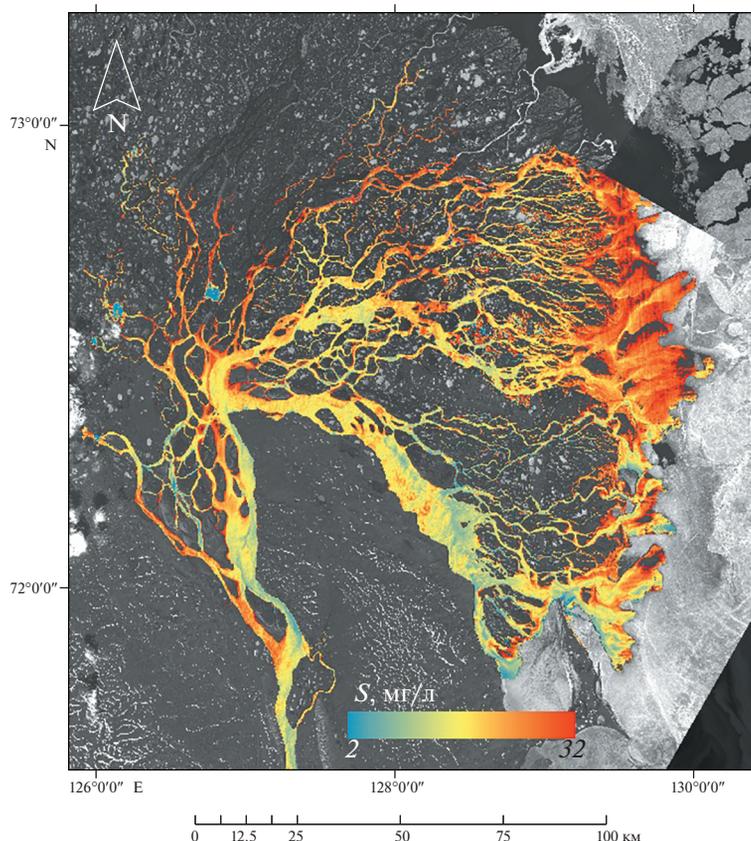


Рис. 6. Распределение мутности воды в приповерхностном слое в центральной части дельты Лены и характерная зона увеличения мутности в районе морского края дельты (снимок Landsat 8, дата съемки 15 июня 2019 г., $Q = 31200 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t = 9,6^\circ\text{C}$).

рушение берегов приводит к формированию мутьевых потоков и выносу большого количества взвешенных наносов, определяющих положительный баланс взвешенного вещества. В левых протоках повышение мутности наблюдается на спаде половодья, связанное с условиями смыва с прирусловой поймы и осередков в период снеготаяния и при их затоплении. Доминирование отрицательного баланса в левых протоках связано с уменьшением стока в Туматскую и Оленекскую протоки.

3. Выявлена роль погодных условий в формировании баланса наносов в дельте Лены. Влияние положительного притока суммарной солнечной радиации и повышение температур воздуха способствует деградации многолетнемерзлых пород и активизации процессов термоэрозии и термоденудации, во время которых оттаявшие частицы, находящиеся в мерзлоте, попадают в русло, повышая тем самым концентрацию твердого стока в верхнем слое речных вод.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Анализ космических снимков выполнен в рамках гранта РФФ 21-17-00181, анализ морфодинамики русла

и размывов берегов — при поддержке проекта РФФ 18-17-00086. Полевые работы выполнены при поддержке РФФИ 18-05-60219 Арктика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г.* Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
- Григорьев М.Н.* Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. 176 с.
- Григорьев М.Н., Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Куницкий В.В., Ларионов А.Г., Мухоменов К.И., Скрабин Р.М., Тимиришин К.В.* Геология, сейсмичность и мерзлотные процессы арктических районов Западной Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1996. 86 с.
- Дебольский В.К., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Масликова О.Я.* Размытие мерзлых берегов северных рек в зависимости от направления берегового уклона // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 9. С. 1112–1124.
- Кортаев В.Н., Михайлов В.Н., Бабич Д.Б., Богомолов А.Л., Заец Г.М.* Гидролого-морфологические процессы в дельте р. Лены // Земельные и водные ресурсы: противоэрозионная защита и регулирование русел. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1990. С. 120–144.
- Котляков В.М., Осокин Н.И., Сосновский А.В.* Динамика сезонно-талого слоя на Шпицбергене и Антаркти-

- ческом полуострове в XXI в. по результатам моделирования // Лед и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 201–212. <https://doi.org/10.31857/S2076673420020034>
- Кравцова В.И., Антонова С.Ю.* Применение многозональной съемки для изучения и картографирования мелководий (на примере северо-восточного Каспия) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1974. № 2. С. 78–88.
- Кравцова В.И., Инюшин А.Н.* Исследование современной динамики дельты Лены по космическим снимкам // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. №6. С. 567–574. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596466567-574>
- Лабутина И.А., Сафьянов Г.А., Шарлай Т.Г.* Исследование распространения взвесей в море по многозональным аэрофотоснимкам // Докл. АН.. 1976. Т. 230. № 2. С. 536–538
- Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Лопатин Г.В., Федоров М.К.* Физико-географический очерк дельты р. Лены. Л.: АНИИ, 1947–1948. 320 с.
- Суходровский В.Л.* Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. М.: Наука, 1979. 280 с.
- Тарасов М. К., Тутубалина О. В.* Методика определения мутности воды в р. Селенге и прилегающей акватории оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 1. С. 60–71. <https://doi.org/10.7868/S020596141801-0017>
- Федорова И.В., Большианов Д.Ю., Макаров А.С., Третьяков М.В., Четверова А.А.* Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. С. 278–291.
- Чалов С.Р., Базилова В.О., Тарасов М.К.* Баланс взвешенных наносов в дельте Селенги в конце XX–начале XXI века: моделирование по данным снимков Landsat // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 332–339. <https://doi.org/10.7868/S0321059617030075>
- Чалов С.Р., Потемкина Т.Г., Пашкина М.П., Касимов Н.С.* Многолетние изменения баланса взвешенных наносов в дельтах притоков Байкала // Метеорология и гидрология. 2019. Т. 44. № 10. С. 667–673
- Чаркин А.Н., Федорова И.В., Семилетов И.П.* Масштабы пространственной изменчивости распределения взвеси в системе “Река Лена–море Лаптевых” // Геология, география и экология океана. Ростов-на-Дону: ЮНЦ, 2009. С. 351–354.
- Электронный ресурс <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>
- Электронный ресурс <https://arcticgreativers.org/>
- Albanakis K.S.* Testing of a model for the simulation of the volume reflectance of water due to suspended sediment under controlled conditions, for various sediment types // International J. Remote Sensing. 1990. V. 11. № 9. P. 1533–1547. <https://doi.org/10.1080/01431169008955112>
- Andreev A., Tarasov P., Schwamborn G., Ilyashuk B., Ilyashuk E., Bobrov A., Hubberten H.-W.* Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2004. V. 209. № 1–4. P. 197–217. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.010>
- Bhargava D.S., Mariam D.W.* Light penetration depth, turbidity and reflectance related relationship and models // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 1991. V. 46. № 4. P. 217–230. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(91\)90055-z](https://doi.org/10.1016/0924-2716(91)90055-z)
- Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K.* Modelling suspended sediment distribution in the Selenga river delta using Landsat data // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2017. V. 375. P. 19–22. <https://doi.org/10.5194/piahs-375-19-2017>
- Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M. A.* Toolbox for sediment budget research in small catchments // Geography, environment, sustainability. 2017. V. 10 № 4. P. 43–68. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68>
- Chalov S.R., Moreido V.M., Sharapova E.O., Efimova L.E., Efimov V.A., Lychagin M.Y., Kasimov N.S.* Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga River — Main Tributary of The Lake Baikal // Water. 2020. V. 12. № 1345. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/w12051345>
- Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P.* A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters // International J. Remote Sensing. 2002. V. 23. № 23. P. 5079–5085. <https://doi.org/10.1080/0143116021000009912>
- Forget P., Ouillon S., Lahet F., Broche P.* Inversion of Reflectance Spectra of Nonchlorophyllous Turbid Coastal Waters // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 68. № 3. P. 264–272. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(98\)00117-5](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(98)00117-5)
- Gavrilov A.V., Pizhankova E.I.* Dynamics of permafrost in the coastal zone of Eastern-Asian sector of the Arctic // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11. № 1. P. 20–37. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-20-37>
- Kirk J.T.O.* The upwelling light stream in natural waters // Limnol. Oceanogr. 1989. V. 34. № 8. P. 1410–1425.
- Long C.M., Pavelsky T.M.* Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 129. P. 197–209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.019>
- Miller R.L., Cruise J.F.* Effects of suspended sediments on coral growth: Evidence from remote sensing and hydrologic modeling // Remote Sensing of Environment. 1995. V. 53. № 3. P. 177–187. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00081-b](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00081-b)
- Milliman J.D., Farnsworth K.L.* River discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis // Cambridge Univ. Press. 2013. V. 24. № 4. P. 143–160.
- Novo E.M.M., Hansom J.D., Curran P.J.* The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration // International J. Remote Sensing. 1989. V. 10. № 7. P. 1283–1289. <https://doi.org/10.1080/01431168908903967>
- Park E., Latrubesse E.M.* Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 147. P. 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.013>
- Pavelsky T.M., Smith L.C.* Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada // WatWater Resour. Res. 2009. V. 45. № 11. P. 110–126. <https://doi.org/10.1029/2008wr007424>
- Rachold V., Grigoriev M.N., Are F.E., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M.* Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas // Int. J. Earth Sci.

2000. V. 89. № 3. P. 450–460.

<https://doi.org/10.1007/s005310000113>

Stettner S., Beamish A., Bartsch A., Heim B., Grosse G., Roth A., Lantuit H. Monitoring Inter- and Intra-Seasonal Dynamics of Rapidly Degrading Ice-Rich Permafrost Riverbanks in the Lena Delta with TerraSAR-X Time Series // *Remote Sensing*. 2017. V. 10. № 2. P. 51.

<https://doi.org/10.3390/rs10010051>

Victorov A.S., Trapeznikova O.N. Stochastic models of dynamic balance state for the morphological patterns of cryolithozone landscapes // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. № 3. P. 6–15.

<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-68>

Wang J., Lu X.X., Liew S.C., Zhou Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China // *Earth Surf. Processes Landforms*. 2009. V. 34. № 8. P. 1082–1092.

<https://doi.org/10.1002/esp.1795>

Wang J., Lu X., Zhou Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in the turbid water of the Upper Yangtze River using Landsat ETM+ // *Chin. Sci. Bull.* 2007. V. 52. № 2. P. 273–280.

<https://doi.org/10.1007/s11434-007-7012-6>

Assessment Suspended Sediment Budget of the Lena River Delta Based on the Remote Sensing Dataset

S. R. Chalov¹ and K. N. Prokop'eva¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

This study evaluates long-term and seasonal changes of sediment budget in Lena delta based on remote sensing dataset. Since 2000 Landsat images have been applying during ice-free period, from June to September. The sediment concentration at the delta topset was compared with sediment concentrations data at the outlets of: the Main, the Oleneskaya, the Tumatskyaya, the Trofimovskaya and the Bykovskaya channels to calculate suspended sediment budget in delta. The sediment concentration was calculated based on the archive Landsat images (more than 30 images). We have estimated influence of air temperature on thermal coastal erosion and the accumulation of sediments in the river Lena's delta. The increase of the daily average air temperature from 5 to 14°C plays critical role in the degradation of permafrost and the activation of the processes of thermal erosion and thermal denudation of the right channels coasts and this fact means that these results can help to estimate special aspects of biochemical balance of the delta.

Keywords: Lena River delta, sediment budget, remote sensing dataset, satellite imagery, Landsat, thermal erosion, thermal denudation, permafrost.

REFERENCES

Albanakis K.S. Testing of a model for the simulation of the volume reflectance of water due to suspended sediment under controlled conditions, for various sediment types // *International J. Remote Sensing*. 1990. V. 11. № 9. P. 1533–1547. DOI: 10.1080/01431169008955112

Andreev A., Tarasov P., Schwamborn G., Ilyashuk B., Ilyashuk E., Bobrov A., Hubberten H.-W. Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2004. V. 209. № 1–4. P. 197–217. DOI: 10.1016/j.palaeo.2004.02.010

Bhargava D.S., Mariam D.W. Light penetration depth, turbidity and reflectance related relationship and models // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1991. V. 46. № 4. P. 217–230. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68

Bol'shijanov D.Ju., Makarov A.S., Shnajder V., Shtof G. Proishozhdenie i razvitie del'ty reki Leny [Origin and development of the Lena river delta] // Saint Petersburg: Arctic and Antarctic research Institute, 2013. P. 268 (In Russian).

Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Modelling suspended sediment distribution in the Selenga river delta using Landsat data // *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2017. V. 375. P. 19–22. DOI: 10.5194/piahs-375-19-2017

Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Suspended sediment balance in Selenga delta at the late XX–early XXI century: Simulation by Landsat satellite images // *Vodnye re-*

sursy. 2017. V. 44. № 3. P. 332–339 (In Russian). DOI: 10.7868/S0321059617030075

Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M. A toolbox for sediment budget research in small catchments // *Geography, environment, sustainability*, 2017. V. 10. № 4. P. 43–68. doi:10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68

Chalov S.R., Moreido V.M., Sharapova E.O., Efimova L.E., Efimov V.A., Lychagin M.Y., Kasimov N.S. Hydrodynamic Controls of Particulate Metals Partitioning Along the Lower Selenga River — Main Tributary of The Lake Baikal // *Water*. 2020. V. 12. № 1345. P. 1–17. DOI: 10.3390/w12051345

Chalov S.R., Potemkina T.G., Pashkina M.P., Kasimov N.S. Evolution of suspended sediment budget in the deltas of Lake Baikal tributaries // *Meteorologija i gidrologija*. 2019. V. 44. № 10. P. 667–673 (In Russian).

Charkin A.N., Fedorova I.V., Semiletov I.P. Scale of the spatial variability of the distribution of suspended sediment in the system “The Lena River–The Laptev Sea” // *Geologija, geografija i jekologija okeana* [Geology, geography and ecology of the ocean] Rostov-on-Don: Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences. 2009. P. 351–354 (In Russian).

Digital source <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>

Digital source <https://arcticgreatrivers.org/>

Debol'skij V.K., Gricuk I.I., Ionov D.N., Maslikova O.Ja. Erosion of the frozen riversides of the northern rivers depending on the direction of the coastal slope // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2018. V. 13. № 9. P. 1112–1124 (In Russian).

- Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P.* A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters // *International J. Remote Sensing*. 2002. V. 23. № 23. P. 5079–5085. DOI: 10.1080/0143116021000009912
- Fedorova I.V., Bol'shijanov D.Ju., Makarov A.S., Tret'jakov M.V., Cheverova A.A.* Modern hydrological situation on the Lena river delta // *Sistema morja Laptevyyh i priliegajushhih morej Arktiki: sovremennoe sostojanie i istorija razvitiya* [System of the Laptev Sea and the Adjacent Arctic Seas: Modern and Past Environments]. Moscow: Moscow University Press, 2009. P. 278–291 (In Russian).
- Forget P., Ouillon S., Lahet F., Broche P.* Inversion of Reflectance Spectra of Nonchlorophyllous Turbid Coastal Waters // *Remote Sensing of Environment*. 1999. V. 68. № 3. P. 264–272. DOI: 10.1080/0143116021000009912
- Gavrilov A.V., Pizhankova E.I.* Dynamics of permafrost in the coastal zone of Eastern-Asian sector of the Arctic // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. V. 11. № 1. P. 20–37. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-20-37
- Grigor'ev M.N.* Kriomorfogenez ust'evoj oblasti r. Leny [Cryomorphogenesis on the Lena river delta] // *Yakutsk: Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*, 1993. P. 176. (In Russian).
- Grigor'ev M.N., Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M., Kunickij V.V., Larionov A.G., Mikulenko K.I., Skrjabin R.M., Timirshin K.V.* Geologija, sejsmichnost' i merzlotnye processy arkticheskikh rajonov Zapadnoj Yakutii [Geology, seismicity and permafrost processes of the Arctic regions of Western Yakutia] // *Yakutsk: Yakut scientific center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science*, 1996. P. 86 (In Russian).
- Korotaev V.N., Mihajlov V.N., Babich D.B., Bogomolov A.L., Zaec G.M.* Hydrological and morphological processes in the Lena river delta // *Zemel'nye i vodnye resursy: protivoperozionnaja zashhita i regulirovanie rusel* [Land and water resources: anti-erosion protection and regulation of riverbeds]. Moscow: Moscow University Press. 1990. P. 120–144 (In Russian).
- Kotljakov V.M., Osokin N.I., Sosnovskij A.V.* Dynamics of seasonally thawed layer on Svalbard and the Antarctic Peninsula in the XXI century according to modeling data // *Led i Sneg*. 2020. V. 60. № 2. P. 201–212 (In Russian). DOI: 10.31857/S2076673420020034
- Kravtsova V.I., Antonova S.Yu.* Applying polyzonal surveying to studying and mapping of shallows: case study of Northeastern Caspian Sea. // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka*. 1974. V. 2. P. 78–88 (In Russian).
- Kravtsova V.I., Inyushin A.N.* Studying the present-day dynamics of Lena delta by space images // *Vodnye resursy*. 2019. V. 46. № 6. P. 567–574 (In Russian). DOI: 10.31857/S0321-0596466567-574
- Kirk J.T.O.* The Upwelling Light Stream in Natural Waters // *Limnology and Oceanography*. 1989. V. 34. № 8. P. 1410–1425.
- Labutina I.A., Saf'yanov G.A., Sharlai T.G.* Studying Suspended Sediment Transport in Seas by Polyzoal Images // *Doklady Akademii Nauk*. 1976. V. 230. № 2. P. 536–538 (In Russian).
- Lisitsyn A.P.* Marginal filters of oceans // *Okeanologiya*. 1994. V. 34. № 5. P. 735–747 (In Russian).
- Long C.M., Pavelsky T.M.* Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment // *Remote Sensing of Environment*. 2013. V. 129. P. 197–209. DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.019
- Lopatin G.V., Fedorov M.K.* Fiziko-geograficheskij ocherk del'ty r. Leny [Physico-geographical sketch of the Lena river delta] // *Leningrad: Arctic research Institute*, 1947. P. 320 (In Russian).
- Miller R.L., Cruise J.F.* Effects of suspended sediments on coral growth: Evidence from remote sensing and hydrologic modeling // *Remote Sensing of Environment*. 1995. V. 53. № 3. P. 177–187. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00081-b
- Milliman J.D., Farnsworth K.L.* River Discharge to the Coastal Ocean // *A Global Synthesis*. Cambridge Univ. Press. 2013. V. 24. № 4. P. 143–160.
- Novo E.M.M., Hansom J.D., Curran P.J.* The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration // *International J. Remote Sensing*. 1989. V. 10. № 7. P. 1283–1289. DOI: 10.1080/01431168908903967
- Park E., Latrubesse E.M.* Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 147. P. 232–242. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.013
- Pavelsky T.M., Smith L.C.* Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada // *Water Resour. Res.* 2009. V. 45. № 11. P. 110–126. DOI: 10.1029/2008wr007424
- Rachold V., Grigoriev M.N., Are F.E., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M.* Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas // *Int. J. Earth Sci.* 2000. V. 89. № 3. P. 450–460. DOI: 10.1007/s005310000113
- Stettner S., Beamish A., Bartsch A., Heim B., Grosse G., Roth A., Lantuit H.* Monitoring Inter- and Intra-Seasonal Dynamics of Rapidly Degrading Ice-Rich Permafrost Riverbanks in the Lena Delta with TerraSAR-X Time Series // *Remote Sensing*. 2017. V. 10. № 2. P. 51. DOI: 10.3390/rs10010051
- Suhodrovskij V.L.* Ekzogennoe rel'efoobrazovanie v kriolitozone [Exogenous relief formation in the cryolithozone] // *Moscow: Science*, 1979. 280 p. (In Russian).
- Tarasov M. K., Tutubalina O. V.* Water turbidity estimation in the Selenga River and nearby waters of Lake Baikal using remote sensing data // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2018. № 1. P. 60–71.
- Victorov A.S., Trapeznikova O.N.* Stochastic Models of dynamic balance state for the morphological patterns of cryolithozone landscapes // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. № 3. P. 6–15. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-68
- Wang J., Lu X.X., Liew S.C., Zhou Y.* Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China // *Earth Surf. Processes Landforms*. 2009. V. 34. № 8. P. 1082–1092. DOI: 10.1002/esp.1795
- Wang J., Lu X., Zhou Y.* Retrieval of suspended sediment concentrations in the turbid water of the Upper Yangtze River using Landsat ETM+ // *Chin. Sci. Bull.* 2007. V. 52. № 2. P. 273–280. DOI: 10.1007/s11434-007-7012-6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СЕЗОННАЯ И СУТОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМИЧЕСКОГО СКИН-СЛОЯ НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ SEVIRI И ДАННЫХ ТЕРМОПРОФИЛИРУЮЩИХ БУЕВ

© 2021 г. В. А. Рубакина^{а, *}, А. А. Кубряков^а, С. В. Станичный^а

^аМорской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: valenru93@mail.ru

Поступила в редакцию 14.08.2020 г.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ данных высокого временного разрешения сканера SEVIRI и термопрофилирующих дрейфующих буев за многолетний период. Полученные величины коэффициентов корреляции, СКО, коэффициентов регрессии и разницы средних значений свидетельствуют о достаточно хорошем совпадении сопоставляемых данных. Исследована зависимость перепада температуры dT в приповерхностном слое от сезона года и времени суток, а также от скорости ветра, потоков тепла, относительной влажности, температуры воздуха, разности температур воздуха и температуры поверхностного слоя. В теплый период года, когда температуры воздуха максимальны ($+18^{\circ}\text{C}$ и выше), и полный поток тепла направлен в море, dT принимает максимальные отрицательные значения ($-0.8...-0.9^{\circ}\text{C}$), что в первую очередь связано наличием скин-слоя (эффектом “холодной пленки”). С увеличением скорости ветра происходит снижение абсолютных значений dT , связанное с разрушением скин-слоя. В холодный период года, когда полный поток тепла направлен из океана в атмосферу, а температура воздуха минимальна, dT достигает максимальных положительных значений. В течение суток наибольшие отрицательные значения dT приходятся на вторую половину суток – в период наибольшего дневного прогрева. Ночная конвекция разрушает скин-слой, и это приводит к снижению абсолютных величин dT . Получена ярко выраженная зависимость dT от потоков скрытого тепла и относительной влажности. Наибольшие dT наблюдаются при минимальных потоках скрытого тепла и относительной влажности 85–90%.

Ключевые слова: суточный ход температуры, термопрофилирующие дрейфующие буи, SEVIRI, Черное море, сравнительный анализ, скин-слой

DOI: 10.31857/S020596142102007X

ВВЕДЕНИЕ

С появлением современных средств дистанционного зондирования различных параметров Мирового океана, возникла крайне важная задача сопоставления данных ДЗЗ с контактными измерениями (Bondur, 2005, 2011). Спутниковые методы исследования имеют ряд неоспоримых преимуществ, однако без контактных измерений корректная интерпретация спутниковых данных крайне затруднена, а порой невозможна. Только благодаря наличию контактных данных возможно внесение различных корректировок и поправочных коэффициентов (атмосферная коррекция и т.д.) для правильной трактовки спутниковых данных. Кроме того, контактные измерения позволяют получить информацию не только на поверхности, но и вертикальное распределение различных параметров вод (температура, соленость, концентрация различных веществ и т.д.), что не-

доступно при мониторинге исключительно дистанционными методами (Keeler et al., 2004; Bondur, Tsidilina, 2005).

Одним из наиболее важных параметров вод Мирового океана, и Черного моря в частности, является температура поверхностного слоя океана/моря (далее ТПО/ТПМ). ТПМ оказывает воздействие на климат, функционирование экосистемы планеты, модулирует газообмен, влияет на образование ураганов, циклонов, бризовую циркуляцию (Meredith et al., 2012; Efimov et al., 2016; Marullo et al., 2016). Этот параметр непосредственно используется в расчетах турбулентного теплообмена между океаном и атмосферой (Grotsky et al., 2012).

Методики восстановления температуры приповерхностного слоя океана по данным ДЗ в ИК-диапазоне ориентированы, в первую очередь, на компенсацию влияния атмосферы – основного

искажающего фактора. Кроме этого, нечернота водной поверхности и, как следствие, отличие радиационной температуры поверхности от термодинамической температуры также могут влиять на ошибки ИК-измерений, особенно в зоне солнечного блика (Лебедев и др., 1994)

Одним из наиболее важных факторов отличия радиационной температуры морской поверхности от температуры верхнего слоя вод, определяемым *in situ*, является наличие скин-слоя с выраженной перепадом температуры, который образуется из-за энергообмена океана с атмосферой (Woodcock et al., 1947; Saunders, 1967). О наличии/проявлении холодного скин-слоя на границе воздух–море известно уже несколько десятилетий благодаря тщательным наблюдениям *in situ* (Woodcock et al., 1947; Katsaros et al., 1977; Mammen et al., 1990; Ward et al., 2004; Ward, 2006) и радиометрическим измерениям, проведенным в широком диапазоне условий (Woodcock et al., 1947; Saunders, 1967; McAlister et al., 1969; Hepplewhite, 1989; Schluessel et al., 1990; Jessup et al., 1997; Minnett et al., 2001; Minnett, 2003).

Скин-слой обычно на $0.1\text{--}0.5^\circ\text{C}$ холоднее, чем ближайшие подповерхностные воды, хотя наблюдается значительная изменчивость разницы температур в скин-слое и объемной температуры (Donlon et al., 1999). Эта разница температур возникает из-за вертикального потока тепла через температурный миллиметровый пограничный слой на поверхности океана; чистый поверхностный поток тепла практически всегда направлен из океана в атмосферу, что приводит к образованию холодной пленки/холодного скин-слоя в океане.

При исследовании скин-слоя и скин-эффекта чаще всего рассматривается разница температуры непосредственно самого скин-слоя и т.н. объемной температуры (температуры, обычно измеряемой контактными датчиками на глубине $0.05\text{--}1$ м, далее ΔT). Под объемной температурой подразумевается температура приповерхностного слоя на некотором горизонте. Следует отметить, что этот горизонт в различных работах варьируется.

В работе (Murray et al., 2000) температура скин-слоя по данным Along Track Scanning Radiometer (ATSR) сравнивается с соответствующей объемной температурой по данным заякоренных буев ТАО (the Tropical Atmosphere Ocean (TAO) moored buo array) в экваториальной части Тихого океана на горизонте 1 м. Температурная стратификация приповерхностного слоя океана развивается в условиях высокой освещенности/инсоляции и при низких скоростях ветра.

Вопрос сопоставления данных ДЗЗ с контактными данными для акватории Черного моря является одним из наиболее актуальных. Так, в работе (Плотников и др., 2007) выполнено сопоставле-

ние данных о ТПМ Черного моря по данным радиометра AVHRR, ИЗС NOAA, с измерениями SVP-термодрифтеров. Анализ полученных данных показал отличия в статистических характеристиках распределения отклонения между спутниковыми и контактными значениями температуры, полученными по данным 2005 и 2006 гг.

Вопросу восстановления ТПМ Черного моря по спутниковым и контактными данным посвящена также работа (Лебедев и др., 1994), в которой представлена методика ИК-радиометрического определения температуры излучающего слоя океана, и на ее основе определен перепад температуры в скин-слое с борта движущегося судна. Полученная величина перепада температуры в скин-слое находится в интервале $0.07\text{--}0.84^\circ\text{C}$ и в среднем составляет 0.33°C .

Современные сканеры, установленные на спутниках, расположенных на геостационарной орбите, позволяют получать данные о различных параметрах океана и атмосферы на планетарных масштабах с высоким временным разрешением. Одним из таких сканеров для дистанционного определения ТПМ является радиометр Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (далее SEVIRI), расположенный на геостационарных метеорологических спутниках Meteosat Second Generation (MSG). Временное разрешение получаемых данных достигает 15 мин. Это дает возможность эффективно использовать данные SEVIRI для исследования высокочастотных колебаний, например событий дневного прогрева в различных акваториях Мирового океана (Gentemann et al., 2008; Marullo et al., 2010; Merchant et al., 2008; Filipiak et al., 2012). В работе (Rubakina et al., 2019a) на основе этих данных изучены особенности пространственной и сезонной изменчивости суточного хода температуры поверхности Черного моря и ее связь с ветровыми характеристиками в различные сезоны, а также события значительного дневного прогрева.

Для исследования вертикального распределения высокочастотных колебаний температуры вод Черного моря широко используются данные термопрофилирующих дрейфующих буев (термодрифтеров) (Толстошеев и др., 2008; Толстошеев и др., 2014), которые являются важной частью современной системы оперативных наблюдений за термической структурой верхнего слоя Мирового океана. В работе (Рубакина и др., 2019) ежечасные данные термодрифтеров были использованы для исследования особенности суточного хода температуры и событий значительного дневного прогрева в холодный и теплый периоды года.

Использование ежечасных спутниковых и контактных измерений температуры позволяет получить гораздо больший объем данных об изменчивости термических характеристик верхнего

слоя, в частности, перепада температуры в скин-слое и ее суточной изменчивости. Впервые сопоставление данных SEVIRI с данными термодрифтеров для района Черного моря было выполнено в работе (Акимов и др., 2014). В качестве контактных данных в работе использовались дрейфтерные измерения температуры поверхностного слоя Черного моря, накопленные с 2009 по 2012 гг. В этой работе статистическая обработка данных SEVIRI и введение параметризации зависимости ошибки спутниковых измерений от скорости ветра и потока тепла (времени суток) позволили увеличить точность восстановления ТПМ до 0.29° (для массива данных с 2009 по 2012 гг.).

Тем не менее, работ, посвященных комплексному исследованию термических характеристик скин-слоя, их зависимости от таких факторов, как потоки скрытого тепла, относительная влажность, месяц года, температура воздуха, время суток в комплексе с полем ветра для района Черного моря опубликовано не было.

В настоящей работе осуществлен сравнительный анализ данных высокого временного разрешения сканера SEVIRI и термопрофилирующих дрейфующих буев за более чем 10-летний период измерений. На основе этих данных и данных современных реанализов авторами впервые проведено исследование суточного и сезонного хода перепада температуры (dT) в поверхностном слое и его зависимости от скорости ветра, потоков тепла, относительной влажности, температуры воздуха и разности температуры воздуха и температуры поверхностного слоя моря.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В работе выполнен сравнительный анализ данных контактных измерений и данных дистанционного зондирования. Используются следующие данные.

Данные сканера SEVIRI о температуре поверхностного слоя моря (ТПМ) Черного моря за период с 2005 по 2016 гг. Временное разрешение данных составляет 1 ч, пространственное разрешение – 5 км. Температура, измеряемая в ИК-диапазоне, формируется в тонком скин-слое (~ 0.1 мм) (Saunders, 1967). Данные получены из архива <http://www.osi-saf.org/>. В работе (Акимов и др., 2014) на основе сравнения данных, полученных сканером SEVIRI, и измерений *in situ* термодрифтерами проведены оценки точности измерений сканера.

Качество данных сканера SEVIRI поставщиком этих данных оценивается по шкале от 0 до 5 для каждого пикселя (<http://www.osi-saf.org/>). Данные с оценкой 2 – наиболее низкие по качеству полезные данные, данные с оценкой 5 – полезные данные с наиболее высоким качеством.

Данные с оценкой 0 – необработанные, оценкой 1 характеризуются данные пикселей, которые “закрыты” облаками. В настоящей работе использовались данные с качеством от 3 до 5.

Для сравнительного анализа, а также вычисления dT отбирались только те данные дрейфтеров и соответствующие им данные сканера, которые были получены при отсутствии облачного покрова в районе пребывания дрейфтера.

Контактные данные о температуре вод Черного моря получены на основе измерений буй-профиломеров (далее термодрифтеры, дрейфтеры), которые функционировали в Черном море в различные годы (2005–2007, 2009, 2013–2014 гг.) в различные сезоны. Использовались измерения на горизонте 0.2 м, где расположен верхний датчик прибора. Временное разрешение данных (частота измерения температуры) составляет от 30 мин до 2 ч (в зависимости от модификации термодрифтера). Погрешность измерений датчиков термокосы составляет 0.1°C (Толстошеев и др., 2014). Данные получены из банка океанографических данных Морского гидрофизического института РАН. Часть измерений дрейфтеров содержали значительные выбросы, которые были отфильтрованы на основе проведенного визуального анализа и сопоставления с известными особенностями сезонного хода ТПМ в Черном море. После фильтрации для анализа были выбраны данные 12 дрейфтеров (см. табл. 1), траектории которых представлены на рис. 1

В работе также использовались данные реанализа “Eras” о скорости ветра на высоте 10 м с временной дискретностью 1 ч и пространственным разрешением 0.25° , а также данные о температуре воздуха на высоте 2 м, приповерхностных потоках скрытого и явного тепла и относительной влажности на уровне давления. Временная дискретность – 1 ч, пространственное разрешение – 0.25° . Источник данных: <https://climate.copernicus.eu/>.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Суточная и сезонная изменчивость температуры вод приповерхностного слоя по данным SEVIRI и термодрифтеров

В работе выполнено сопоставление данных SEVIRI и термодрифтеров. Для этого проведена предварительная интерполяция данных SEVIRI точка в точку на координаты траекторий термодрифтеров для соответствующих дат.

На примере дрейфтера № 34859 более подробно рассмотрим выполненный сравнительный анализ. Данные SEVIRI были линейно проинтерполированы на координаты траектории и время измерения буя.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции, среднеквадратичные отклонения, коэффициенты регрессии, разница средних значений

№ п/п	№ Дрифтера	Коэффициент корреляции	Среднеквадратичное отклонение, °С	Коэффициент регрессии	Разница средних значений	Время функционирования дрифтера
1	33137	0.94	0.27	0.8	0.37	15.09.2007–8.10.2007
2	34253	~1 (0.996)	0.6	1.03	-0.22	24.01.2005–29.08.2005
3	34859	~1 (0.996)	0.41	1.00	0.1	5.04.2005–31.07.2005
4	34860	~1 (0.997)	0.32	1.02	0.03	4.04.2005–4.07.2005
5	40418	0.92	0.42	0.87	-0.12	3.07.2006–6.08.2006
6	40445	0.92	0.63	0.97	-0.34	3.07.2006–26.08.2006
7	56092	0.93	0.55	1.01	-0.33	3.07.2006–19.09.2006
8	56093	0.96	0.4	0.96	0.033	3.07.2006–26.09.2006
9	248990	0.98	0.37	1.06	-0.03	20.11.2013–28.05.2014
10	249940	0.93	0.54	0.95	0.28	19.09.2013–11.03.2014
11	630380	0.98	0.34	0.91	0.34	3.08.2009–2.10.2009
12	630410	~1(0.99)	0.52	0.87	0.2	3.08.2009–23.11.2009
Значения для общих массивов сравниваемых данных		0.99	0.57	~1	-0.06	

Дрифтер № 34859 функционировал в Черном море с 5.04.2005 г. по 31.07.2005 г. (т.е. в теплое время года) в северо-западной части бассейна (рис. 2, а). Временная изменчивость температуры, полученная по контактными и спутниковым данным, достаточно хорошо согласуется (график временной изменчивости рис. 2, б и диаграмма рассеяния, рис. 2, в). Для большей части измерений разность показаний температур не превышает

сотые доли градуса. Разница средних значений составляет 0.1°С. События значительного дневного прогрева, которые определены по данным термодрифтера, также хорошо отображают данные сканера (выделены на графике рис. 2, б зеленым прямоугольником). Коэффициент корреляции между рядами равен ~1, среднеквадратичное отклонение разницы этих данных – 0.41°С. Таким образом, проведенная интеркалибрация отобра-

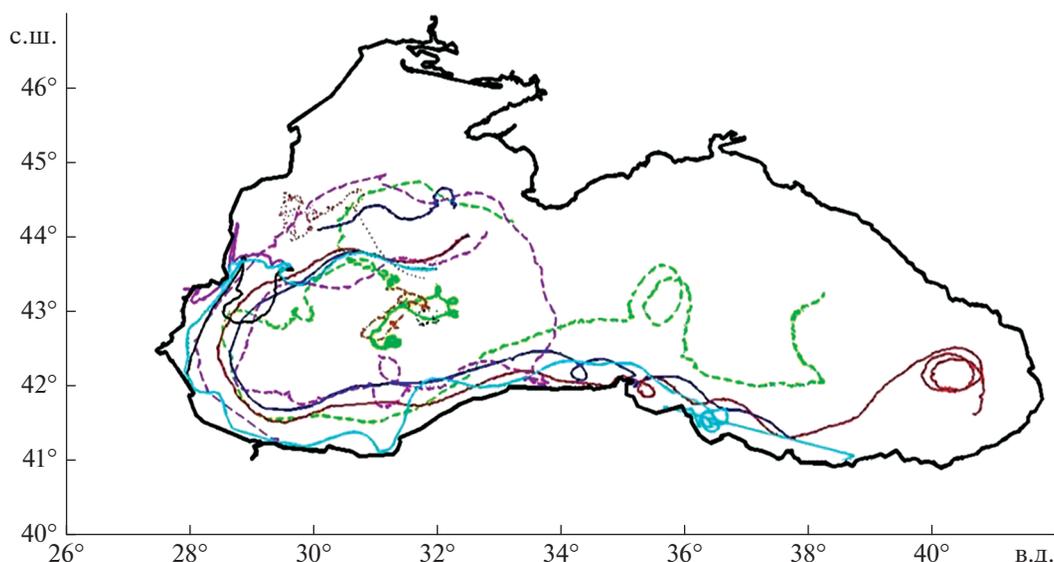


Рис. 1. Траектории термодрифтеров за период с 2005 по 2007 гг., 2009 г., с 2013 по 2014 гг., данные которых использовались в работе; различные цвета отображают траектории различных термодрифтеров.

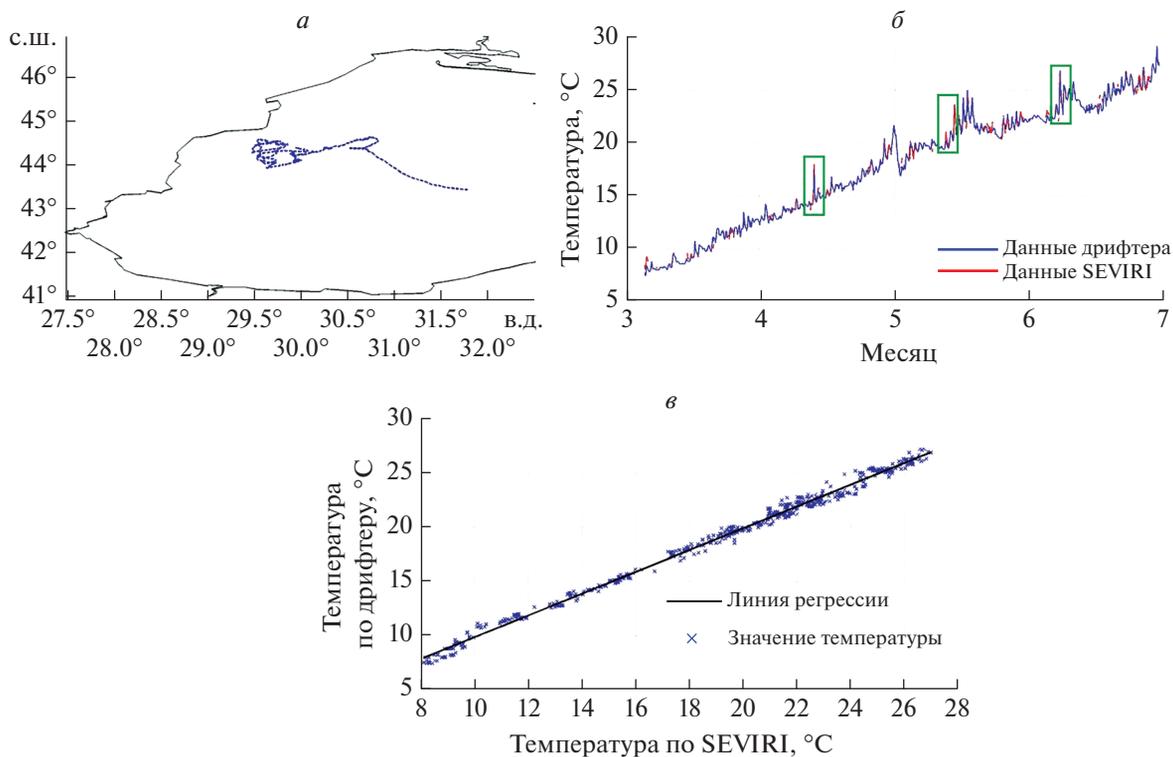


Рис. 2. *a* – Траектория термодрифтёра № 34859; *б* – временная изменчивость температуры на горизонте 0.2 м по данным термодрифтёра № 34859 за период с 5.04.2005 по 31.07.2005 г. (синяя линия) и суточный ход ТПМ по интерполированным данным SEVIRI за соответствующий период (красная линия); зелеными прямоугольниками выделены случаи значительного дневного прогресса; *в* – диаграмма рассеяния, построенная по данным термодрифтёра № 34859 и данным SEVIRI за соответствующий период, синими значками обозначены значения температуры, черная линия – влияния регрессии.

жает хорошее соответствие между сопоставляемыми массивами контактных и дистанционных данных.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов корреляции, СКО (среднеквадратичное отклонение), коэффициентов регрессии и разности средних значений, рассчитанные для каждого из термодрифтёров и соответствующих данных SEVIRI, а также их средние значения. Получено, что средний коэффициент корреляции для всех дрейфёров составляет 0.99, среднеквадратичное отклонение – 0.57°C , коэффициент регрессии – (~ 1), разность средних значений – (-0.06°C). Эти результаты схожи с данными работы (Акимов и др., 2014), в которой СКО величины dT (массивов данных с 2009 по 2012 гг.) составило 0.8°C для всех измерений и 0.45°C для ночных.

Как видно из табл. 1, коэффициенты корреляции между массивами данных для каждого из дрейфёров и соответствующими массивами данных по SEVIRI находятся в пределах от 0.92 до ~ 1 . Для массивов данных дрейфёров №№ 34253, 34859, 34860 и 630410 эти значения близки к единице. Таким образом, можно говорить об абсолютной (функциональной) корреляции. Величи-

ны СКО для сопоставляемых групп данных достаточно малы и не превышают 0.63°C , наименьшее значение СКО 0.27°C – для массивов данных дрейфёра № 33137. Коэффициент регрессии лежит в диапазоне значений от 0.8 до 1.06. Величины разности средних значений (разница средних значений по данным SEVIRI и по данным соответствующего термодрифтёра) по модулю малы и не превышают 0.28°C . Знак “–” показывает, что среднее значение температуры по спутниковым данным было ниже, чем по данным дрейфёра.

Сопоставление данных дистанционного зондирования с измерениями дрейфёров сопряжено с определенными специфическими трудностями и проблемами, что приводит к различию в сопоставляемых величинах. Эти несовпадения часто не связаны с ошибками применяемых методик. Прежде всего, поля ТПМ, получаемые по данным спутников и по данным дрейфёров, усредняются по разным пространственным масштабам (как в горизонтальном, так и вертикальном направлении). Для спутниковых данных температура измеряется в слое порядка долей мм, а осреднение по площади – порядка км (площади осреднения

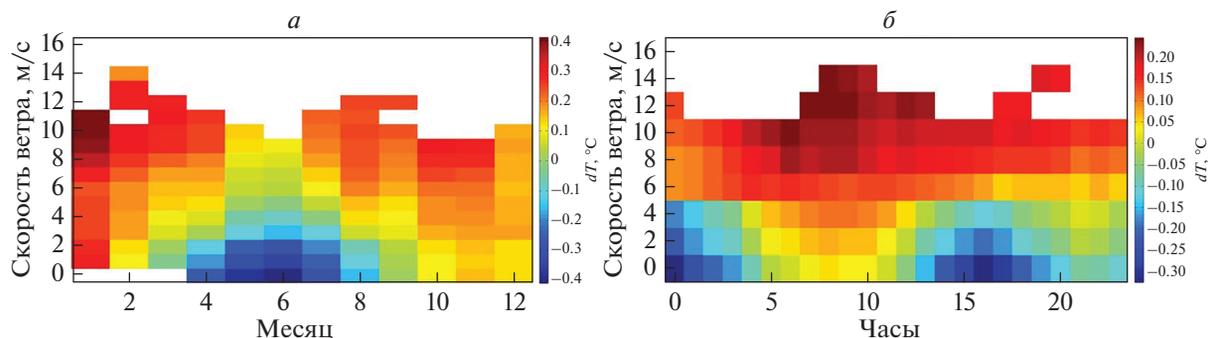


Рис. 3. *a* – Диаграмма зависимости разности показаний “SEVIRI-дрифтер” dT от ветра и месяца (по всем дрифтерам); *б* – диаграмма распределения разницы показаний dT от ветра и часа суток для мая–августа (время по Гринвичу) для мая–августа.

зависят от пространственного разрешения соответствующего прибора). Первый горизонт измерений у термодрифтеров расположен на глубине 0.2–0.25 м в точке, координаты которой фиксированы. Помимо этого, имеют место несовпадения моментов времени измерений, погрешности географической привязки спутниковых данных, а также погрешности определения расположения дрифтеров, отличия в технических параметрах сканеров, сбои в работе приборов и т.д. (Плотников и др., 2007). Тем не менее, несмотря на эти различия полученные величины коэффициентов корреляции, СКО, коэффициентов регрессии и разницы средних свидетельствуют о достаточно хорошем совпадении сопоставляемых данных.

Оценка перепада температуры в поверхностном слое и его зависимость от ветра, сезона года и часа суток

Для исследования зависимости показаний SEVIRI и термодрифтеров от поля ветра и сезона года была построена диаграмма зависимости разности показаний SEVIRI и термодрифтеров (далее dT) от модуля скорости ветра и месяца. Для каждого интервала скорости ветра и месяца определялась средняя величина dT . Полученная зависимость представлена в виде диаграммы, на которой цветом обозначено значение dT , по оси x – месяц, по оси y – скорость ветра (рис. 3, *a*).

В теплый период года dT принимает отрицательные значения (т.е. показания дрифтера оказываются выше показаний SEVIRI) ($-0.1...-0.4^{\circ}\text{C}$) при низких скоростях ветра (0–4 м/с) с апреля по август. При этом максимальные отрицательные значения ($-0.3...-0.4^{\circ}\text{C}$) приходятся на май–июнь, скорости ветра при этом не превышают 2–3 м/с. Минимальная по модулю dT ($0-(\pm 0.05)^{\circ}\text{C}$) наблюдается при высоких скоростях ветра – 7–8 м/с и выше – для всех сезонов года.

Такая разница в показаниях (когда значения температуры по данным дрифтеров выше, чем по данным сканера) может быть связана с рядом факторов. Во-первых, поплавков термодрифтера (более подробно со структурой термодрифтера можно ознакомиться в работе (Толстошеев, и др., 2014) в безоблачную погоду при высоких значениях температуры воздуха может нагреваться, что оказывает влияние на показания.

Во-вторых, таким образом может проявлять себя наличие скин-слоя (холодной пленки). В частности, о проявлении скин-слоя можно говорить при скоростях ветра меньших ~ 5 м/с (Бубукин и др., 2012). Разрушение скин-слоя происходит при развитии поверхностного волнения, если присутствует мелкомасштабная турбулентность, внутренние волны, а также при проникновении турбулентных вихрей из однородного слоя в другой, что приводит к выравниванию температуры в слое. В свою очередь, стабилизации скин-слоя способствуют штилевые условия (условие формирования свободной конвекции), облачность (Нелепо и др., 1983), а также процессы энергообмена океана с атмосферой (Лебедев и др., 1994). Причем перепад температуры в нем варьируется от 0.2 до 2.4°C (термодинамическая температура поверхности воды оказывается ниже термодинамической температуры воды) (Лебедев и др., 1994 и ссылки в данной статье).

В то же время, в холодный период года (январь–март) при скоростях ветра от 0 до 10 м/с наблюдается положительная разница показаний (показания дрифтера ниже, чем спутниковые измерения). Максимальные положительные значения dT ($+0.3...+0.4^{\circ}\text{C}$) имеют место в январе–феврале, скорости ветра при этом достигают 8–12 м/с. Большая (положительная) разница показаний приходится на осенний период при скоростях ветра от 6 до 12 м/с.

Если более подробно рассмотреть временной ход показаний по спутниковым и контактными

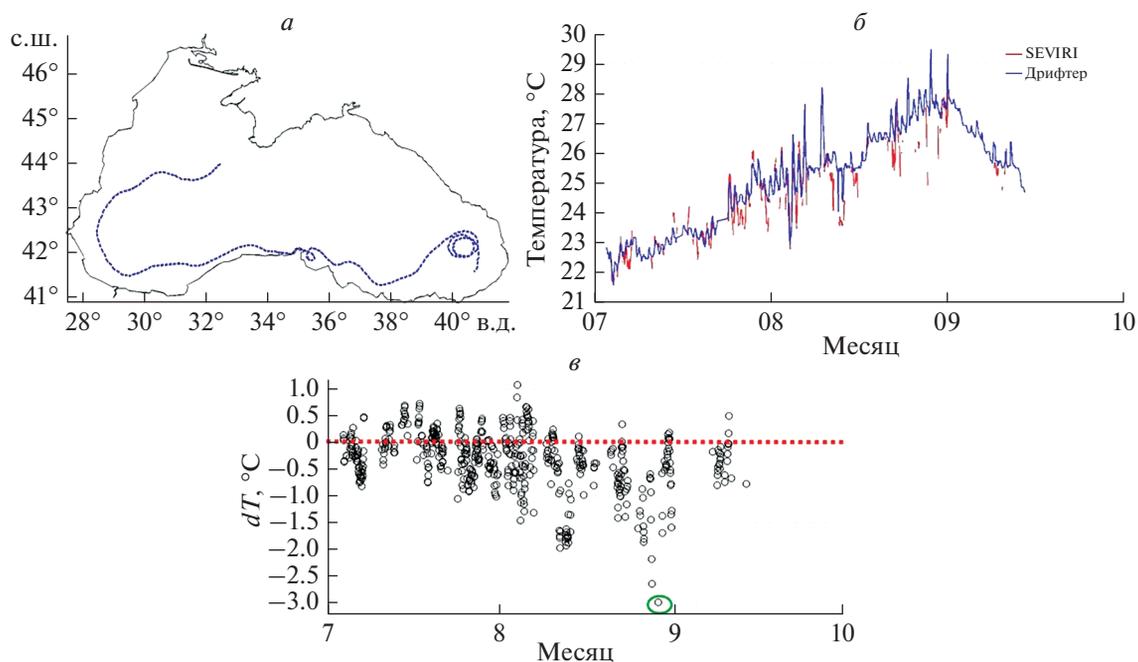


Рис. 4. *а* – Траектория термодрифтёра № 56092; *б* – суточный ход температуры на горизонте 0.2 м по данным термодрифтёра № 56092 за период с 3.07.2006 по 19.09.2006 (синяя линия) и суточный ход ТПМ по интерполированным данным SEVIRI за соответствующий период (красная линия); *в* – график dT по данным дрifterа № 56092.

данным, а также разницу средних значений (см. табл. 1), то можно отметить ряд случаев, когда ТПМ по спутниковым данным оказывалась ниже, чем температура по данным термодрифтёров. Например, разница средних значений отрицательна для дрifterов №№ 34253, 40418, 40445, 56092, 248990. Дрифтёры №№ 40418 и 40445 функционировали в июле–августе, №№ 56092 и 56093 работали в июле–сентябре, для дрifterа № 34253 случаи, когда показания температуры оказались выше по спутниковым данным, имели место с мая по август, а для № 248990 такие случаи периодически встречаются с конца марта до конца мая. Следует отметить также, что для дрifterа № 56092 в июле, августе и сентябре в ряде случаев показания дрifterа были существенно выше показаний SEVIRI. Таким образом, показания ряда дрifterов в тёплый период года оказываются выше спутниковых данных.

Остановимся детально на временном ходе температуры для дрifterа № 56092 и соответствующих значениях ТПМ по данным SEVIRI. На рис. 4, *а* представлена траектория этого дрifterа, а графики рис. 4, *б* отражают временной ход температуры по данным этого дрifterа (синяя линия) и по данным SEVIRI (красная линия) за соответствующий период времени в соответствующих точках.

Рассматриваемый дрifter функционировал в Черном море с 3.07.2006 по 19.09.2006, т.е. в тёплый период года. Разница средних значений для

сравниваемых массивов принимает отрицательные значения (см. табл. 1). Рассчитанная dT для него показала, что из 560 значений (для точек, где была определена температура и по спутниковым, и по контактными данным) 411 имеют отрицательные значения (рис. 4, *в*). Наибольшая разница в значениях достигает $\sim 3^\circ\text{C}$ (28.08.2006, точка обведена зеленым эллипсом). Модуль скорости ветра в данной точке не превышал 3 м/с. Для большинства случаев с отрицательной разностью температур модуль скорости ветра находился в диапазоне 6–8 м/с. Таким образом, сравниваемые массивы данных отображают общую картину, полученную на диаграмме рис. 3, *а*.

На диаграмме рис. 3, *б*, отображающей зависимость dT от модуля скорости ветра и часа суток для тёплого периода года (с мая по август), хорошо видно, что отрицательные dT ($-0.15\dots-0.05^\circ\text{C}$) расположены в диапазоне низких скоростей ветра (от 0 до 7 м/с) и приходится на вторую половину суток и ночное время. Именно в это время суток наблюдается пик дневного прогрева (Rubakina et al., 2019). Минимальные по модулю значения dT приходится на период с 5.00 до 11.00, что соответствует временному интервалу ночной конвекции, которая разрушает скин-слой. При совсем слабых ветрах (0–2 м/с) эффект холодной пленки наблюдается на протяжении всех суток.

Положительные значения dT принимает при скоростях ветра от 8 м/с и выше, в дневные часы. Максимальные положительные dT (от $+0.1^\circ$ до

+0.15°) приходится на первую половину суток (с 9.00 до 13.00) при скоростях ветра от 5 до 11 м/с. Положительные dT также проявляются и в ночные часы при скоростях ветра более 9 м/с. В диапазоне скоростей ветра 7 м/с и выше dT положительны в течение всех суток. Такое распределение dT в данном случае можно объяснить рядом факторов: разрушением скин-слоя; подповерхностным выхолаживанием вод в ходе штормового перемешивания; отрывом капель от поверхности, которые могут влиять на атмосферную коррекцию; появлением барашков и пены (пузырьков воздуха) на поверхности, которые оказывают влияние на данные сканера SEVIRI (Nicolòs et al., 2007).

Схожие результаты освещены в работе (Murray et al., 2000). Для дневных измерений влияние дневного термодинамика преобладает при низких скоростях ветра, при этом поверхностные воды практически всегда имеют более высокую температуру, чем объемная температура для скоростей ветра меньше 4 м/с. Однако этот явный теплый скин-слой существует в диапазоне скоростей ветра от 4 до 7 м/с для наблюдений с низким несолнечным потоком тепла. Например, при скорости ветра ~ 7 м/с, т.е. скорости ветра, которой должно быть достаточно для перемешивания верхнего метрового слоя вод океана, нулевые или положительные ΔT являются характеристикой несолнечного теплового потока < 150 Вт/м² (Murray, et al., 2000). Теплый скин-эффект говорит о том, что чистый приповерхностный тепловой поток направлен из атмосферы в океан (поглощение поверхностью поступающей солнечной энергии превосходит поднимающееся длинноволновое излучение). Это вполне соответствует $\sim 25\%$ солнечного теплового потока (обычно ~ 600 Вт/м² в 10.30 утра), который поглощается в скин-слое. Из этого следует большая толщина скин-слоя, чем ожидалось для этой скорости ветра, что может являться результатом того, что турбулентное перемешивание подавляется очень высоким числом Ричардсона в нескольких верхних миллиметрах из-за поглощения солнечного излучения (Simpson et al., 1981) (аналогично подавлению производства турбулентной кинетической энергии в более общих схемах перемешанного слоя (Kantha et al., 1994)).

Зависимость перепада температуры в приповерхностном слое от ветра, величины полного потока тепла, температуры воздуха и разности температур воздуха и ТПМ

Рассмотрим теперь зависимость перепада температуры в приповерхностном слое от таких факторов, как полный поток тепла, поток скрытого тепла, относительная влажность, температура

воздуха, разность температуры воздуха и ТПМ и скорость ветра.

На рис. 5, а представлена диаграмма, отображающая связь dT с полным потоком тепла и скоростью ветра. Хорошо видно, что при скоростях ветра до 7 м/с dT имеет преимущественно отрицательные значения практически независимо от величины суммарного потока тепла и его знака. Максимальные по модулю отрицательные dT приходятся на штилевые условия (0–2 м/с). С увеличением скорости ветра (от 7 м/с и выше) модульные значения dT стремятся к минимальным величинам, что можно объяснить разрушением скин-слоя (ослаблением отрицательного скин-эффекта). Максимальные положительные значения dT наблюдаются при больших отрицательных полных потоках тепла (т.е. когда происходит охлаждение моря) при скоростях ветра более 4 м/с, что согласуется с результатами, представленными выше: $dT > 0$ преимущественно в осенне-весенний период года, а также при сильных ветрах. График зависимости средних значений dT от величины полного потока тепла в интервале скоростей ветра 0–8 м/с, представленный на рис. 5, б, показывает, что хотя, в целом, и имеется некоторая тенденция к снижению величины dT при росте полного потока тепла, ярко выраженной зависимости от его величины не наблюдается. При этом при величине полного потока тепла в диапазоне от -50 до $+150$ Вт/м² зависимость величины dT от скорости ветра (в диапазоне 0–8 м/с) практически линейная (рис. 5, в): ее величина, с учетом знака, увеличивается от $\sim (-0.25^\circ\text{C})$ практически до 0°C . Абсолютное же значение (модуль) dT снижается, что может свидетельствовать об уменьшении скин-эффекта и разрушении скин-слоя с возрастанием скорости ветра. Полученная зависимость согласуется с результатами работ (Акимов и др., 2014; Лебедев и др., 1994): наблюдается линейная зависимость уменьшения dT с увеличением скорости ветра.

Рассмотрим теперь зависимость dT от скорости ветра и температуры воздуха, диаграмма которой представлена на рис. 5, г. Максимальные положительные dT (от $+0.4$ до $+0.7^\circ\text{C}$) находятся в диапазоне минимальных температур воздуха (от -1 до $+8^\circ\text{C}$ при всех рассматриваемых скоростях ветра (0–12 м/с), т.е. во время выхолаживания поверхности атмосферой.

dT принимает отрицательные значения, когда температура воздуха достигает $+18^\circ\text{C}$. С ее дальнейшим ростом абсолютные значения dT также увеличиваются. Максимальные по модулю отрицательные dT имеют место при наиболее интенсивном прогреве при температуре $+27^\circ\text{C}$ и выше и скоростях ветра до 8 м/с. В это время поток тепла направлен в море, что приводит к усилению скин-эффекта. Средняя зависимость dT от темпе-

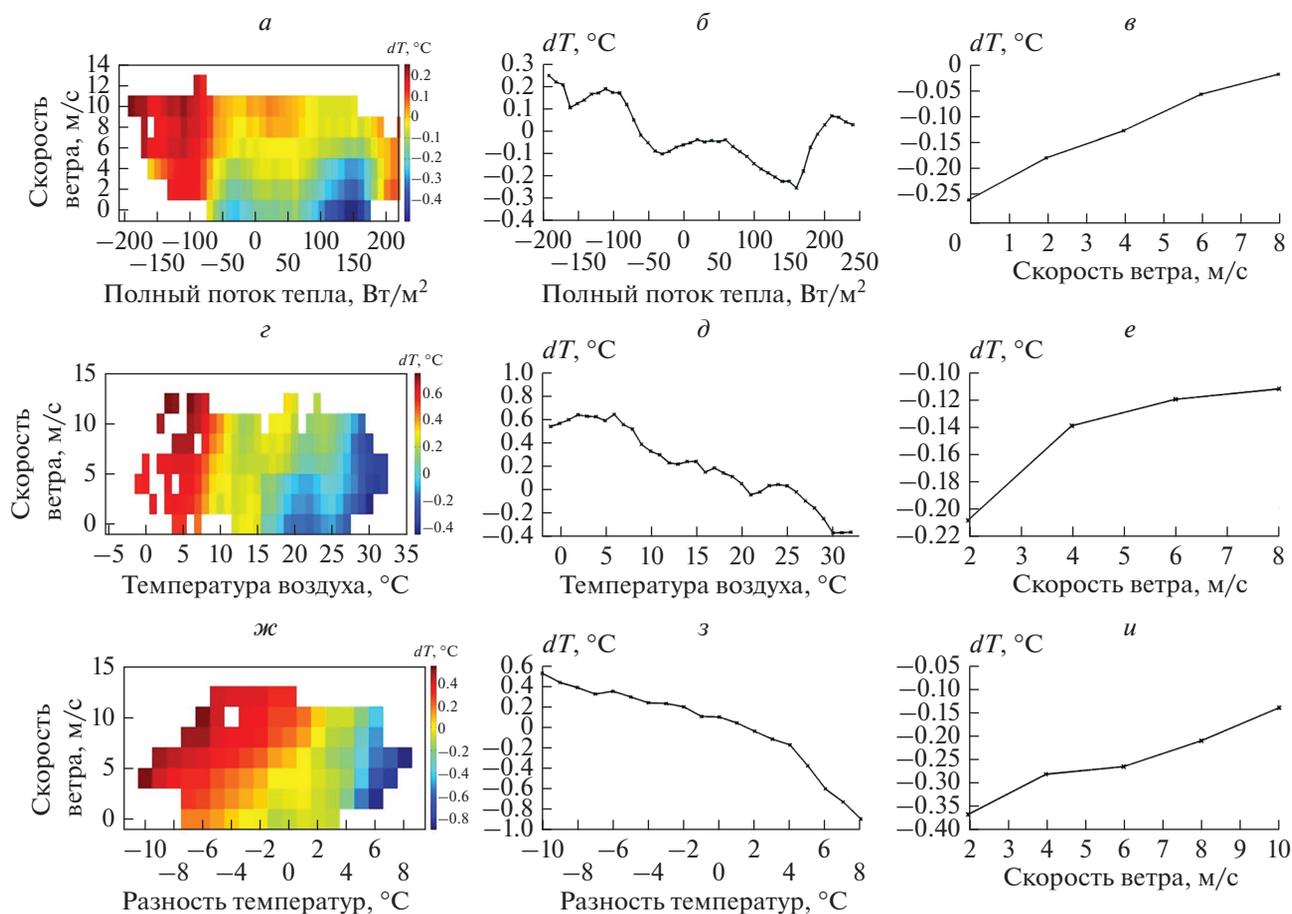


Рис. 5. *а* – Диаграмма зависимости dT от полного потока тепла и скорости ветра в теплый период года (май–август); *б* – график зависимости dT от величины полного потока тепла в интервале скоростей ветра 0–8 м/с; *в* – график зависимости dT от скорости ветра в диапазоне величин полного потока тепла в диапазоне от -50 до $+150$ Вт/м²; *г* – диаграмма зависимости dT от температуры воздуха и скорости ветра; *д* – график зависимости dT от температуры воздуха в интервале скоростей ветра от 0 до 8 м/с; *е* – график зависимости dT от скорости ветра в интервале температур от $+25$ до $+30$ °С; *ж* – диаграмма зависимости dT от разности температуры воздуха и ТПМ и скорости ветра; *з* – графики зависимости dT от разности температуры воздуха и ТПМ в интервале скоростей ветра от 0 до 10 м/с; *и* – график зависимости dT от скорости ветра в диапазоне разности температур температур $+1...+7$ °С.

ратуры воздуха в диапазоне скоростей ветра от 0 до 8 м/с представлена на рис. 5, *д*. При температуре воздуха $\sim(+20$ °С) и выше dT становится отрицательной и начинает возрастать (по модулю). Максимальная отрицательная dT (-0.26 °С) достигается при наибольшем значении температуры воздуха $+29$ °С. График (рис. 5, *е*) отображает взаимосвязь dT со скоростью ветра в диапазоне температур от $+25$ до $+30$ °С. Для температурного интервала от $+25$ до $+30$ °С абсолютная величина dT снижается при увеличении скорости ветра от 2 м/с и выше.

На рис. 5, *ж* представлена диаграмма, отображающая зависимость перепада температуры в приповерхностном слое от скорости ветра и разности температуры воздуха и ТПМ. Максимальные положительные dT ($+0.4...+0.5$ °С) наблюдаются в случае, когда температура воздуха значи-

тельно ниже, чем ТПМ (на $6-10$ °С), т.е. в холодный период года, при любых скоростях ветра. Как раз в этот период происходит остывание вод, а поток тепла направлен от морской поверхности в атмосферу, что согласуется с картиной распределения, полученной на диаграмме рис. 5, *а*.

С уменьшением этой разницы до $2-4$ °С величина dT уменьшается и стремится к своим минимальным по модулю значениям, при этом появляется явно выраженная зависимость от скорости ветра: с увеличением скорости ветра dT увеличивается. Например, при одной и той же разности в 2 °С, когда ТПМ выше температуры воздуха, при скорости ветра 2 м/с dT составляет $+0.06$ °С, при скорости ветра 4 м/с эта величина достигает уже $+0.1$ °С, а при 6 м/с – $+0.2$ °С (рис. 5, *ж*). Знак dT меняется для штилевых условий, когда разность между температурой воздуха и ТПМ стремится к

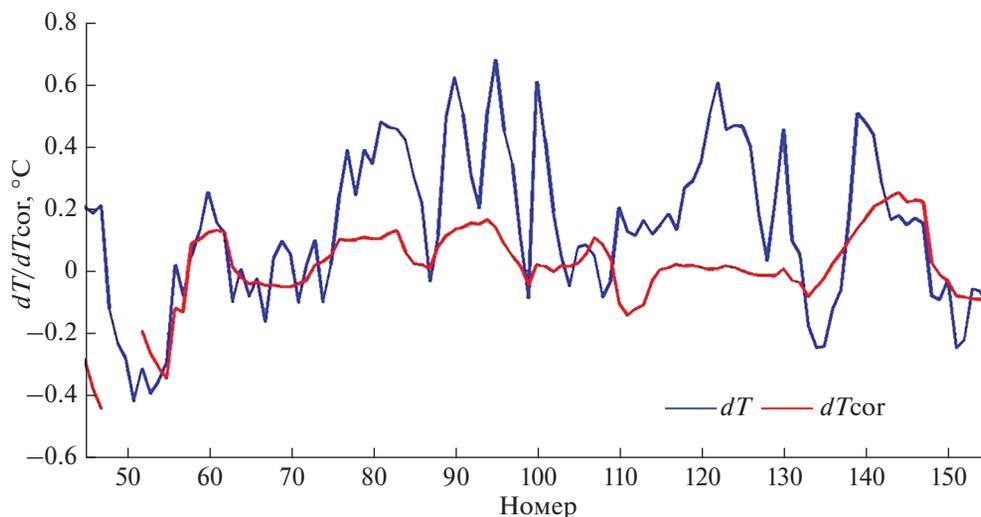


Рис. 6. Величины dT (синяя линия) и dT_{cor} (красная линия).

минимальным значениям ($-1...0^{\circ}\text{C}$). Максимальные отрицательные значения dT имеют место в условиях, когда температура воздуха становится выше ТПМ на $4-8^{\circ}\text{C}$, наибольшие отрицательные величины dT $-0.8...-0.9^{\circ}\text{C}$ достигаются при разнице температур в $6-8^{\circ}\text{C}$ и скоростях ветра от 2 до 6 м/с. Следует отметить, что с увеличением скорости ветра для области отрицательных значений dT , ее абсолютная величина снижается.

Зависимость dT от разности температуры воздуха и ТПМ в интервале скоростей $0-8$ м/с представлена на графике рис. 5, з. При увеличении разности температур воздуха и ТПМ, величина dT (и ее модуль) уменьшается. Когда температура воздуха становится выше ТПМ, dT меняет свой знак на “-”, начинается плавное увеличение абсолютного значения dT . Максимальные отрицательные значения dT наблюдаются, когда разность температур достигает 8°C . График зависимости dT от скорости ветра при разности температур воздуха и ТПМ в диапазоне от $+1$ до $+7^{\circ}\text{C}$ (рис. 5, и) носит схожий характер с аналогичными графиками, рассматриваемыми для зависимости dT от потоков тепла и температуры воздуха (рис. 5, в и е соответственно). Приведенные диаграммы показывают, что перепад температуры в скин-слое может иметь различный знак, который зависит от разности температур воздуха и ТПМ, определяющей направления потока тепла.

Рассмотрим для примера, как согласуются между собой величины dT , получаемые из исходных данных, и эти же величины, рассчитанные с учетом разности температур воздуха и ТПМ и ветра — dT_{cor} . На рис. 6 представлены фрагмент временного хода величины dT и dT_{cor} для дрейфера № 34860.

Значения dT_{cor} из сглаженного массива, который использовался для построения диаграммы рис. 5, ж, интерполировались на координаты каждого измерения, отнимались от исходных значений ТПМ (также проинтерполированные на координаты дрейферов). Далее вычислялась разность показаний ТПМ с учетом выполненной поправки и исходных данных дрейферов на первом горизонте (0.2 м).

Данный график наглядно иллюстрирует наличие численных различий, однако на качественном уровне эти сравниваемые массивы совпадают достаточно неплохо (рост и снижение величин dT_{cor} и dT носит схожий характер). СКО для части массива, отображенного на графике (рис. 6) dT , составляет 0.25°C , для dT_{cor} — 0.13°C .

Массивы dT_{cor} можно использовать для корректировки данных SEVIRI с учетом влияния на величину разности показаний SEVIRI и дрейферов разности температуры воздуха и ТПМ и скорости ветра. Зависимость dT от этих параметров подробно рассмотрена выше.

Влияние скрытых потоков тепла, относительной влажности воздуха и ветра на величину перепада температуры в приповерхностном слое

Проведенный анализ показывает, что на величину dT влияет не только разница температуры, но и потоки скрытого тепла (испарение), которые зависят от скорости ветра, относительной влажности, температуры атмосферы и океана. Зависимость dT от скорости ветра и величины потоков скрытого тепла представлена на диаграмме рис. 7, а. С возрастанием (по модулю) величины потока скрытого тепла значение dT уменьшается (с учетом знака). При величинах потока скрытого тепла

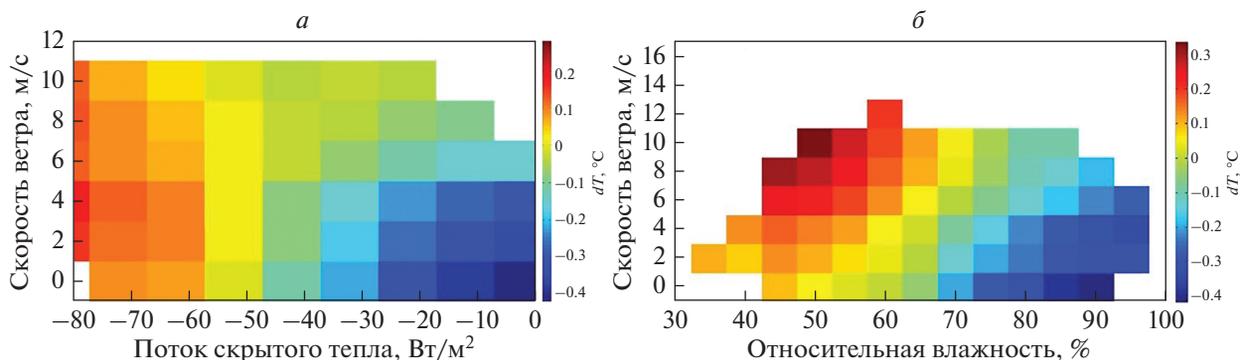


Рис. 7. *а* – Диаграмма зависимости dT от величины потока скрытого тепла и скорости ветра (май–август); *б* – диаграмма зависимости dT от относительной влажности и скорости ветра (май–август).

$\sim(-50)$ Вт/м² и ниже (по модулю) величина dT становится отрицательной, а ее абсолютные значения возрастают в диапазоне скоростей ветра от 0 до 10 м/с. Положительные значения dT принимает при низких скоростях ветра в интервале значений потока скрытого тепла $-80\dots-50$ Вт/м². Максимальные по модулю отрицательные dT наблюдаются при минимальных величинах потоков скрытого тепла, т.е. при наименее интенсивном испарении. Такой результат, на первый взгляд, противоречит описанному в предыдущем разделе, т.к. в летних условиях испарение минимально.

Однако проведенный анализ показал, что зависимость на рис. 7, *а* прежде всего связана с изменением относительной влажности (рис. 7, *б*). При больших значениях относительной влажности (70–90%), когда испарение минимально (величины потока скрытого тепла также минимальны), с увеличением скорости ветра абсолютная величина dT снижается. Максимальные отрицательные значения dT $-0.3\dots-0.4^\circ\text{C}$ имеют место при относительной влажности 85–90% и скоростях ветра до 4 м/с, когда процесс испарения наименее интенсивен.

Водяной пар является одним из наиболее важных факторов атмосферной коррекции ИК-измерений. Столь выраженная зависимость dT от относительной влажности, вероятно, связана с погрешностями атмосферной коррекции, для которой поправка, учитывающая влажность, является одной из ключевых (Emery et al., 1994).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведен сравнительный анализ данных высокого временного разрешения сканера SEVIRI и термопрофилирующих дрейфующих буев за многолетний период. Впервые проведено исследование суточного и сезонного хода перепада температуры dT в поверхностном слое и его зависимости от скорости ветра,

потоков тепла, относительной влажности, температуры воздуха и разности температуры воздуха и температуры поверхностного слоя моря. Выполненное исследование дополняет и расширяет результаты предыдущей работы (Акимов и др., 2014), посвященной данной тематике.

Сравнение временной изменчивости (вычисление СКО, разницы средних значений, коэффициентов корреляции, коэффициентов регрессии) показало хорошее согласование сопоставляемых данных. По общим массивам для сравниваемых данных коэффициент корреляции для всех дрейфтеров составляет 0.99, среднеквадратичное отклонение -0.57°C , коэффициент регрессии ~ 1 , разность средних значений $-(-0.06)^\circ\text{C}$.

Анализ зависимости величины перепада температур в приповерхностном слое (dT) от различных факторов позволил определить следующие зависимости. В теплый период года, когда полный поток тепла направлен из атмосферы в море, происходит прогрев приповерхностного слоя, значения температуры воздуха велики (от $+18^\circ\text{C}$ и выше), при малых скоростях ветра (до 4–6 м/с) dT принимает максимальные по модулю отрицательные значения ($-0.8\dots-0.9^\circ\text{C}$), что является проявлением отрицательного скин-эффекта (наличием “холодной пленки”). С увеличением скорости ветра происходит снижение абсолютных значений dT , связанное с разрушением скин-слоя. В холодный период года, когда происходит остывание вод приповерхностного слоя, полный поток тепла направлен из моря в атмосферу, температура воздуха минимальна, dT принимает максимальные положительные значения ($+0.4\dots+0.7^\circ\text{C}$). Зависимость dT от разности температур полностью согласуется с вышеизложенной картиной.

Зависимость dT от времени суток следующая. Максимальные по модулю отрицательные значения dT ($-0.15\dots-0.05^\circ\text{C}$) при малых скоростях ветра приходится на вторую половину суток, ко-

гда дневной прогрев достигает наибольшей интенсивности, и скин-слой наиболее развит. В утренние часы и при высоких значениях скорости ветра абсолютные значения dT минимальны, что связано с разрушением скин-слоя вследствие ночной конвекции и действия ветра.

Также наблюдается зависимость dT от потоков скрытого тепла и непосредственно связанной с ними относительной влажности. Наибольшие отрицательные по модулю значения dT (при низкой скорости ветра) наблюдаются при минимальных значениях потоков скрытого тепла ($\sim(-50)$ Вт/м² и ниже), процесс испарения наименее интенсивен, а относительная влажность максимальна (85–90%). Такая хорошо выраженная зависимость dT от относительной влажности может быть связана с недостатками проведенной атмосферной коррекции, для которой поправка, учитывающая влажность – одна из самых существенных. Следовательно, определив зависимость dT от влажности, возможно рассчитать более точные поправочные коэффициенты, т.е. выполнить атмосферную коррекцию для данных SEVIRI с учетом особенностей для района Черного моря.

Результаты, полученные в настоящем исследовании, в дальнейшем позволят понять механизмы формирования и разрушения термического скин-слоя, а также зависимость этих механизмов от всех выше перечисленных факторов, что в перспективе возможно использовать при коррекции данных инфракрасных измерений для района Черного моря.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Валидация данных сканера SEVIRI и данных термодрифтеров выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-35-90084. Оценка суточного хода температуры выполнена в рамках гранта РФФИ 20-35-70034. Исследование зависимости перепада температуры в приповерхностном слое от различных факторов выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Е.А., Станичный С.В., Полонский А.Б. Использование данных сканера SEVIRI для оценки температуры поверхностного слоя Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 6. С. 37–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22760986>
- Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Дистанционная диагностика пленочного слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 10. С. 1089–1089.
- Лебедев Н.Е., Савоськин В.М., Станичный С.В. Определение поверхностной температуры и перепада температуры в скин-слое с борта движущегося судна по данным ИК-измерений // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 2. С. 83–88.
- Нелено Б.А., Сагдеев Р.Ж. Спутниковая гидрофизика. “Наука”, 1983.
- Плотников Е.В., Ратнер Ю.Б. Сопоставление температуры поверхности Черного моря, полученной по данным ИЗС NOAA, с измерениями дрейфтеров в 2005–2006 годах // Системы контроля окружающей среды. 2007. С. 115.
- Рубакина В.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. Сезонный и суточный ход температуры вод Черного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буев // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 268–281. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281>
- Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев В.С. Развитие средств и методов дрейфтерной технологии применительно к проблеме изучения Черного моря // Океанология. 2008. Т. 48. № 1. С. 149–158.
- Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев В.С. Анализ результатов натурных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 9–32.
- Bondur V. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
- Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book Waste Water – Evaluation and Management, ISBN 978-953-307-233-3 Croatia: InTech, 2011. P. 155–180. URL: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>
- Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Donlon C.J., Nightingale T.J., Sheasby T., Turner J., Robinson I.S., Emery W.J. Implications of the oceanic thermal skin temperature deviation at high wind speed // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. № 16. P. 2505–2508. <https://doi.org/10.1029/1999GL900547>
- Efimov V.V., Barabanov V.S. Breeze circulation in the black-sea region // Physical Oceanography. 2009. V. 19. № 5. P. 289–300. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9054-6>
- Efimov V.V., Krupin A.V. Breeze circulation in the Black Sea region // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41. № 4. P. 240–246. <https://doi.org/10.3103/S1068373916040026>
- Emery W.J., Yu Y., Wick G.A., Schuessel P., Reynolds R.W. Correcting infrared satellite estimates of sea surface temperature for atmospheric water vapor attenuation // J. Geophys. Res.: Oceans. 1994. V. 99. № C3. P. 5219–5236.
- Filipiak M.J., Merchant C.J., Kettle H., Borgne P.L. An empirical model for the statistics of sea surface diurnal warm-

- ing // *Ocean Sci.* 2012. V. 8. Iss. 2. P. 197–209.
<https://doi.org/10.5194/os-8-197-2012>
- Gentemann C.L., Minnett P.J., Le Borgne P., Merchant C.J.* Multi-satellite measurements of large diurnal warming events // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. Iss. 22. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1029/2008GL035730>
- Gentemann C.L., Minnett P.J.* Radiometric measurements of ocean surface thermal variability // *J. J. Geophys. Res.*: 2008. V. 113. № C8.
<https://doi.org/10.1029/2007JC004540>
- Gentemann C.L., Minnett P.J., LeBorgne P., Merchant C.J.* Multi-satellite measurements of large diurnal warming events // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 22.
<https://doi.org/10.1029/2008GL035730>
- Grodsky S.A., Kudryavtsev V.N., Bentamy A., Carton J.A., Chapron B.* Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry? // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. № 12.
<https://doi.org/10.1029/2012GL052091>
- Hepplewhite C.L.* Remote observation of the sea surface and atmosphere: the oceanic skin effect // *International J. Remote Sensing.* 1989. V. 10. № 4–5. P. 801–810.
<https://doi.org/10.1080/01431168908903920>
- Jessup A.T., Zappa C.J., Loewen M.R., Hesany V.* Infrared remote sensing of breaking waves // *Nature.* 1997. V. 385. № 6611. P. 52–55.
- Kantha L.H., Clayton C.A.* An improved mixed layer model for geophysical applications // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 1994. V. 99. № C12. P. 25235–25266.
<https://doi.org/10.1029/94JC02257>
- Katsaros K.B., Liu W.T., Businger J.A., Tilman J.E.* Heat transport and thermal structure in the interfacial boundary layer measured in an open tank of water in turbulent free convection // *J. Fluid Mech.* 1977. V. 83. № 2. P. 311–335.
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004. P. 53–58.
- Mammen T.C., von Bosse N.* STEP-A temperature profiler for measuring the oceanic thermal boundary layer at the ocean–air interface // *J. Atmospheric and Oceanic Technology.* 1990. V. 7. № 2. P. 312–322.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1990\)007<0312:STP-FMT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1990)007<0312:STP-FMT>2.0.CO;2)
- Marullo S., Santoleri R., Banzon V., Evans R.H., Guarracino M.* A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2010. V. 115. Iss. 5. P. 1–18.
<https://doi.org/10.1029/2009JC005466>
- Marullo S., Minnett P.J., Santoleri R., Tonani M.* The diurnal cycle of sea-surface temperature and estimation of the heat budget of the Mediterranean Sea // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2016. V. 121. № 11. P. 8351–8367.
<https://doi.org/10.1002/2016JC012192>
- McAlister E.D., McLeish W.* Heat transfer in the top millimeter of the ocean // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74. № 13. P. 3408–3414. DOI: 10.1029/2007JC004521
- Merchant C.J., Filipiak M.J., Le Borgne P., Roquet H., Autret E., Piollé J.F., Lavender S.* Diurnal warm-layer events in the western Mediterranean and European shelf seas // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. Iss. 4. P. 1–4.
<https://doi.org/10.1029/2007GL033071>
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nat. Geosci.* 2015. V. 8. № 8. P. 615–619.
- Minnett P.J., Knuteson R.O., Best F.A., Osborne B.J., Hanafin J.A., Brown O.B.* The marine-atmospheric emitted radiance interferometer: A high-accuracy, seagoing infrared spectroradiometer // *J. Atmospheric and Oceanic Technology.* 2001. V. 18. № 6. P. 994–1013.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0994:TMAERI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0994:TMAERI>2.0.CO;2)
- Murray M.J., Allen M.R., Merchant C.J., Harris A.R., Donlon C.J.* Direct observations of skin-bulk SST variability // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 8. P. 1171–1174.
<https://doi.org/10.1029/1999GL011133>
- Niclòs R., Caselles V., Valor E., Coll C.* Foam effect on the sea surface emissivity in the 8–14 μm region // *J. J. Geophys. Res.: Oceans.* 2007. V. 112. № C12.
<https://doi.org/10.1029/2007JC004521>
- Rubakina V.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Seasonal Variability of the Diurnal Cycle of the Black Sea Surface Temperature from the SEVIRI Satellite Measurements // *Physical Oceanography.* 2019. V. 26. № 2. P. 157–169.
<https://doi.org/10.22449/1573-160X-2019-2-157-169>
- Saunders P.M.* Aerial measurement of sea surface temperature in the infrared // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. № 16. P. 4109–4117.
<https://doi.org/10.1029/JZ072i016p04109>
- Schluessel P., Emery W.J., Grassl H., Mammen T.* On the bulk-skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface temperature // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 1990. V. 95. № C8. P. 13341–13356.
<https://doi.org/10.1029/JC095iC08p13341>
- Simpson J.J., Dickey T.D.* The relationship between downward irradiance and upper ocean structure // *J. Physical Oceanography.* 1981. V. 11. № 3. P. 309–323.
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0309:TRB-DIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0309:TRB-DIA>2.0.CO;2)
- Ward B.* Near-surface ocean temperature // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2006. V. 111. № C2.
<https://doi.org/10.1029/2004JC002689>
- Ward B., Wanninkhof R., Minnett P.J., Head M.J.* SkinDeEP: A profiling instrument for upper-decameter sea surface measurements // *J. Atmospheric and Oceanic Technology.* 2004. V. 21. № 2. P. 207–222.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2004\)021<0207:SAPIFU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<0207:SAPIFU>2.0.CO;2)
- Woodcock A.H., Stommel H.* Temperatures observed near the surface of a fresh-water pond at night // *J. Meteorology.* 1947. V. 4. № 3. P. 102–103.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1947\)004<0102:TONTSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1947)004<0102:TONTSO>2.0.CO;2)

Characteristics of Seasonal and Diurnal Variability of the Thermal Skin Layer Based on Comparison of Satellite Measurements of SEVIRI and Temperature-Profiling Drifters Data

V. A. Rubakina¹, A. A. Kubryakov¹, and S. V. Stanichny¹

¹Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia

In present work, a comparative analysis of the SEVIRI scanner high temporal resolution data and temperature-profiling drifters data for a long-term period was carried out. The obtained values of the correlation coefficients, standard deviation, regression coefficients and the difference in mean values indicate a fairly good agreement of the compared data. The dependence of skin–bulk sea–surface temperature difference dT on the seasons and time of day, as well as on the wind speed, heat fluxes, relative humidity, air temperature, air temperature and sea surface temperature difference has been investigated. During the warm period of the year, when the air temperatures are maximum ($+18^{\circ}\text{C}$ and above), and the total heat flux is directed to the sea, dT takes maximum negative values ($-0.8\dots-0.9^{\circ}\text{C}$), which is primarily due to the presence of a skin layer (cool skin). As the wind speed increases, the absolute values of dT decrease, which is associated with the destruction of the skin layer. In the cold season, when the total heat flux is directed from the ocean to the atmosphere and the air temperature is at its minimum, dT reaches its maximum positive values. During the day, the largest negative dT values fall on the second half of the day – during the period of the greatest diurnal warming. Night convection destroys the skin layer, and the dT absolute values decrease. Dependence of dT on latent heat fluxes and relative humidity has been obtained. The largest dT are observed at minimum latent heat fluxes and relative humidity of 85–90%.

Keywords: diurnal temperature variation, temperature-profiling drifters, SEVIRI, Black Sea, comparative analysis, skin layer

REFERENCES

- Akimov E.A., Stanichnyj S.V., Polonskij A.B. Ispol'zovanie dannyh skanera SEVIRI dlya ocenki temperatury poverhnostnogo sloya Chernogo morya [Using SEVIRI scanner data to estimate the temperature of the Black Sea surface layer] // Morskoy gidrofizicheskij zhurnal. 2014. № 6. P. 37–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22760986> (In Russian).
- Bubukin I.T., Stankevich K.S. Distancionnaya diagnostika plenochnogo sloya morskoy poverhnosti v infrakrasnom diapazone [Remote sensing of a film layer of marine surface in the IR spectral range] // Radiotekhnika i elektronika. 2012. V. 57. № 10. P. 1089–1089 (In Russian).
- Bondur V. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
- Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book Waste Water – Evaluation and Management, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>
- Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Donlon C.J., Nightingale T.J., Sheasby T., Turner J., Robinson I.S., Emery W.J. Implications of the oceanic thermal skin temperature deviation at high wind speed // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. № 16. P. 2505–2508. <https://doi.org/10.1029/1999GL900547>
- Efimov V.V., Barabanov V.S. Breeze circulation in the black-sea region // Physical Oceanography. 2009. V. 19. № 5. P. 289–300. DOI: 10.1007/s11110-010-9054-6
- Efimov V.V., Krupin A.V. Breeze circulation in the Black Sea region // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41. № 4. P. 240–246. <https://doi.org/10.3103/S1068373916040026>
- Emery W.J., Yu Y., Wick G.A., Schluessel P., Reynolds R.W. Correcting infrared satellite estimates of sea surface temperature for atmospheric water vapor attenuation // J. Geophys. Res.: Oceans. 1994. V. 99. № C3. P. 5219–5236.
- Filipiak M.J., Merchant C.J., Kettle H., Borgne P.L. An empirical model for the statistics of sea surface diurnal warming // Ocean Science. 2012. V. 8. Iss. 2. P. 197–209. DOI: 10.5194/os-8-197-2012
- Gentemann C.L., Minnett P.J., Le Borgne P., Merchant C.J. Multi-satellite measurements of large diurnal warming events // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. Iss. 22. P. 1–6. DOI:10.1029/2008GL035730.
- Gentemann C.L., Minnett P.J. Radiometric measurements of ocean surface thermal variability // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № C8. DOI: 10.1029/2007JC004540
- Gentemann C.L., Minnett P.J., LeBorgne P., Merchant C.J. Multi-satellite measurements of large diurnal warming events // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. № 22. DOI: 10.1029/2008GL035730
- Grodsky S.A., Kudryavtsev V.N., Bentamy A., Carton J.A., Chapron B. Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry? // Geophys. Res. Lett.. 2012. V. 39. № 12. DOI: 10.1029/2012GL052091
- Hepplewhite C.L. Remote observation of the sea surface and atmosphere: the oceanic skin effect // International J. Remote Sensing. 1989. V. 10. № 4–5. P. 801–810. DOI: 10.1080/01431168908903920

- Jessup A.T., Zappa C.J., Loewen M.R., Hesany V.* Infrared remote sensing of breaking waves // *Nature*. 1997. V. 385. № 6611. P. 52–55.
- Kantha L.H., Clayson C.A.* An improved mixed layer model for geophysical applications // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1994. V. 99. № C12. P. 25235–25266. <https://doi.org/10.1029/94JC02257>
- Katsaros K.B., Liu W.T., Businger J.A., Tilman J.E.* Heat transport and thermal structure in the interfacial boundary layer measured in an open tank of water in turbulent free convection // *J. Fluid Mech.* 1977. V. 83. № 2. P. 311–335.
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004. P. 53–58.
- Lebedev N.E., Savos'kin V.M., Stanichnyj S.V.* Opredelenie poverhnostnoj temperatury i perepada temperatury v skin-sloe s borta dvizhushchegosya sudna po dannym IK-izmerenij [Determination of the surface temperature and temperature drop in the skin layer from the board of the moving vessel according to IR measurements] // *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*. 1994. № 2. P. 83–88 (In Russian).
- Mammen T.C., von Bosse N.* STEP-A temperature profiler for measuring the oceanic thermal boundary layer at the ocean–air interface // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 1990. V. 7. № 2. P. 312–322. DOI: 10.1175/1520-0426(1990)007<0312:STPFMT>2.0.CO;2
- Marullo S., Minnett P.J., Santoleri R., Tonani M.* The diurnal cycle of sea-surface temperature and estimation of the heat budget of the Mediterranean Sea // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2016. V. 121. № 11. P. 8351–8367. DOI: 10.1002/2016JC012192
- Marullo S., Santoleri R., Banzon V., Evans R.H., Guarracino M.* A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2010. V. 115. Iss. 5. P. 1–18. DOI: 10.1029/2009JC005466.
- McAlister E.D., McLeish W.* Heat transfer in the top millimeter of the ocean // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74. № 13. P. 3408–3414. DOI: 10.1029/JC074i013p03408
- Merchant C.J., Filipiak M.J., Le Borgne P., Roquet H., Autret E., Piollé J.F., Lavender S.* Diurnal warm-layer events in the western Mediterranean and European shelf seas // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. Iss. 4. P. 1–4. DOI: 10.1029/2007GL033071
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nat. Geosci.* 2015. V. 8. № 8. P. 615–619.
- Minnett P.J., Knuteson R.O., Best F.A., Osborne B.J., Hanafin J.A., Brown O.B.* The marine-atmospheric emitted radiance interferometer: A high-accuracy, seagoing infrared spectroradiometer // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001. V. 18. № 6. P. 994–1013. DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<0994:TMAERI>2.0.CO;2
- Murray M. J. Allen M.R., Merchant C.J., Harris A.R., Donlon C.J.* Direct observations of skin–bulk SST variability // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 8. P. 1171–1174. DOI: 10.1029/1999GL011133
- Nelepo B.A., Sagdeev R.Zh.* Sputnikovaya gidrofizika [Satellite hydrophysics]. “Nauka”, 1983 (In Russian).
- Niclòs R., Caselles V., Valor E., Coll C.* Foam effect on the sea surface emissivity in the 8–14 μm region // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2007. V. 112. № C12. DOI: 10.1029/2007JC004521
- Plotnikov E.V., Ratner Yu.B.* Sopostavlenie temperatury poverhnosti Chernogo morya, poluchenoj po dannym IZS NOAA, s izmereniyami drifterov v 2005–2006 godah [Comparison of the Black Sea surface temperature data obtained from NOAA with the drifters measurements in 2005–2006] // *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*. 2007. P. 115 (In Russian).
- Rubakina V.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Seasonal Variability of the Diurnal Cycle of the Black Sea Surface Temperature from the SEVIRI Satellite Measurements // *Physical Oceanography*. 2019. V. 26. № 2. P. 157–169. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-157-169
- Rubakina V.A., Kubryakov A.A., Stanichnyj S.V.* Sezonnij i sutochnyj hod temperatury vod Chyornogo morya po dannym termoprofiliruyushchih drejfuyushchih buyov [Seasonal and diurnal cycle of the Black Sea water temperature from temperature-profiling drifters data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 5. P. 268–281 (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281
- Saunders P.M.* Aerial measurement of sea surface temperature in the infrared // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. № 16. P. 4109–4117. DOI: 10.1029/JZ072i016p04109
- Schlüssel P., Emery W.J., Grassl H., Mammen T.* On the bulk-skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface temperature // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1990. V. 95. № C8. P. 13341–13356. DOI: 10.1029/JC095iC08p13341
- Simpson J.J., Dickey T.D.* The relationship between downward irradiance and upper ocean structure // *J. Physical Oceanography*. 1981. V. 11. № 3. P. 309–323. DOI: 10.1175/1520-0485(1981)011<0309:TRBDIA>2.0.CO;2
- Tolstosheev A.P., Lunev E.G., Motyzhev S.V.* Analiz rezul'tatov naturnyh eksperimentov s termoprofiliruyushchimi drejfuyushchimi buyami v Chernom more i drugih rajonah Mirovogo okeana [Analysis of the field experiments results with temperature-profiling drifters in the Black Sea and other World Ocean regions] // *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*. 2014. № 5. P. 9–32 (In Russian).
- Tolstosheev A.P., Lunev E.G., Motyzhev V.S.* Razvitie sredstv i metodov drifternoj tekhnologii primenitel'no k probleme izucheniya Chernogo morya [Development of drifter technology as applied to the Black Sea study] // *Okeanologiya*. 2008. V. 48. № 1. P. 149–158 (In Russian).
- Ward B.* Near-surface ocean temperature // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2006. V. 111. № C2. DOI: 10.1029/2004JC002689
- Ward B., Wanninkhof R., Minnett P.J., Head M.J.* SkinDeEP: A profiling instrument for upper-decameter sea surface measurements // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2004. V. 21. № 2. P. 207–222. DOI: 10.1175/1520-0426(2004)021<0207:SAPIFU>2.0.CO;2
- Woodcock A.H., Stommel H.* Temperatures observed near the surface of a fresh-water pond at night // *J. Meteorology*. 1947. V. 4. № 3. P. 102–103. DOI: 10.1175/1520-0469(1947)004<0102:TONTSO>2.0.CO;2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВЫЯВЛЕНИЕ ПАЛЕОСЕЙСМОДИСЛОКАЦИЙ В РАЙОНЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2021 г. С. Н. Неволин*

Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: geonec@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.08.2020 г.

Проведена оценка силы палеоземлетрясений территории двумя методами: по максимальному смещению четвертичных пород разрывами и параметрам кластических даек сейсмогенного генезиса. На основе использования архивных материалов космических съемок и изображений Google Earth обоснован метод поиска палеосейсмодислокаций. Проведены поиски сейсмических проявлений в пределах Южки-Токсовской зоны разломов. Обнаружено 40 сейсмогенных уступов, часть из них вскрыта канавами. Исследование уступов позволяет оценить силу землетрясений позднего и среднего голоцена данного района соответственно в 7.2 и 6.8 магнитуд. Изучено глубинное строение участка концентрации палеосейсмодислокаций методом спектрально-сейсморазведочного профилирования.

Ключевые слова: активные разломы, дистанционное зондирование, землетрясения, магнитуда, палеосейсмодислокации, спектрально-акустические измерения

DOI: 10.31857/S0205961421030064

ВВЕДЕНИЕ

Статья является логическим продолжением предыдущей (Неволин, 2015), в которой автор по материалам космической съемки выделил Южки-Токсовскую зону активных разломов и обосновал ее тектоническую активность в позднеплейстоценовое время. В настоящей статье приведены признаки тектонической активности данной территории в голоцене. Для поиска палеосейсмодислокаций используются материалы аэрокосмических съемок поверхности Земли.

Линеаментный анализ материалов аэрокосмических съемок является одним из методов выделения активных разломов. Анализ материалов космической съемки проводится по изменениям тона, различиям рисунка и структуры изображения. Одним из элементов изображения являются линеаменты — линейные градиенты плотности тона, часто представленные на снимке в виде нитевидных линий, имеющих ширину 20–30 м на местности. Линеаменты, как проявленные в ландшафте зоны трещиноватости, часто соответствуют разломам осадочного чехла и фундамента. Участки концентрации параллельных линеаментов образуют линеаментные зоны. Линеаменты служат каналами миграции подземных вод и газов и являются участками дислокации горных пород. Для выяснения природы линеаментов про-

водится анализ геолого-геофизических данных, полевые наблюдения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа выполнена на основе совместного использования архивных материалов космической фотосъемки и изображений Google Earth, где в основу цифровой модели рельефа положена информация миссии SRTM. Вначале на космических снимках выделяются линеаменты, концентрические структуры и другие детали изображения. В дальнейшем эти объекты сравниваются с данными Google Earth, детализируются и по характерным точкам привязываются к системе координат. Затем с помощью Google Earth, которая интегрирована с глобальной навигационной системой GPS, планируются наземные маршруты.

Исследованиями последних лет установлено, что на Балтийском щите и его юго-восточном склоне в голоцене происходили землетрясения с магнитудой $M = 7.0$ и более (Никонов, Шварев, 2014). Зоны концентрации землетрясений часто приурочены к крупным разломам северо-западной ориентировки. В то же время разломы северо-восточного простирания менее масштабны и недостаточно изучены. Один из разломов северо-восточного направления выделен автором как Южки-Токсовская (Охтинская) сейсмическая зо-

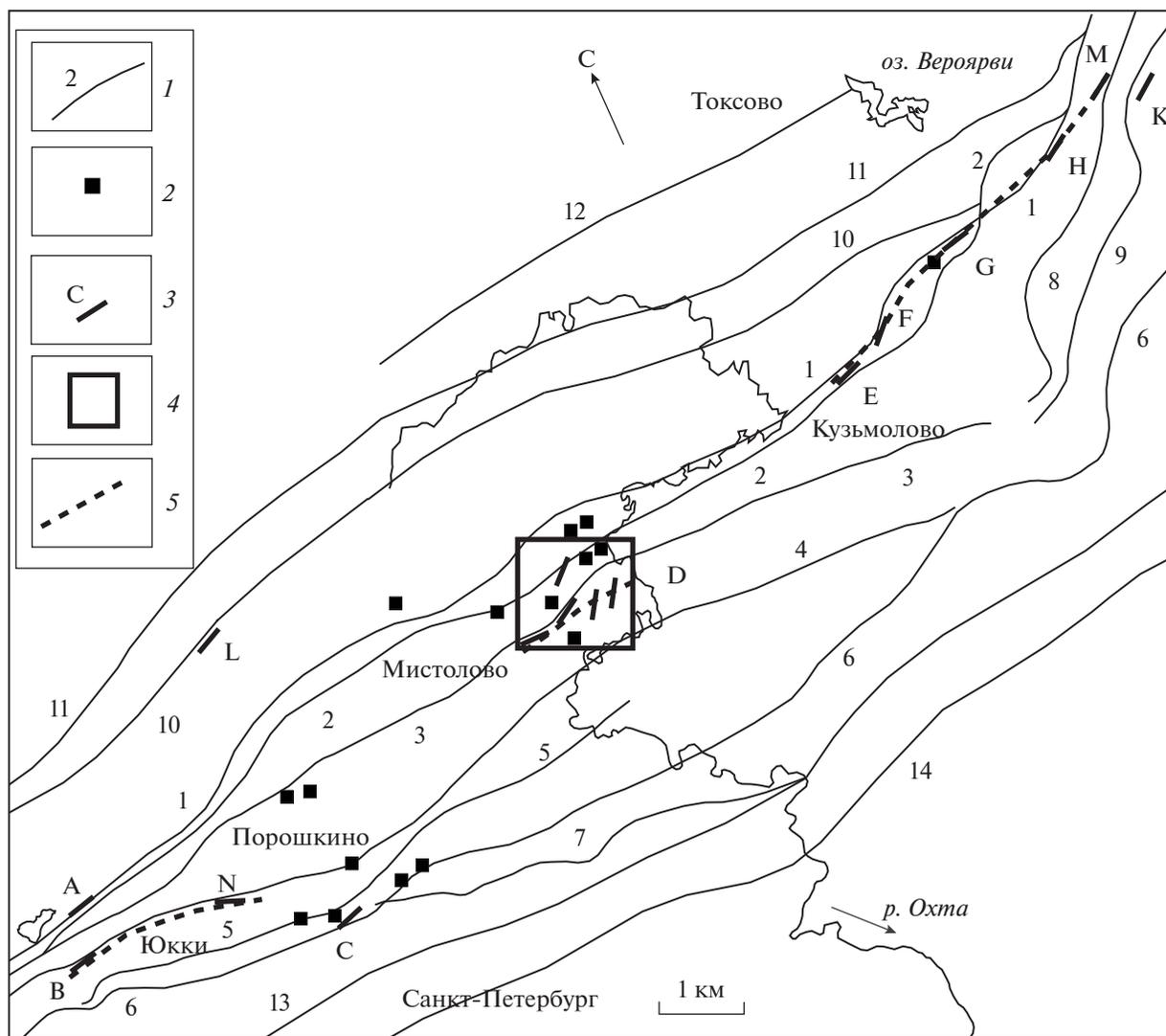


Рис. 1. Фрагмент Юки-Токсовской зоны разломов. 1 – разлом и его номер, 2 – обнажения с разрывами, 3 – группа уступов и ее обозначение, 4 – участок детальных работ, 5 – сейсмозазрывы.

на (Неволин, 2015), примыкающая к северной границе Санкт-Петербурга. Здесь обнаружены новые обнажения четвертичных пород с разрывными тектоническими нарушениями заметной амплитуды (рис. 1).

Максимальная сила палеоземлетрясений этого района оценивается в 7.0*M* и более согласно формулам (Стром, Никонов, 1999) по соотношению максимального смещения по разрывам и магнитуды (табл. 1).

В новейшем исследовании (Лунина, Гладков, 2017) предложен метод вычислений магнитуд землетрясений по параметрам кластических даек сейсмогенного генезиса. Получены формулы связи магнитуды с высотой и мощностью кластических даек. На площади Юки-Токсовской зоны выявлен ряд кластических даек в четвертич-

ных породах. Параметры даек можно использовать для оценки магнитуды палеоземлетрясений района исследования (табл. 2).

Для применения этого метода на данной территории следует учесть состав пород, трещиноватость, особенности гидрогеологии, для чего нужны специальные исследования. Отсюда следует неоднозначность оценок магнитуд для этого района по данному методу.

Возраст палеоземлетрясений этой территории оценивается как позднплейстоценовый–раннеголоценовый. В то же время нарушения рельефа в виде палеосейсмодислокаций позволяют выявить землетрясения более позднего возраста. С помощью программы Google Earth определяются высоты рельефа поперек осей разломов и линеаментов, по разнице высот вычисляются

Таблица 1. Обнажения четвертичных пород с тектоническими нарушениями.

№ обнажения	Координаты	Вид нарушения	Амплитуда, м	Магнитуда, <i>M</i>
1602	N 60.11343 E 30.36443	Сброс	1.2	7.2
1709	N 60.12270 E 30.44115	Взброс	0.8	7
1717	N 60.11903 E 30.42910	Сброс	1	7.1
1796	N 60.12265 E 30.44074	Сброс	1.6	7.3
1805	N 60.12263 E 30.43952	Взброс	1.75	7.4
1994	N 60.11530 E 30.42752	Сброс	0.8	7
2111	N 60.11374 E 30.36000	Сброс	1.1	7.2
2893	N 60.10054 E 30.37411	Сброс	0.8	7
3332	N 60.12527 E 30.43858	Сброс	1	7.1
3338	N 60.12478 E 30.43635	Сброс	1.1	7.2
K3	N 60.10042 E 30.36061	Сдвиг	1.2	6.8
K4	N 60.11679 E 30.43144	Сброс	0.4	6.7
K5	N 60.12972 E 30.51399	Сброс	0.6	6.9
K6	N 60.13337 E 30.53060	Сброс	0.3	6.5
K7	N 60.13337 E 30.53061	Взброс	0.15	6.2
K8	N 60.13900 E 30.58323	Сброс	0.1	6.1
K10	N 60.13027 E 30.35188	Сброс	0.8	7
K11	N 60.14394 E 30.58050	Сброс	0.4	6.7
K12	N 60.14288 E 30.58279	Взброс	0.1	6.1
K13	N 60.10694 E 30.33872	Сброс	0.2	6.2
K14	N 60.10680 E 30.32483	Сброс	0.7	7

Таблица 2. Параметры кластических даек в четвертичных породах

№ обнажения	Координаты	Высота, м	Мощность, м	<i>M</i> выс/моц	Тип дайки
623	N 60.13307 E 30.52893	2.3	0.7	7.1/7.2	Нептунический
751	N 60.12454 E 30.39976	1.4	0.7	6.6/7.2	Инъекционный
1372	N 60.09847 E 30.37349	1.5	0.2	6.7/6.1	Нептунический
1428	N 60.13312 E 30.52945	0.8	0.1	6.1/5.9	Нептунический
1508	N 60.12614 E 30.44220	1.3	1.1	6.6/7.7	Инъекционный
1709	N 60.12270 E 30.44115	0.8	1.2	6.1/7.8	Инъекционный
1805	N 60.12263 E 30.43952	1.4	0.4	6.6/6.1	Нептунический
2017	N 60.10009 E 30.35988	1.4	0.4	6.6/6.1	Нептунический
2018	N 60.10009 E 30.35990	1.7	1.4	6.9/7.9	Нептунический
2019	N 60.10011 E 30.35997	1.3	0.8	6.6/7.2	Нептунический
4104	N 60.12235 E 30.43170	0.7	0.95	5.9/7.2	Инъекционный
K2	N 60.10022 E 30.36027	1.1	0.7	6.3/7.2	Инъекционный
K7	N 60.11753 E 30.43536	0.55	0.4	5.7/6.5	Инъекционный
K9	N 60.13766 E 30.56217	1.2	0.5	6.4/6.8	Нептунический

Таблица 3. Параметры сейсмогенных уступов

№ уступа	Координаты	Высота, м	Уклон, °	Длина, м	№ канавы
Группа С 7	N 60.10028 E 30.36043	2.6	43	130	K1, K2, K3
Группа D 8	N 60.11660 E 30.43101	1.2	32	80	K4
11	N 60.11768 E 30.43567	1.2	35	90	K7
Группа F 4	N 60.12974 E 30.51401	1.8	43	55	K5
Группа G 18	N 60.13331 E 30.53043	0.6	34	40	K6
Группа H 25	N 60.13762 E 30.56196	1	36	60	K9
Группа K 26	N 60.13903 E 30.58329	1.5	36	30	K8
Группа L 27	N 60.13015 E 30.35151	1.6	46	136	K10
Группа M 33	N 60.14394 E 30.58050	1.6	38	80	K11
36	N 60.14288 E 30.58279	0.8	34	30	K12
Группа N 37	N 60.10694 E 30.33872	1	41	21	K13
40	N 60.10680 E 30.32483	1	38	54	K14

уклоны. Согласно измерениям на тестовых участках, палеосейсмодислокации развиты на склонах с крутизной более 10° – 15° , поэтому выделяются аналогичные площади.

Поиск сейсмодислокаций на этих участках выполняется путем геоморфологического профилирования вкрест простирающихся осей разломов и линейментов. Измерение сейсмодислокаций и прилегающих склонов выполняется с помощью электронного уклономера точностью 0.2° . Привязка точек наблюдения проводится посредством электронного навигатора GPSmap60CSX, точность которого достигает 2 м.

Всего обнаружено около 50 палеосейсмодислокаций, в том числе 40 сейсмогенных уступов, 12 из них вскрыты канавами (табл. 3). Одним из критериев выделения сейсмогенных уступов является положение их вблизи осей разломов в полосе шириной порядка 500 м. Также уступы имеют характерный продольный профиль с максимальной высотой в центре и минимальной по краям. Доказательством их сейсмогенной природы является вскрытие канавами и обнаружение разрывов со смещением пород (рис. 2).

Стенка канавы нарушена сбросом амплитудой 0.8 м, сместитель падает на юго-восток под углом 62° .

При работах погребенные почвы не встречены, поэтому возраст уступов оценивается на основании уменьшения их уклонов с течением времени.

Так, в Прибайкалье проведены исследования более 40 палеоземлетрясений с массовыми заме-

рами параметров уступов, проходкой их канавами и отбором проб на радиоуглеродное датирование. Это позволило установить градиацию уклонов сейсмогенных уступов и связанных с ними возрастов (Чипизубов и др., 2009): 44° – 1315–1742 лет, 37° – 508–1071 лет, 32 – 36° – 3990–4840 лет, 31° – 4299 лет, 22° – 27° – 7668 лет, 24° – 9116–9305 лет.

В нашем случае есть два основных типа сейсмогенных уступов, крутые и относительно пологие, имеющие уклоны соответственно 38° – 46° и 32° – 36° (табл. 3). Используя данные (Чипизубов и др., 2009) в качестве ориентира, время образования крутых уступов можно отнести к позднему голоцену, пологих – среднему голоцену. Кроме того, обнаружены выпуклые перегибы склонов с уклонами 20° – 25° , которые рассматриваются как раннеголоценовые сейсмогенные уступы.

Следует учесть неопределенность данных оценок применительно к нашему району с иными геологическими и географическими особенностями.

Часто уступы образуют цепочки, обозначая поверхностный сейсморазрыв землетрясения.

Крутые уступы 7(С), 4(F), 27(L), 33(M), 37(N), 40(N) вскрыты канавами K1, K2, K3, K5, K10, K11, K13, K14. По данным измерений в этих канавах максимальных амплитуд перемещений пород сила землетрясения позднеголоценового возраста составляет 7.0M (табл. 1, K10, K14). Оценка магнитуды по параметрам кластических даек дает значение 7.2M (табл. 2, K2).

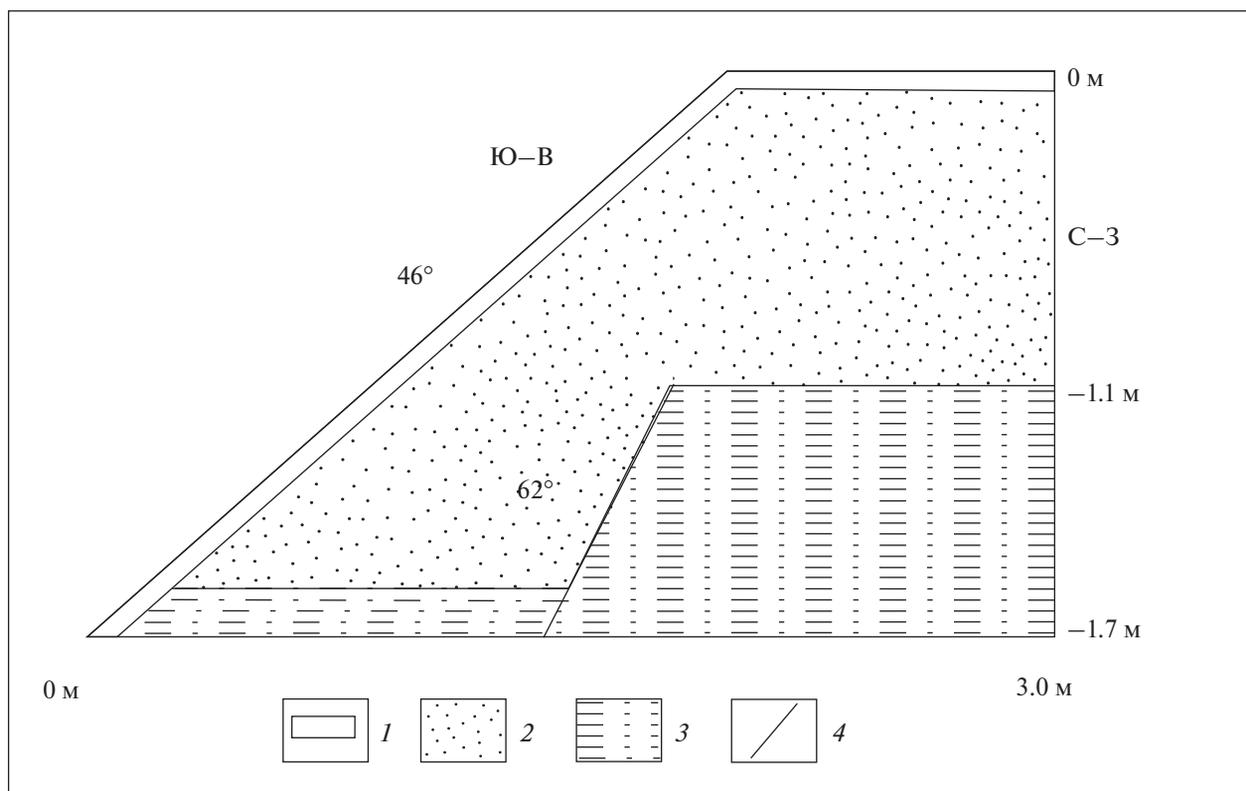


Рис. 2. Геологический разрез канавы К10. Условные обозначения: 1 – почва, 2 – песок, 3 – супесь, 4 – разрывное нарушение.

Возможно, данное землетрясение силой 7.0–7.2*M* приходится на период сейсмической активности Приладожья, где возраст Свирьско-Оятского палеособытия с магнитудой более 6 оценивается от 2.0 до 4.5 тыс. лет, более вероятно 2–3 тыс. лет (Бискэ и др., 2009; Шитов и др., 2010).

Пологие уступы 8, 11(D), 1 8(G), 25(H), 26(K), 36(M) пройдены канавами К4, К7, К6, К9, К8, К12. Анализ максимальных амплитуд разрывов пород в канавах дает оценку силы землетрясения среднеголоценового возраста в 6.7*M*. (табл. 1, К4). Аналогичный расчет по размерам даек показывает величину 6.8*M* (табл. 2, К9).

Известно, что 3–6 тыс. лет назад в центре Санкт-Петербурга было землетрясение силой 5–6 баллов (Аптикаев и др., 2011). Вероятно, эти сотрясения являются отголоском землетрясения среднеголоценового возраста в 6.7–6.8*M* в Юкки-Токсовской зоне, так как авторы указывают на горизонтальный импульс СВ–ЮЗ направления.

Значительная часть сейсмогенных уступов находится в районе п. Мистолово (рис. 3).

Участок “Мистолово” характеризуется относительно расчлененным рельефом и уникален размахом высот в 65 м на расстоянии 1 км. Имен-

но здесь сосредоточены обнажения с мощными взбросами (рис. 4).

На рис. 3 изображены два ромбовидных блока, выделенные по космическим снимкам и выраженные в рельефе. Согласно (Геодинамические..., 1989), характерной чертой строения сдвигов является наличие ромбических в плане блоков, примыкающих к разломам. В зонах сдвигов геологические тела имеет объемную конфигурацию, именуемую ромбоэдром или тектонической линзой.

На участке находится группа (D) из 14 сейсмогенных уступов, из них пологие уступы 8 и 11 вскрыты соответственно канавами К4 (рис. 5) и К7.

Стенка канавы нарушена сбросом амплитудой 0.4 м, сместитель падает на северо-запад под углом 53°.

Ареал крутых уступов 2, 6, 9, 10, 14, 19 указывает на эпицентр землетрясения позднеголоценового возраста. В южной части участка центры пологих уступов 1, 28, 8, 11, 12, 13 лежат на одной линии, фиксируя выход на поверхность сейсморазрыва землетрясения среднеголоценового возраста длиной 1 км. Кулисный ряд разломных уступов с запада ограничен п. Мистолово и возможное его продолжение уничтожено или завалуировано хо-

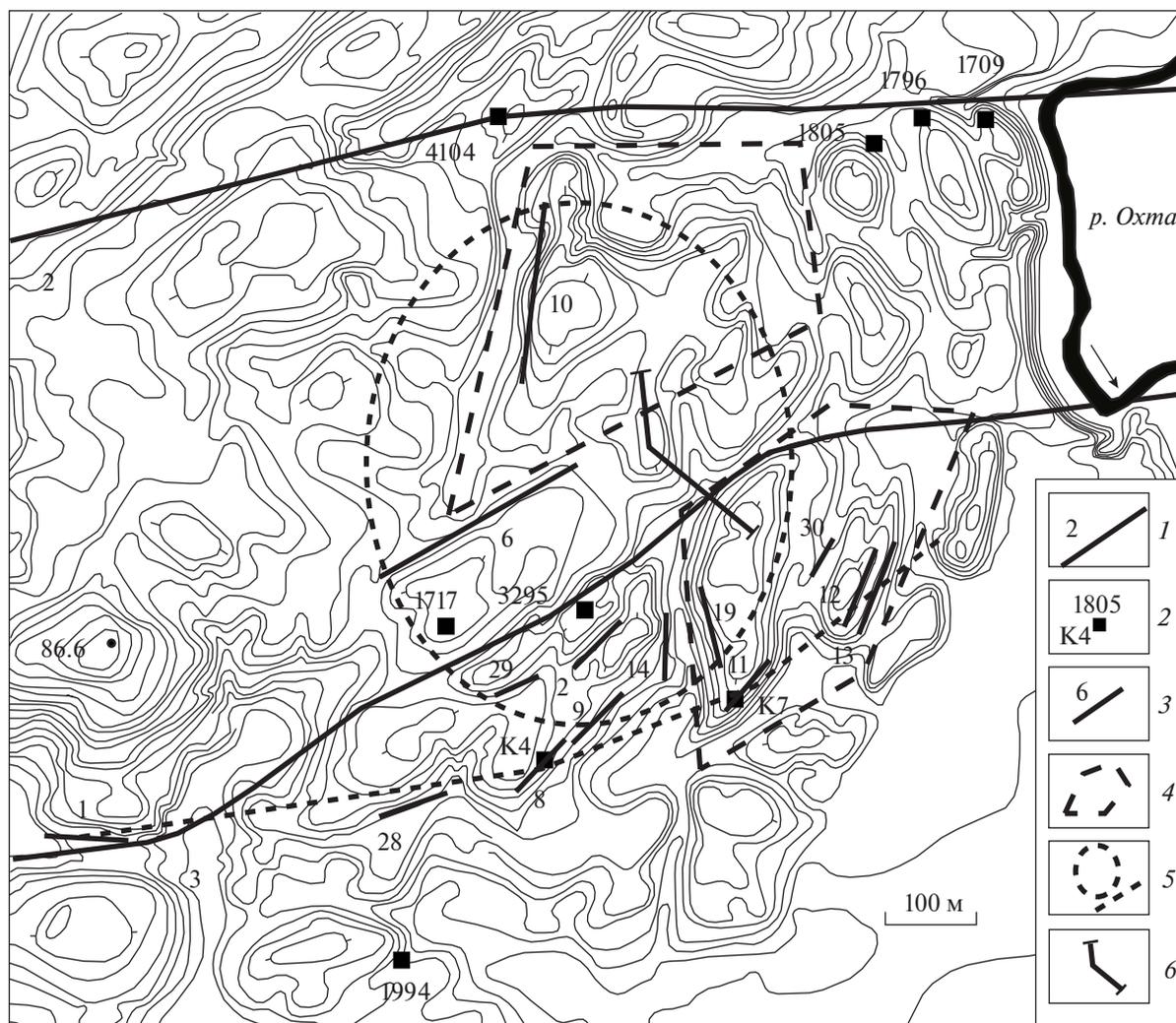


Рис. 3. Участок "Мистолово". 1 – разлом и его номер, 2 – обнажение и его номер, К – канава, 3 – уступ и его номер, 4 – ромбоэдр, 5 – эпицентр землетрясения и сейсморазрыв, 6 – положение спектрально-сейсморазведочного профиля.

зяйственной деятельностью. Аналогичная ситуация на востоке вблизи долины р. Охта.

Половина уступов приурочена к границам ромбоэдров.

В центре участка впадину на водоразделе занимает низинное болото, расположенное на оси разлома 3. Возможно, болото возникло на месте провала земной поверхности при землетрясении, поэтому в точке 3295 взят образец торфа с глубины 2.0 м. Калиброванный радиоуглеродный возраст образца ЛУ-9411 составляет 6130 ± 80 лет, что указывает на верхний предел возраста среднеголоценового землетрясения. Болотная низина ограничена с востока крутым уступом 2 длиной 80, высотой 1.3 м и уклоном 44° , отнесенным автором к

позднему голоцену. Вероятно, провал формировался в два этапа, в среднем и позднем голоцене.

Спектрально-сейсморазведочный профиль (ССП) пройден с северо-запада на юго-восток вкострости простираения разлома 3 (рис. 6).

При спектрально-акустических измерениях (Гликман, 2001) выявляются границы, по которым возможно взаимное проскальзывание соседствующих сред. ССП-аномалии имеют воронкообразный или V-образный характер, соответствуют областям повышенной трещиноватости пород и трактуются как разрывные тектонические нарушения.

На рисунке субвертикальные штриховые линии белого цвета обозначают разрывные наруше-



Рис. 4. Обнажение 1796. В правой части виден сброс амплитудой 1.6 м, сместитель падает на северо-запад под углом 44°.

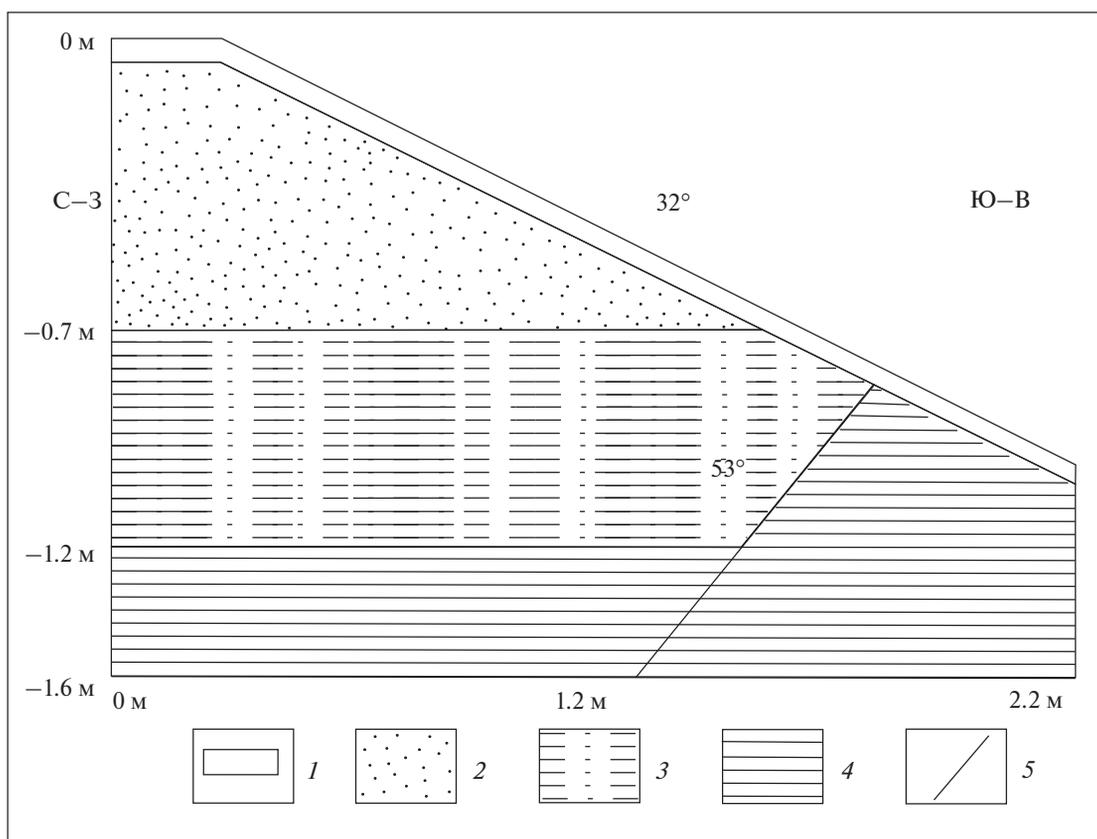


Рис. 5. Геологический разрез канавы К4. Условные обозначения: 1 – почва, 2 – песок, 3 – супесь, 4 – суглинок, 5 – разрывное нарушение.

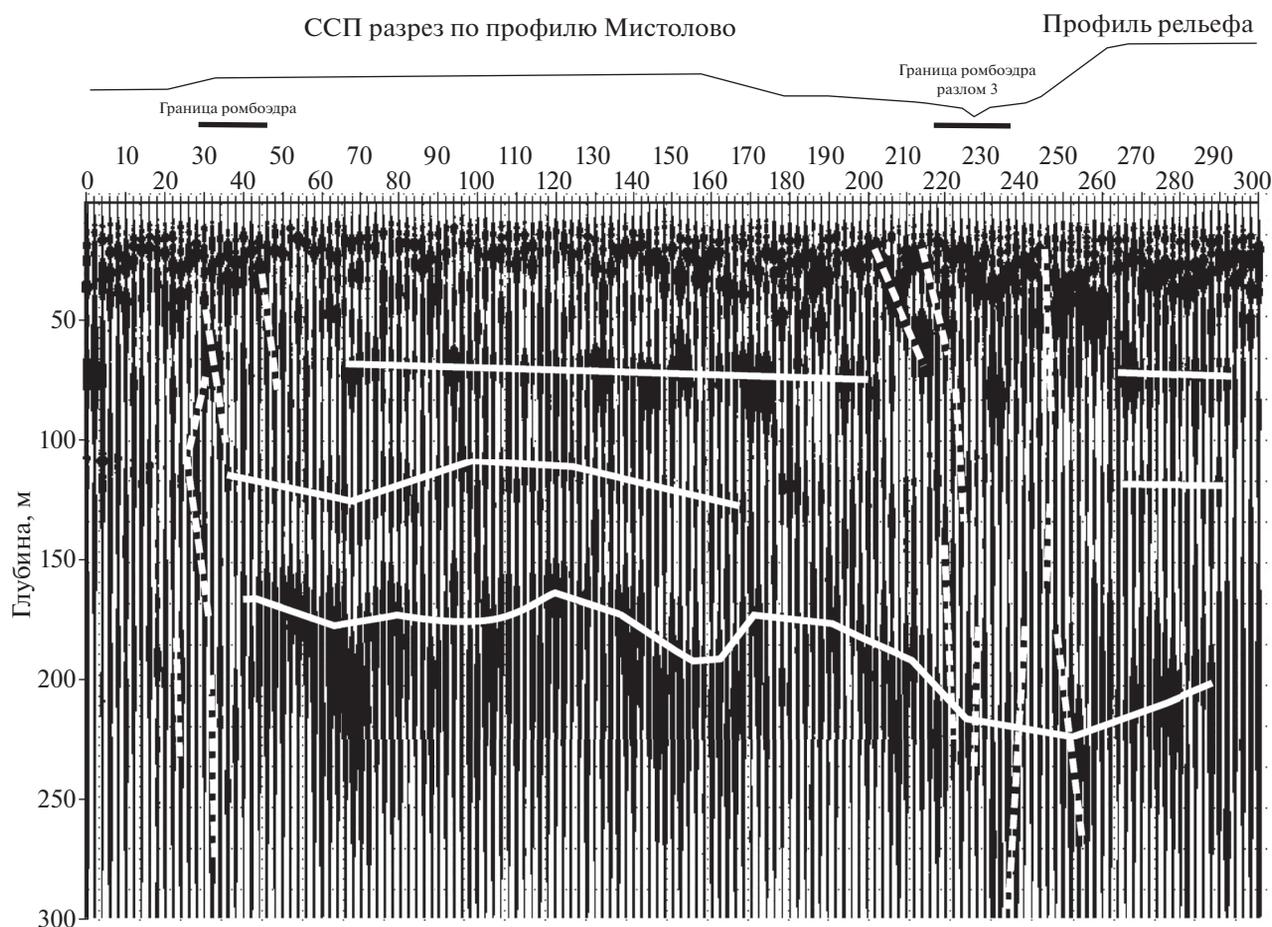


Рис. 6. Спектрально-сейсморазведочный профиль (объяснения в тексте).

ния. Сплошные линии белого цвета соответствуют поверхностям раздела акустических сред. Горизонтальная линия на глубине 60–70 м приходится на зону увеличения плотности четвертичных отложений. Волнистая линия в интервале глубин 110–130 м отвечает кровле котлинских отложений. Ломаная линия, объединяющая мощные аномалии, лежащие на одном глубинном уровне, соотносится с изрезанной поверхностью фундамента. По геологическим данным фундамент в этом районе находится на глубине 150–160 м. На ССП разрезе поверхность фундамента залегает в интервале глубин 170–225 м. Поверхности раздела акустических сред характеризуются областями потери сплошности. К этим участкам приурочены зоны разрывных нарушений, которые отвечают точкам перегиба рельефа земной поверхности. Так, на 20–50 м профиля наблюдается группа разрывов, достигающих глубины 280 м. Эти нарушения приурочены к границе северного ромбоэдра, которая в рельефе выражена заболоченной ложбиной. Таким образом, граница ромбоэдра пред-

ставлена разрывным тектоническим нарушением, к нему же примыкает уступ б.

С зоной разлома 3, которая является и границей южного ромбоэдра, совпадает долина ручья с крутым северо-западным склоном. Здесь на 200–250 м профиля имеется система разрывных нарушений, пронизывающих весь разрез. Амплитуда прогиба по поверхности фундамента составляет 50 м. Таким образом, разлом 3 является долгоживущим и активизированным в новейшее время.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сильные инструментальные и исторические землетрясения в этом районе не зарегистрированы, однако история Санкт-Петербурга охватывает чуть более 300 лет. Известно, что период повторяемости сильных землетрясения с магнитудой более 6 в ближайших Западно-Ладужской и Вуоксинской зонах составляет 2000–3000 лет (Никонов, Шварев, 2015).

Выше оценка магнитуд проводилась по величине максимального смещения пород (параметр

D_{max}) в канавах, вскрывших уступы, этот метод считается более надежным. В то же время для оценки палеомагнитуд используют метод определения длины (параметр L) поверхностных разрывов, при котором длина разрыва пропорциональна силе вызвавшего его землетрясения (Палеосейсмология, 2011).

На площади работ обнаружен сейсмогенный поверхностный разрыв длиной 4.3 км, включающий ряд пологих уступов 21(Е), 16, 17(F), 18(G), 25(Н), 32(М) (рис. 1). Оценка магнитуды по длине разрыва здесь составит 5,8М. Кроме того, выделен разрыв длиной 1.9 км, проходящий через крутые уступы 20(В), 37, 38, 40(N). Действительно, расчетные магнитуды по длинам разрывов значительно ниже, чем магнитуды по величинам перемещения пород.

Но как считает Чипизубов (2009), “что касается палеосейсмодислокации, представленной отдельными фрагментами, то ее сохранившаяся общая длина определенно меньше возникшей при землетрясении. Поэтому параметр D_{max} должен отражать величину землетрясения намного ближе к истинной, поскольку в сохранившихся фрагментах палеосейсмодислокаций ее можно установить”.

Как ранее показал автор (Неволин, 2015), Юкки-Токсовская зона имеет характер правого сдвига и является частью Балтийско-Мезенской зоны. Балтийско-Мезенская сдвиговая зона, как долгоживущая структура, испытывала несколько стадий активизации с образованием сейсмодислокаций и горизонтов сейсмиков, в том числе и на новейшем этапе, в голоцене (Колодяжный, 2020а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Выделен район, примыкающий к Санкт-Петербургу, где предполагается возникновение сильных землетрясений в голоцене.

Обнаружены палеосейсмодислокации, что указывает на сейсмическую активность Юкки-Токсовской зоны разломов в позднем и среднем голоцене.

Исследование сейсмогенных уступов позволяет оценить силу землетрясений позднего и среднего голоцена данного района соответственно в 7.0–7.2М и 6.7–6.8М.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит директора фирмы “Геофизпрогноз” А.Г. Гликмана за проведение спектрально-сейсморазведочного профилирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аптикаев Ф.Ф., Воронков О.К., Моторин Г.А., Никонов А.А., Эртелева О.О. Оценка сейсмических воздействий при строительстве особо ответственных объектов в г. Санкт-Петербурге // Инженерные изыскания. 2011. № 10. С. 4–18.

Бискэ Ю.С., Сумарева И.В., Шитов М. В. Позднеголоценовое сейсмическое событие в юго-восточном Приладожье. 1. Принципы исследования и деформационные текстуры // Вестн. ЛГУ, сер. 7, геология и география. 2009. № 1. С. 3–25.

Геодинамические реконструкции. Л. Недра, 1989, 278 с.

Гликман А.Г. Применение спектрально-сейсморазведочного профилирования (ССП) для картирования месторождения полезных ископаемых // Региональная геология и металлогения. 2001. № 13–14. С. 34–44.

Колодяжный С.Ю. и др. Структурно-кинематические парагенезисы и динамическая модель Балтийско-Мезенской сдвиговой зоны в фанерозое, Северо-запад Восточно-Европейской платформы // Геотектоника, 2020. № 2. С. 48–72.

Лунина О.В., Гладков А.С. Граничные условия связи параметров землетрясений и кластических даек сейсмогенного генезиса (по мировым данным) // Докл. АН. 2017. Т. 476. № 1. С. 68–71.

Неволин С.Н. Обнаружение активных разломов земной коры в окрестностях Санкт-Петербурга по материалам космической съемки // Докл. АН. 2015. Т. 462. № 2. С. 190–196.

Никонов А.А., Шварев С.В. Активные разломы и очаги сильнейших землетрясений восточной Фенноскандии. Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности // Мат. 19 науч.-практич. конференции / Ред. Е.А. Рогожин. Воронеж, 2014. С. 275–279.

Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмолинементы и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет // Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности. Мат. межд. конф. Нерюнгри, 2015. С. 243–251.

Стром А.Л., Никонов А.А. Распределение смещений вдоль сейсмогенных разрывов и учет неравномерности подвижек при палеосейсмологических исследованиях // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 47–59.

Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М., Имаев В.С. Палеосейсмичность Прибайкалья // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 1. С. 7–22.

Шитов М.В., Бискэ Ю.С., Сумарева И.В. Позднеголоценовое сейсмическое событие в юго-восточном Приладожье. 2. Параметры. // Вест. СПбГУ. С.7. 2010. № 3. С. 18–28.

Revealing Paleoseismic Dislocations in the St. Petersburg Region Based on Remote Sensing Data

S. N. Nevolin

St. Petersburg, Russia

The intensity of paleoearthquakes in the territory was estimated by two methods: maximum displacement of Quaternary rocks by ruptures and by the parameters of clastic dikes of seismogenic genesis. Based on the use of archival materials from space surveys and Google Earth images, a method for searching for paleoseismic dislocations is substantiated. Searches for seismic manifestations within the Yukka-Toksovskaya fault zone were carried out. 40 seismogenic scarps were discovered, some of them were opened by ditches. The study of the scarps makes it possible to estimate the strength of the earthquakes of the late and middle Holocene in this area, respectively, at 7.2 and 6.8 magnitudes. The deep structure of the area of concentration of paleoseismic dislocations has been studied by the method of spectral-seismic profiling.

Keywords: active faults, remote sensing, earthquakes, magnitude, paleoseismic dislocations, spectral-acoustic measurements

REFERENCES

- Aptikaev F.F., Voronkov O.K., Motorin G.A., Nikonov A.A., Ehrteleva O.O.* Otsenka seismicheskikh vozdeistvii pri stroitel'stve osobo otvetstvennykh ob'ektov v g. Sankt-Peterburge [Assessment of seismic impacts during the construction of critical facilities in St. Petersburg] // *Inzhenernye izyskaniya*. 2011. № 10. P. 4–18.
- Biske Yu.S., Sumareva I.V., Shitov M.V.* Pozdnegolotsenoe seismicheskoe sobytie v yugo-vostochnom Priladozh'e. 1. Printsipy issledovaniya i deformatsionnye tekstury [Late Holocene seismic event in the southeastern Ladoga area. 1. Research principles and deformation textures] // *Vestn. LGU. Ser. 7. geologiya i geografiya*. 2009. № 1. P. 3–25.
- Geodinamicheskie rekonstruktsii [Geodynamic reconstruction]. L.: Nedra, 1989. 278 p.
- Glikman A.G.* Primenenie spektral'no-seismorazvedochnogo profilirovaniya (SSP) dlya kartirovaniya mestorozhdeniya poleznykh iskopaemykh [Application of spectral seismic profiling (SSP) for mapping mineral deposits] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2001. № 13–14. P. 34–44.
- Kolodyazhnyi S.Yu. i dr.* Strukturno-kinematicheskie paragenезisy i dinamicheskaya model' Baltiisko-Mezenskoj sdvigovoi zony v fanerozoje, Severo-zapad Vostochno-Evropеiskoi platformy [Structural-kinematic parageneses and dynamic model of the Baltic-Mezen strike-slip zone in the Phanerozoic, Northwest of the East European platform] // *Geotektonika*. 2020. № 2. P. 48–72.
- Lunina O.V., Gladkov A.S.* Granichnye usloviya svyazi parametrov zemletryaseniya i klasticheskikh daek seismogennogo genezisa (po mirovym dannym) [Boundary conditions for the relationship between the parameters of earthquakes and clastic dikes of seismogenic genesis (according to world data)] // *Dokl. AN*. 2017. T. 476. № 1. P. 68–71.
- Nevolin S.N.* Obnaruzhenie aktivnykh razlomov zemnoi kory v okrestnostyakh Sankt-Peterburga po materialam kosmicheskoi s'emki [Detection of active faults in the earth's crust in the vicinity of St. Petersburg based on satellite imagery] // *Dokl. AN*. 2015. T. 462. № 2. P. 190–196.
- Nikonov A.A., Shvarev S.V.* Aktivnye razlomy i ochagi sil'neishikh zemletryaseniya vostochnoi Fennoskandii. Aktivnye razlomy i ikh znachenie dlya otsenki seismicheskoi opasnosti // *Mat. 19 nauch.-praktich. konferentsii [Active faults and foci of the strongest earthquakes in eastern Fennoscandia. Active faults and their importance for seismic hazard assessment. Mat. of 19th scientific-practical conference]* / Red. E.A. Rogozhin. Voronezh, 2014. P. 275–279.
- Nikonov A.A., Shvarev S.V.* Seismolineamenty i razrushitel'nye zemletryaseniya v rossiiskoi chasti Baltiiskogo shchita: novye resheniya dlya poslednykh 13 tysyach let // *Geologo-geofizicheskaya sreda i raznoobraznye proyavleniya seismichnosti. Mat. mezhd. konf. Neryungri [Seismic lineaments and destructive earthquakes in the Russian part of the Baltic Shield: new solutions for the last 13 thousand years]* // *Geological and geophysical environment and various manifestations of seismicity. Mat. of int. conf. Neryungri*. 2015. P. 243–251.
- Strom A.L., Nikonov A.A.* Raspredelenie smeshchenii vdol' seismogennykh razryvov i uchet neravnomernosti podvizhek pri paleoseismologicheskikh issledovaniyakh [Distribution of displacements along seismogenic faults and taking into account the non-uniformity of displacements in paleoseismological studies] // *Vulkanologiya i seismologiya*, 1999. № 6. P. 47–59.
- Chipizubov A.V., Smekalin O.P., Semenov R.M., Imaev V.S.* Paleoseismichnost' Pribaikal'ya [Paleoseismicity of the Baikal region] // *Voprosy inzhenernoi seismologii*. 2009. T. 36. № 1. P. 7–22.
- Shitov M.V., Biske Yu.S., Sumareva I.V.* Pozdnegolotsenoe seismicheskoe sobytie v yugo-vostochnom Priladozh'e. 2. Parametry [Late Holocene seismic event in the southeastern Ladoga area. 2. Parameters] // *Vestn. SPBGU. Ser. 7*. 2010. № 3. P. 18–28.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИНФОРМАТИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАСОРЕННОСТИ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2021 г. Т. И. Письман^а, М. Г. Ерунова^б, И. Ю. Ботвич^а, Д. В. Емельянов^а, Н. А. Кононова^а*,
А. В. Бобровский^с, А. А. Крючков^с, А. А. Шпедт^с, А. П. Шевырногов^а

^аИнститут биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

^бФИЦ “Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск, Россия

^сКрасноярский НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: nata_slyusar@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

В статье представлены результаты исследования оценки степени засоренности посевов пшеницы, полученные на основе использования оптических наземных и спутниковых спектральных данных спутников серии Dove (PlanetScore) с пространственным разрешением 3 м за 2019 г. Для дешифрирования наземных спектрометрических и космических снимков использованы вегетационные индексы: нормализованный вегетационный индекс – NDVI, относительный индекс хлорофилла – CIGreen, модифицированный почвенный вегетационный индекс – MSAVI2 и индекс устойчивости к видимой атмосфере – VARI. Показана возможность оценки степени засоренности сельскохозяйственных полей. Чем выше засоренность, тем ниже значения индексов. В течение вегетационного сезона обнаружено отличие динамики индекса VARI от динамики индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2. Отмечена высокая корреляция между индексами NDVI, CIGreen, MSAVI2 и низкая – между индексом VARI и другими индексами. На основе карты пространственного распределения индекса CIGreen за дату 02.08.2019 г. показана возможность выявления засоренных участков сельскохозяйственных полей.

Ключевые слова: вегетационные индексы, PlanetScore, наземное спектрометрирование, геоботанические исследования, посевы пшеницы, Красноярский край

DOI: 10.31857/S0205961421030076

ВВЕДЕНИЕ

Среди задач текущего контроля состояния посевов сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) особое место занимает оценка санитарного состояния посевов, т.е. обнаружение очагов болезней, вредителей и выявление факта засоренности культуры сорняками (Михайленко, Воронков, 2016). К малоизученным факторам, влияющим на спектральную отражательную способность посевов и, соответственно, успешность детектирования их состояния по данным дистанционного зондирования, относится засоренность посевов (Thorp, Tian, 2004).

Сорные растения являются постоянным компонентом агроэкосистем. При высокой численности они снижают урожай и качество сельскохозяйственной продукции, а также затрудняют выполнение многих видов полевых работ, в том числе обработку почвы и уборку урожая. Засоренность посевов наиболее значимо проявляется при низком уровне агротехники и недостатке средств

у землевладельцев на приобретение агрохимикатов для борьбы с сорными растениями.

Характер и степень засоренности посевов, фенология сорняков на фоне фенологического развития культурных растений значительно варьирует от сезона к сезону. Это связано с особенностями метеорологических условий года, типа севооборота возделываемых культур, почвенных условий, агротехники (Petit et al., 2011; He Y. et al, 2020).

Вопросы влияния засоренности посевов на их спектральный облик до сих пор изучены недостаточно. Такие исследования ведутся, но в основном в связи с развитием подходов точного земледелия и локализации применения средств борьбы с сорной растительностью (Lamba, Brown, 2001; Martin et al., 2011; Pflanz et al., 2018). Однако в этих исследованиях не идет речь о дистанционном распознавании видов сорной растительности, так как более важное практическое значение имеет точность определения площадей ее распространения, а виды сорной растительности определя-

ют непосредственно в поле. Работы по изучению спектральной отражательной способности у разных видов сорняков и ее динамики в течение сезона вегетации до сих пор очень немногочисленны (Vrindts et al., 2002; Che'Ya et al., 2013).

Методы ДЗЗ имеют существенные преимущества перед традиционными наземными методами по возможности мгновенного обзора больших территорий, в том числе удаленных и труднодоступных, а также по регулярности съемок исследуемых объектов и территорий (Бондур, Воробьев, 2015). Уникальные возможности космических съемок в различных диапазонах электромагнитного спектра позволяют обеспечить цифровую многозональную съемку, большой потенциал заложен в возможности использования спутниковых данных для сельскохозяйственных проблем.

Однако задача использования ДЗЗ для определения очагов распространения сорных растений более сложна, чем традиционная задача определения видов сельскохозяйственных культур и их урожайности. Культивируемые растения занимают достаточно большие и однородные территории и обладают выраженными спектральными характеристиками в пределах одного вида. В отличие от них, сорняк произрастает неоднородно в пределах одного поля, и его спектральные характеристики сильно зависят как от типа основной культуры, так и от степени зараженности обследуемого участка (Архипова и др., 2014).

Большой объем информации о состоянии поверхности несет в себе отражение от нее солнечного света в различных спектральных диапазонах. В связи с этим одну из ведущих ролей в оценке состояния растительности занимают вегетационные индексы, полученные на основе данных дистанционного зондирования (Бондур, 2014; Бондур, Воробьев, 2015).

Целью данной работы является оценка степени засоренности посевов сельскохозяйственных культур на основе различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, VARI, CIGreen, MSAVI2), рассчитанных по наземным спектрометрическим и спутниковым данным PlanetScope в течение вегетационного сезона 2019.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования

Объектом исследования являются посевы сельскохозяйственных культур на территории землепользования Красноярского научно-исследовательского института сельского хозяйства (НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН) вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край).

Исследовались посевы яровой пшеницы Свирель (*Triticum vulgare*) с разной степенью засоренности за вегетационный период 2019 г. Использовались участки №№ 22 и 23 (рис. 1). На участке

№ 22 часть поля оставалась незасеянной (слева от пунктирной линии).

Поля расположены в южной части Красноярской лесостепи, в 5–7 км от г. Красноярска. Географические координаты: широта — 56°4'35"; долгота — 92°4'49". Территория землепользования — равнинная, южная, открытая, достаточно теплая часть лесостепи с выраженными остепенными участками, удобными для пашни.

Для оценки степени засоренности посевов пшеницы использованы геоботанические, наземные спектрометрические и спутниковые данные PlanetScope.

Геоботанические методы исследований

Для биологической оценки степени засоренности посевов зерновых культур используется визуальный метод учета сорняков. Он заключается в том, что исследуемое поле проходят по диагонали и через равные промежутки регистрируют сорняки всех видов. Данные наблюдений оценивают по четырехбалльной шкале:

1 балл — слабая степень засорения, сорняки встречаются единично (до 5% от числа культурных растений);

2 балла — средняя степень засорения, сорняки заметны среди культурных растений (до 25%);

3 балла — сильная степень засорения, количество сорняков близко к числу культурных растений (до 50%);

4 балла — очень сильная степень засорения, количество сорняков столько же или более культурных растений и рост последних сильно подавлен.

Количество сорняков подсчитывали на 0.1 м². Повторность — 45 точек учета. Каждая точка была привязана в системе географических координат. Одновременно со степенью засоренности посевов определены виды сорных растений (табл. 1) и проводилась наземная спектрофотометрическая съемка состояния посевов пшеницы и необрабатываемого пара.

Наземные спектрофотометрические методы исследований

Отражательные спектральные свойства природных объектов принято выражать коэффициентом спектральной яркости (КСЯ). Наземные измерения коэффициентов спектральной яркости проводились одновременно с геоботаническими исследованиями 09.07.2019 г. на сельскохозяйственных полях в "точках" с разной степенью засоренности. Площадь "точки" составляет окружность диаметром 50 см.

Для проведения наземной спектрометрии использовали полевой спектрометрический комплекс, состоящий из полевого портативного спектрометра Spectral Evolution PSR-1100F,

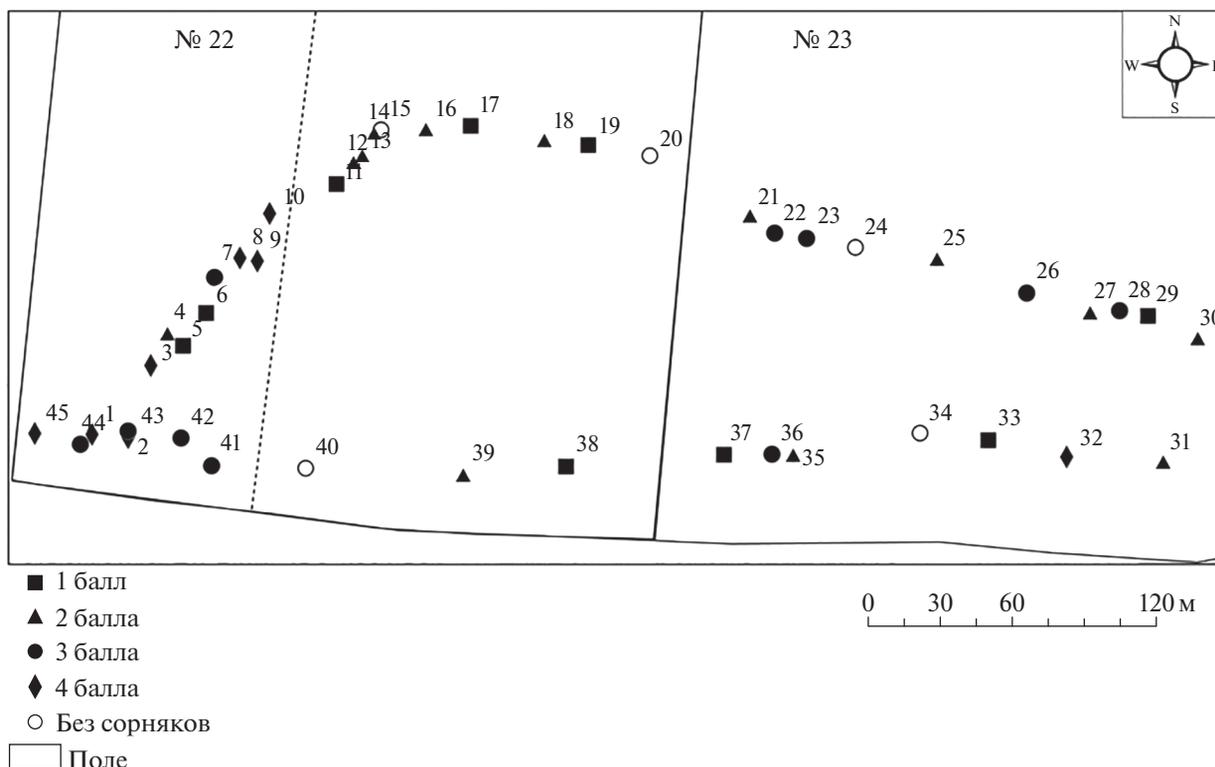


Рис. 1. Карта расположения точек с разной степенью засоренности полей, засеянных пшеницей (№№ 11–40) и не засеянных (№№ 1–10 и 41–45).

портативного компьютера PDA GETAC, калибровочного отражающего эталона (Spectral Evolution), цифрового фотоаппарата и соответствующего программного обеспечения (Шевырногов и др., 2018; Pisman et al., 2019). С помощью данного комплекса производились измерения коэффициента спектральной яркости объекта в диапазоне от 320 до 1100 нм. Полученные спектры имеют привязку к координатам местности по GPS, высоте местности, обеспечены соответствующей фотосъемкой и голосовыми заметками. Измерения КСЯ посевов пшеницы выполнялись с 11 до 15 ч местного времени, что на широте проводи-

мых работ обеспечивало достаточные условия освещения объектов (Сидько и др., 2014).

Спутниковые данные PlanetScore

Для дешифрирования сельскохозяйственных посевов с различной степенью засоренности использовались спутниковые данные PlanetScore. Крупнейшая группировка спутников компании PlanetScore предоставляет данные высокого пространственного разрешения (3 м) на ежедневной основе со спутников Dove (Planet Team, 2019). Спектральные каналы представлены четырьмя диапазонами: 455–515, 500–590, 590–670, 780–

Таблица 1. Виды сорняков, встречающиеся на полях с разной степенью засоренности

Виды сорняков	Число точек, в которых встречается сорняк
Просо сорнополевое (<i>Panicum capillare</i> L.)	15
Осот розовый (<i>Cirsium arvense</i> L.)	16
Марь белая (<i>Chenopodium album</i> L.)	5
Осот желтый (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	9
Липучка оттопыренная (<i>Láppula myosotis</i> Moench.)	4
Конопля сорная (<i>Cannabis ruderalis</i> Janisch.)	7
Ширица запрокинутая (<i>Amaranthus retroflexus</i> L.)	4
Овсяг обыкновенный (<i>Avena fatua</i> L.)	4

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

Вегетационный индекс	Формула расчета
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{b4 - b3}{b4 + b3}$
CIGreen (Green Chlorophyll Index)	$\frac{b4}{b2} - 1$
MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2)	$\frac{2b4 + 1 - \sqrt{(2b4 + 1)^2 - 8(b4 - b3)}}{2}$
VARI (Visible Atmospheric Resistant Index)	$\frac{b2 - b3}{b2 + b3 - b1}$

Примечание: $b1$ – $b4$ для спутниковой информации — величины спектрального отражения (СКО) соответствующих каналов (1–4) PlanetScore; для наземных измерений — усредненные значения КСЯ: $b1$ — в пределах длин волн от 455 до 515 нм, $b2$ — от 500 до 590 нм, $b3$ — от 590 до 670 нм, $b4$ — от 780 до 860 нм.

860 нм. Данные предоставляются на коммерческой основе и на некоммерческой — для исследователей с лимитом скачивания данных в 5000 км² в месяц.

По наземным спектрометрическим и спутниковым данным рассчитаны вегетационные индексы, представленные в табл. 2.

NDVI — нормализованный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index) — это индекс, показывающий наличие и состояние растительности (относительную биомассу). Этот индекс использует контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных — поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительности в инфракрасном канале (NIR) (Солпиева, Урмамбетова, 2018; Бондур, Воробьев, 2015).

CIGreen — относительный индекс хлорофилла (Green Chlorophyll Index), являющийся показателем фотосинтетической активности растительного покрова и используемый при оценке содержания хлорофилла a и b в листьях растений (Moran et al., 2000). Наибольшие значения индекса CIGreen коррелируют с наибольшим содержанием хлорофилла в листьях растений (Товстик и др., 2019). В диапазоне 1 и выше находится здоровая растительность с большим содержанием хлорофилла в листьях.

MSAVI2 — модифицированный почвенный вегетационный индекс (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), устойчивый к влиянию почвы. Значения индекса изменяются от -1 до 1 (Qi et al., 1994).

VARI — индекс устойчивости к видимой атмосфере (Visible Atmospheric Resistant Index) (Gitelson et al., 2002). VARI разработан для выделения растительности в видимой части спектра, при ослаблении влияния разницы освещения и атмосферных явлений. Он идеально подходит для RGB или цветных изображений, использует все

три цветовых канала (Солпиева, Урмамбетова, 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сорные растения или сорняки — дикорастущие растения, обитающие на землях, используемых в качестве сельскохозяйственных угодий. Вред, который наносят сорные растения, связан как со снижением урожайности, так и с ухудшением качества сельскохозяйственной продукции. Культурные и сорные растения конкурируют друг с другом за воду, свет, питательные вещества и т.д.

По результатам геоботанических исследований определены степень засоренности посевов (рис. 1) и основные виды сорняков (табл. 1). В результате исследованы участки с засоренностью 1 балл — в 9 точках, 2 балла — в 13 точках, 3 балла — в 10 точках и 4 балла — в 8 точках.

Применение результатов наземных спектрометрических исследований необходимо для повышения точности дешифрирования космических снимков (Hutto et al., 2006; Hese, Schmulius, 2009; Pflugmacher, 2011). Для оценки состояния растительности на сельскохозяйственных полях необходимо произвести обработку большого массива данных и определить оптимальный вегетационный индекс. В связи с этим для оценки засоренности сельскохозяйственных посевов в работе проведен сравнительный анализ различных вегетационных индексов: NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI.

NDVI — самый популярный и распространенный вегетационный индекс, это показатель здоровья растения, который вычисляется по тому, как растение отражает и поглощает разные световые волны. Из недостатков NDVI — при достижении определенного порога развития растения индекс теряет чувствительность. Иными словами, если растение развивается очень активно, то по NDVI нельзя отличить аномально зеленое расте-

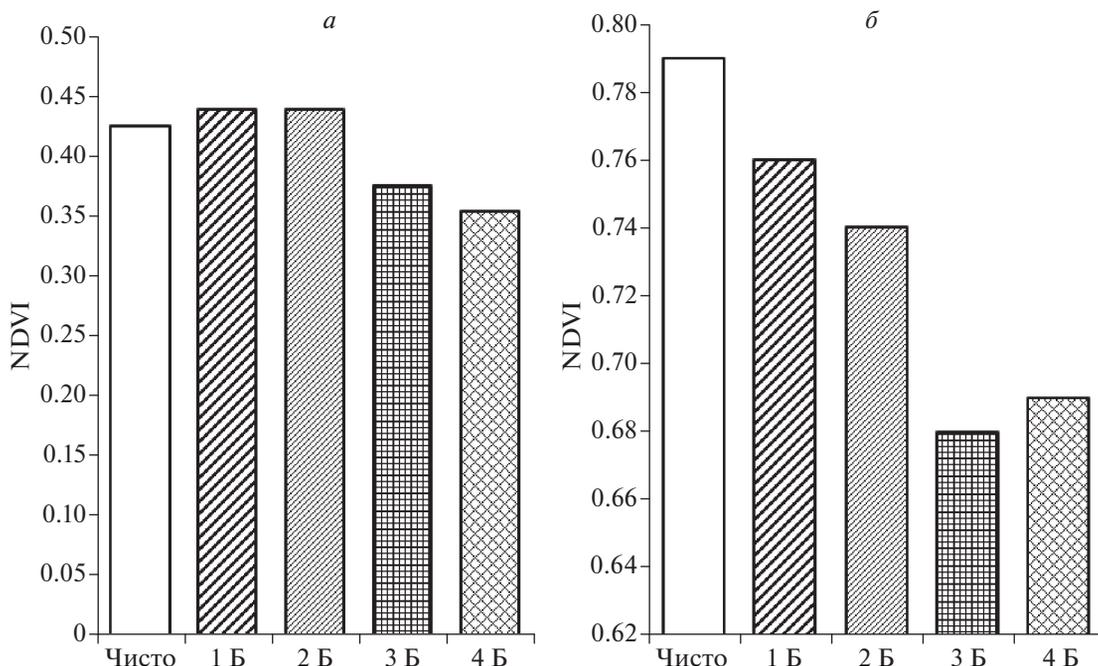


Рис. 2. Среднее значение NDVI посевов пшеницы с разной степенью засоренности по спутниковым данным (PlanetScore) (а) и по результатам наземного спектрометрирования (б), рассчитанное по данным 09.07.2019 г.

ние от “обычного” зеленого. Ну и как со всеми остальными индексами, их точность зависит от погоды: если над каким-то полем долгое время висят облака, то спутниковый снимок будет неточным (Икенов, 2019).

На рис. 2 представлены усредненные значения NDVI посевов пшеницы с различной степенью засоренности, рассчитанные по спутниковым данным – А и наземным спектрометрическим – Б. Так как наземные спектры сделаны с несколькими повторами, то усреднение NDVI посевов пшеницы с разной степенью засоренности позволяет повысить точность дешифрирования.

Данные, полученные со снимков PlanetScore (рис. 2, а) и с наземного спектрометра (рис. 2, б), показывают хорошую качественную сходимость. Усредненный NDVI для посевов пшеницы с высокой степенью засоренности ниже NDVI посевов пшеницы с низкой степенью засоренности. Однако значения NDVI по данным спектрометра в среднем почти в 2 раза выше, чем значения NDVI по снимку PlanetScore. Причиной этого, по нашему мнению, является расхождение пространственно-временных масштабов. Пространственное разрешение при наземном спектрометрировании равно окружности диаметром 50 см, при спутниковом – 3 м. При наземных измерениях исследуется ограниченное число растений на небольшом участке, в то время как спутниковые данные охватывают большой участок земли с большим количеством растений (Herrmann et al., 2013).

Снижение значений NDVI в период активной вегетации (до наступления фазы молочной спелости) свидетельствует о стрессовом состоянии посевов. Это может быть поражение посевов вследствие стихийных явлений (град, ливни, засуха, пожары), а также поражения вредителями. Примером фактора, влияющего на снижение NDVI, может быть дефицит влажности почвы и засоренность сельскохозяйственных посевов. Величина NDVI позволяет выявить проблемные зоны угнетенной растительности, давая возможность принимать решения, направленные на повышение урожайности (Шукилович и др., 2016).

Для дальнейшего анализа возможности оценки степени засоренности сельскохозяйственных посевов исследованы вегетационные индексы CIGreen, MSAVI2 и VARI, рассчитанные по спутниковым данным от 09.07.2019 г. (рис. 3).

Наряду с индексом NDVI, относительный индекс хлорофилла CIGreen также является показателем фотосинтетической активности растительного покрова (Mogan et al., 2000; Sims, Gamon, 2002). По спутниковым данным посевы пшеницы с низкой степенью засоренности и без засоренности имеют хлорофилльный индекс в диапазоне выше 1, с высокой степенью засоренности имеют хлорофилльный индекс в диапазоне ниже 1 (рис. 3, б). Наибольшие значения индекса CIGreen коррелируют с наибольшим содержанием хлорофилла в листьях растений, что говорит о “здоровье” растений (Товстик и др., 2019).

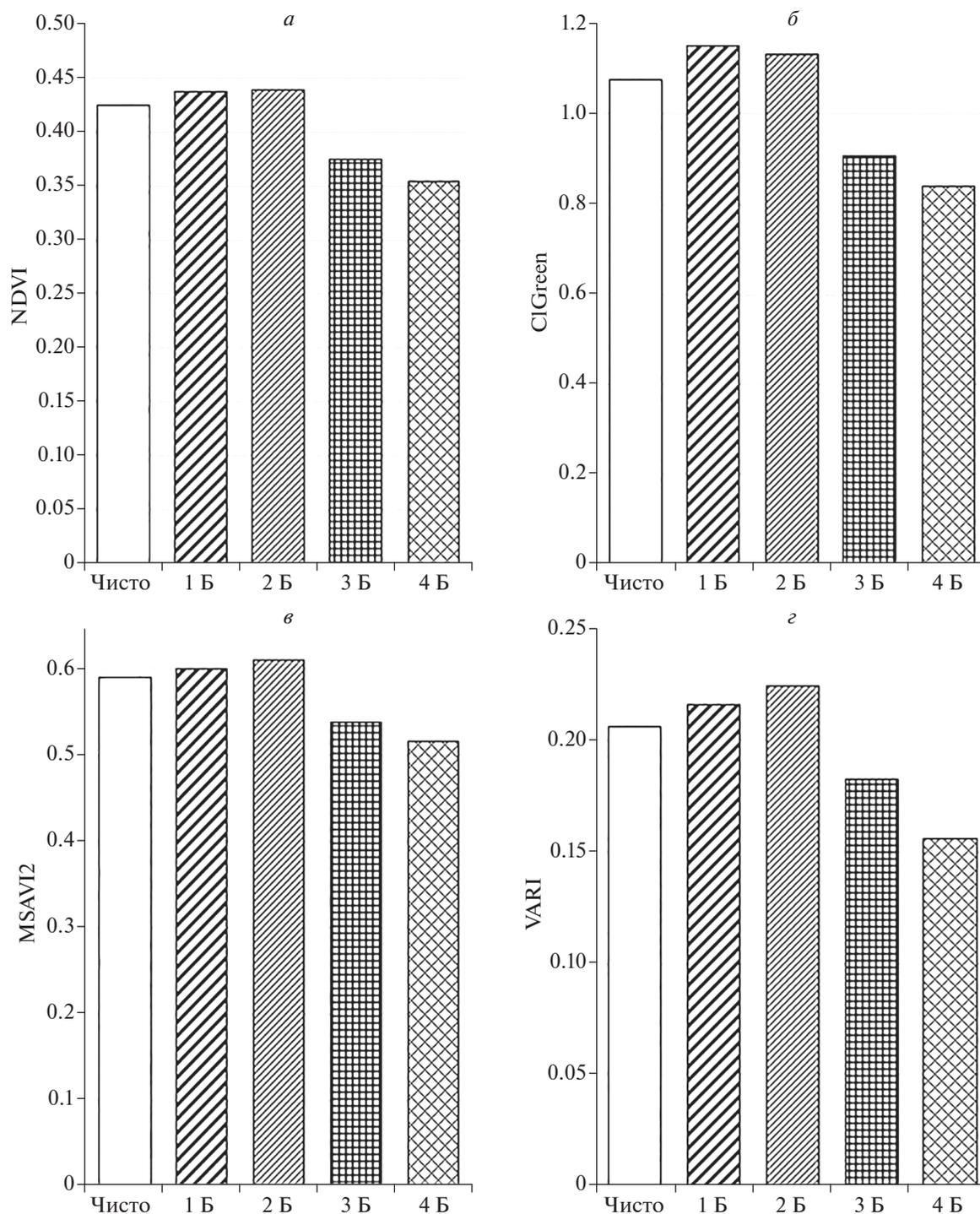


Рис. 3. Значения вегетационных индексов: NDVI (а), CIGreen (б), MSAVI2(в) и VARI (г) посевов пшеницы с разной степенью засоренности по спутниковым данным PlanetScore от 09.07.2019 г.

Почвенный индекс MSAVI2 и его преобразование являются чрезвычайно полезными инструментами для мониторинга засухи (Воронина, 2014; Гопп, 2019; Gaznayee, Al-Quraishi, 2019). Результаты показали, что наибольшее значение MSAVI2 составило 0.6 для посевов пшеницы с

низкой степенью засоренности и без засоренности (рис. 3, в). Высокое значение указывает на хорошую и здоровую растительность. Наименьшее значение MSAVI2 составило около 0.5 для посевов пшеницы с высокой степенью засоренности. Как правило, снижение значений почвенного ин-

Таблица 3. Корреляция между вегетационными индексами, рассчитанными по спутниковым данным Planet-Score (коэффициент детерминации, r^2)

Вегетационные индексы				
	NDVI	CIGreen	MSAVI2	VARI
NDVI	1	0.947	0.994	0.306
CIGreen	0.947	1	0.918	0.19
MSAVI2	0.994	0.918	1	0.355
VARI	0.306	0.19	0.355	1

декса MSAVI2 относится к уменьшению годового количества осадков, что считается жизненно важным фактором, влияющим на рост растительного покрова на исследуемой территории. В нашем случае погодные условия одинаковы для исследуемых сельскохозяйственных посевов с различной степенью засоренности. Поэтому можно говорить о влиянии степени засоренности на почвенный индекс MSAVI2.

При помощи индекса VARI можно выявить неоднородности на поле, поскольку данный индекс очень чувствителен к условиям освещения. Усредненный вегетационный индекс VARI посевов пшеницы с высокой степенью засоренности также ниже по сравнению с VARI посевов пшеницы с низкой степенью засоренности, как NDVI, CIGreen и MSAVI2 (рис. 3, з).

Таким образом, сравнительный анализ оценки влияния степени засоренности сельскохозяйственных полей на величину исследуемых индексов (NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI) по спутниковым данным за дату 09.07.2019 показал, что результаты идентичны. Выявлено качественное совпадение оценки степени засоренности посевов пшеницы по индексам NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI. Для посевов пшеницы с низкой степенью засоренности и без сорняка значения исследованных вегетационных индексов выше значений индексов посевов пшеницы с высокой степенью засоренности.

За вегетационный период все растения, как культурные, так и сорные, проходят определенные фенологические фазы развития. Происходящие при этом изменения отражаются на сезонной динамике их вегетационных индексов (Товстик и др., 2019).

Графики на рис. 4 показывают, как изменялись значения индексов NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI посевов пшеницы с различной степенью засоренности за вегетационный период 2019 г. по спутниковым данным. Анализ этих графиков позволяет сделать заключение, что имеются характерные для всех полей закономерности изменений исследуемых индексов. С 15 июня начинается стабильный рост значений индексов засеянных полей. Это соответствует процессу появления всходов и их росту, увеличению проективного покрытия

растительности. После 20 августа, с наступлением периода созревания, снижается содержание хлорофилла и, соответственно, уменьшается значение индексов.

В целом в течение вегетационного сезона обнаружено качественное сходство зависимости величин всех индексов от степени засоренности посевов пшеницы (рис. 4). Во время фазы активной вегетации растительности (июль, август) значения исследуемых вегетационных индексов для посевов пшеницы с низкой степенью засоренности (1 и 2 балла) выше значений вегетационных индексов для посевов пшеницы с высокой степенью засоренности (3 и 4 балла). Однако динамика индекса VARI отличается от динамики индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2 (рис. 4 з). В некоторые даты величина индекса VARI находится в противофазе с величинами остальных индексов.

В результате анализа связи между вегетационными индексами NDVI, CIGreen и MSAVI2 выявлена высокая положительная корреляция ($r^2 =$ около 0.95) и низкая – между индексом VARI и индексами NDVI, CIGreen и MSAVI2 ($r^2 =$ около 0.3) (табл. 3). Это подтверждает отличие динамики индекса VARI от динамики остальных индексов в течение вегетационного сезона (рис. 4).

Индексы, устойчивые к влиянию атмосферы, такие как VARI, достигают уменьшения чувствительности к влиянию атмосферы ценой уменьшения динамического диапазона. Эти индексы используются для оценки доли растительности. В целом, они менее чувствительны к изменению растительного покрова, чем NDVI.

Если растительность невысока, они подвержены сильному влиянию почвенного слоя (Qi et al., 1994; Gitelson et al., 2003). Этим, вероятно, можно объяснить различие в динамике индекса VARI от динамики индексов NDVI, MSAVI2 и CIGreen, особенно в весенние и осенние месяцы.

На рис. 5 представлено пространственное распределение индекса CIGreen сельскохозяйственных полей с различной степенью засоренности. В августе (02.08.2019) CIGreen наилучшим образом отображает зависимость величины данного индекса от степени засоренности полей. Слева более темный прямоугольник обозначает незасеян-

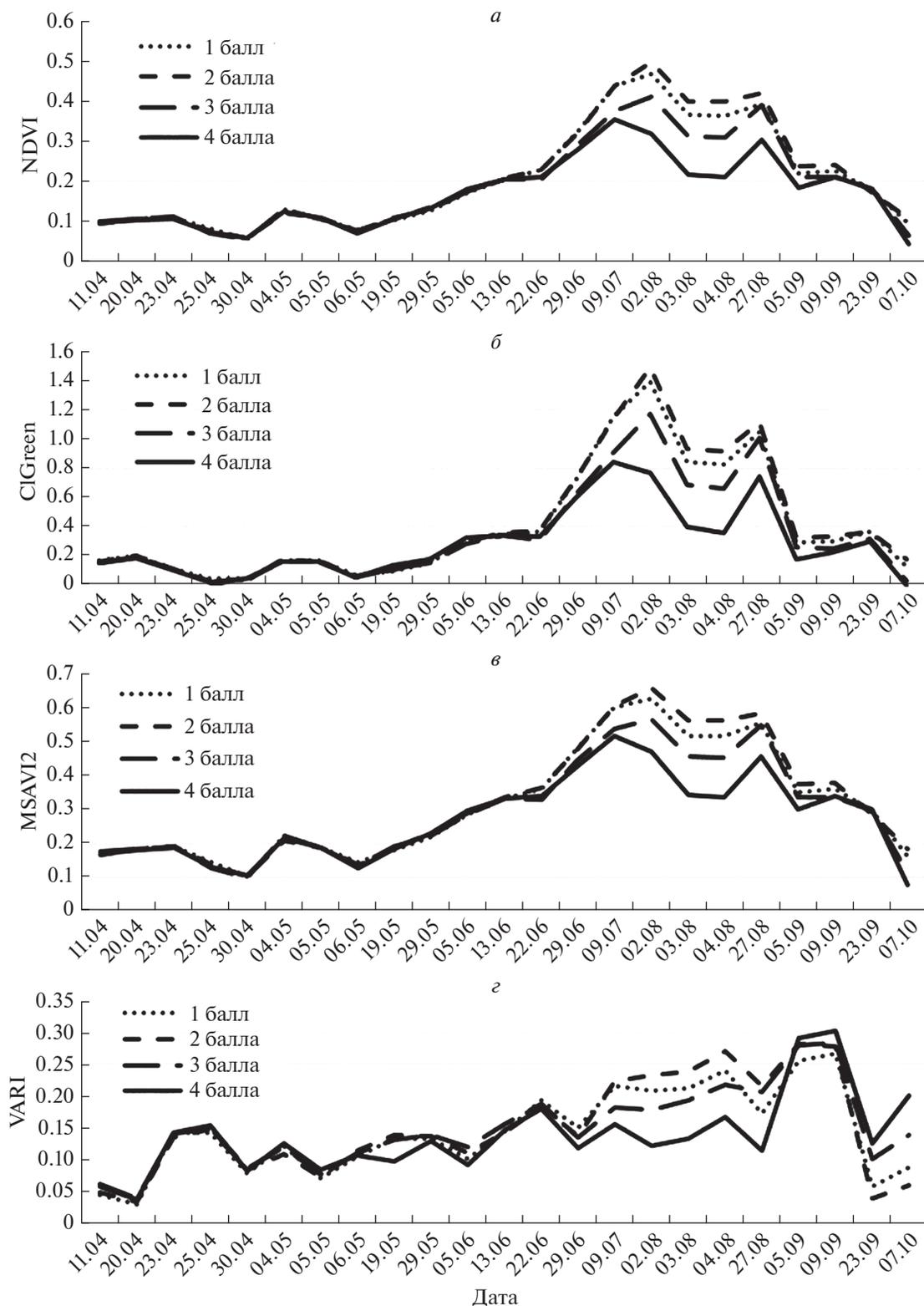
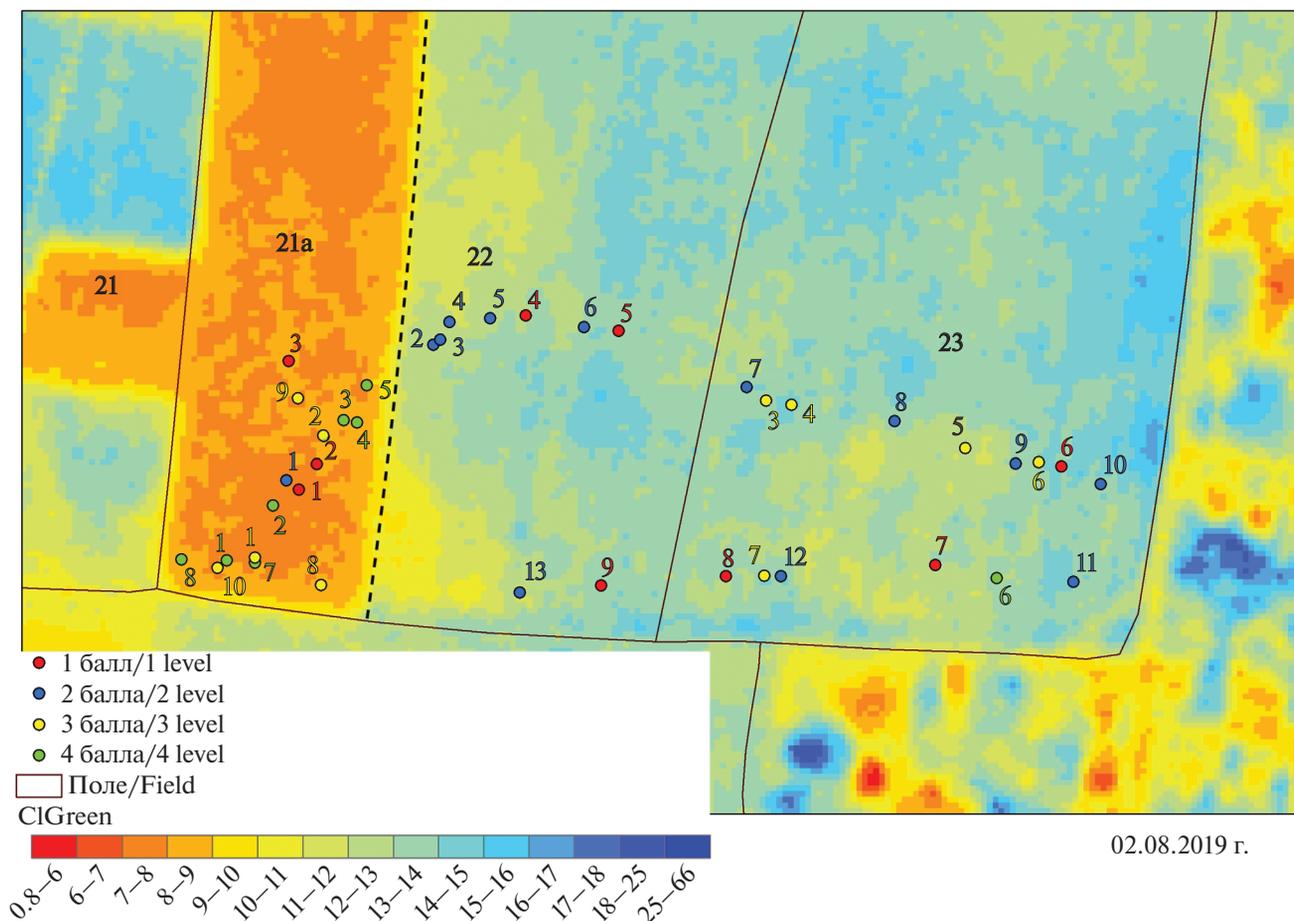


Рис. 4. Динамика вегетационных индексов NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI посевов пшеницы в зависимости от степени засоренности в течение вегетационного сезона 2019 г. по спутниковым данным PlanetScore.

ное поле с сорными растениями. В данное время вегетационного периода сорные растения находятся в стадии цветения, в результате чего в них

почти не содержится хлорофилл. С этим связано низкое значение хлорофилльного индекса на незасеянном поле. На засеянных полях в начале ав-



02.08.2019 г.

Рис. 5. Карта пространственного распределения индекса CIGreen посевов пшеницы за дату 02.08.2019 (по спутниковым данным PlanetScore). Кружками обозначены точки, в которых проводились наземные геоботанические и спектрометрические измерения.

густа (02.08.2019 г.) пшеница находится в стадии конца цветения. На данный момент в ней содержится большое количество хлорофилла и в связи с этим выявлено высокое значение индекса CIGreen посевов. Следовательно, выявлена возможность дешифрирования сельскохозяйственных полей с разной степенью засоренности по спутниковым данным PlanetScore.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оценки степени засоренности посевов сельскохозяйственных культур на основе различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI), рассчитанных по наземным спектрометрическим и спутниковым данным PlanetScore в течение вегетационного сезона 2019 г., сделаны следующие выводы.

Показана возможность распознавания засоренных участков сельскохозяйственных полей. На основе наземных спектров и спутниковых данных за дату 09.07. 2019 г. выявлено, что для чистых участков (без засорения) и для участков с

низкой степенью засоренности (1 и 2 балла) значения NDVI, полученные по спутниковым данным, лежат в пределах (0.425–0.44). Для участков с сильной степенью засоренности (3 и 4 балла) значения NDVI лежат в пределах (0.35–0.375) (рис. 2, а). Для чистых участков и для участков с низкой степенью засоренности значения NDVI, полученные по наземным спектрометрическим данным, лежат в пределах (0.74–0.79). Для участков с сильной степенью засоренности значения NDVI лежат в пределах (0.68–0.69) (рис. 2, б).

Значения вегетационных индексов (NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI), полученные по спутниковым данным, для чистых участков и для участков с низкой степенью засоренности достоверно выше, чем значения данных индексов для участков с высокой степенью засоренности (рис. 3).

В течение вегетационного сезона обнаружено качественное сходство зависимости величин всех индексов от степени засоренности посевов пшеницы. С увеличением засоренности посевов ве-

личина индексов уменьшается. Однако динамика индекса VARI отличается от динамики индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2. В некоторые даты величина индекса VARI находится в противофазе с величинами остальных индексов.

В результате анализа корреляционных связей между вегетационными индексами NDVI, CIGreen и MSAVI2 выявлена высокая положительная корреляция и низкая — между индексом VARI и другими индексами.

Построена карта пространственного распределения индекса CIGreen сельскохозяйственных полей разной степени засоренности за 02.08.2019 г. по спутниковым данным PlanetScore с пространственным разрешением 3 м. Полученная карта позволяет оценить масштабы засоренности сельскохозяйственных полей на больших территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипова О.Е., Качалина Н.А., Тютюнов Ю.В., Ковалев О.В. Оценка засоренности антропогенных фитоценозов на основе данных дистанционного зондирования земли (на примере амброзии полыннолистной) // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 15–26.
- Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.
- Воронина П.В., Мамаш Е.А. Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 3. С. 76–102.
- Гопн Н.В., Савенков О.А., Смирнов А.В. Цифровое картографирование урожайности яровой пшеницы на основе вегетационных индексов и оценка ее изменений в зависимости от свойств антропогенно — преобразованных почв // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 125–139.
- Икенов И.А. Информационная система оценки состояния растительности на сельскохозяйственных полях // Вестн. науки. 2019. Т. 4. № 5(14). С. 485–491.
- Михайленко И.М., Воронков И.В. Методы обнаружения сорняков, болезней и вредителей растений по данным дистанционного зондирования // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 72–83.
- Сидько А.Ф., Ботвич И.Ю., Письман Т.И., Шевырнов А.П. Угловое распределение отражательных характеристик агроценозов по наземным дистанционным измерениям // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2014. № 6. С. 665–673.
- Солнцева Ж.А., Урмамбетова Т.К. Оценка состояния еловых лесов по спутниковым данным LANDSAT 8 на примере государственного национального парка “Чон-кемин” // Вестн. Кыргызского гос. ун-та строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2018. Т. 1(59). С. 36–40.
- Товстик Е.В., Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2 // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 34–40.
- Шевырнов А.П., Письман Т.И., Кононова Н.А., Ботвич И.Ю., Ларько А.А., Высоцкая Г.С. Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.
- Шукилович А.Ю., Федотова Е.В., Маглинец Ю.А. Применение сенсора MODIS для оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 7. С. 1035–1044. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-7-1035-1044>
- Che'Ya N., Gupta M., Doug G., Lisle A., Basnet B., Campbell G. Spectral discrimination of weeds using hyperspectral radiometry // Proc. 5th Asian conf. Precis. Agric. (ACPA). 25–28 June. Jeju, Korea, 2013. P. 325.
- Gaznayee H.A., Al-Quraishi A.M.F. Analysis of Agricultural Drought, Rainfall, and Crop Yield Relationships in Erbil Province, the Kurdistan Region of Iraq based on Landsat Time-Series MSAVI2 // J. Adv. Res. in Dynamical & Control Systems. 2019. V. 11, 12. P. 536–545. <https://doi.org/10.5373/JARDCS/V11SP12/20193249>.
- Gitelson A., Stark R., Grits U., Rundquist D.C. Vegetation and Soil Lines in Visible Spectral Space: A Concept and Technique for Remote Estimation of Vegetation Fraction // Int. J. Remote Sens. 2002. V. 23. P. 2537–2562.
- Gitelson A.A., Vina A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C., Keydan G., Leavitt B. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30(5). P. 1248. <https://doi.org/10.1029/2002GL016450>
- 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.
- Herrmann I., Shapira U., Kinast S., Karnieli A., Bonfil D.J. Ground-level hyperspectral imagery for detecting weeds in wheat fields // Precis. Agric. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9321-x>
- Hese S., Schmullius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf. 2009. V. 11. № 2. P. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2008.12.002>
- Hutto K.C., Shaw D.R., Byrd J.D., King R.L. Differentiation of turfgrass and common weed species using hyperspectral radiometry // Weed Sci. 2006. V. 54. № 2. P. 335–339. <https://doi.org/10.1614/WS-05-116R.1>
- Lamba D.W., Brown R.B. PA — precision agriculture: remote-sensing and mapping of weeds in crops // J. Agr. Eng. Res. 2001. V. 78(2). P. 117–125. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0630>
- Martin M.P., Barreto L., Riaco D., Fernandez-Quintanilla C., Vaughan P. Assessing the potential of hyperspectral remote sensing for the discrimination of grassweeds in winter cereal Crops // Int. J. Remote Sens. 2011. V. 32(1). P. 49–67. <https://doi.org/10.1080/01431160903439874>
- Moran J.A., Mitchell A.K., Goodmanson G., Stockburger K.A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison

- son of methods // *Tree Physiol.* 2000. V. 20. P. 1113–1120. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.16.1113>
- Petit S., Boursault A., Guilloux M., Munier-Jolain N., Reboud X.* Weeds in agricultural landscapes. A review // *Agron. Sustain. Dev.* 2011. V. 31(2). P. 309–317. <https://doi.org/10.1051/agro/2010020>
- Pflanz M., Nordmeyer H., Schirrmann M.* Weed mapping with UAS Imagery and a Bag of Visual Words based image classifier // *Remote Sens.* 2018. V. 10(10). P. 1530. <https://doi.org/10.3390/rs10101530>
- Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I.* Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia // *Remote Sens. Environ.* 2011. V. 115. P. 3539–3553.
- Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N.* The Information Content of Spectral Vegetation Indices in the Interpretation of Satellite Images of Cultivated Fields // *Biophys.* 2019. V. 64. № 4. P. 588–592.
- Planet Team.* Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth; Planet Company: San Francisco, CA, USA, 2018; Available online: <https://api.planet.com> (accessed on 10 January 2019).
- Qi I., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S.* A modified soil adjusted vegetation index // *Remote Sens. Environ.* 1994. V. 48. № 2. P. 119–126.
- Sims D.A., Gamon J.A.* Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages // *Remote Sens. Environ.* 2002. P. 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Thorp K., Tian L.F.* A review on remote sensing of weeds in agriculture // *Precis. Agric.* 2004. V. 5(5). P. 477–508. <https://doi.org/10.1007/s11119-004-5321-1>
- Vrindts E.J. De Baerdemaeker J., De Baerdemaeker, Ramon H.* Weed detection using canopy reflection // *Precis. Agric.* 2002. V. 3(1). P. 63–80. <https://doi.org/10.1023/A:1013326304427>

Informative Value of Spectral Vegetation Indices for Assessment of Weediness of Agricultural Crops According to Ground-Based and Satellite Data

T. I. Pisman¹, M. G. Erunova², I. Yu. Botvich¹, D. V. Emelyanov¹, N. A. Kononova¹, A. V. Bobrovsky³, A. A. Kryuchkov³, A. A. Shpedt³, and A. P. Shevyrnogov¹

¹*Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

²*Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”, Krasnoyarsk, Russia*

³*Krasnoyarsk Agricultural Research Institute of Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”, Krasnoyarsk, Russia*

The article presents the research results of assessing the degree of weediness of wheat crops, obtained by using optical ground-based and satellite spectral data from Dove satellites (PlanetScope) with a spatial resolution of 3 m for 2019. For interpretation of ground-based spectrometric and satellite images, vegetation indices were used: normalized vegetation index – NDVI, relative chlorophyll index – ClGreen, modified soil vegetation index – MSAVI2 and index of resistance to visible atmosphere – VARI. The possibility of assessing the degree of weediness of agricultural fields is shown. The higher the contamination, the lower the index values. During the growing season, a difference between the dynamics of the VARI index and the dynamics of the NDVI, ClGreen, and MSAVI2 indices was found. There was a high correlation between the NDVI, ClGreen, MSAVI2 indices and a low correlation between the VARI index and other indices. According to the map of the spatial distribution of the ClGreen index for the date 02.08.2019, the possibility of identifying contaminated areas of agricultural fields is shown.

Keywords: vegetation indices, PlanetScope, ground spectrometry, geobotanical research, wheat crops, Krasnoyarsk region

REFERENCES

- Arkipova O.E., Kachalina N.A., Tyutyunov Yu.V., Kovalev O.V.* Otsenka zasorennosti antropogennykh fitotsenozov na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli (na primere ambrozii polynnostnoy) [Weediness assessment of anthropogenic phytocenoses on the basis of satellite remote sensing data (a case example of common ragweed)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2014. № 6. P. 15–26 (In Russian).
- Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2014. V. 50. № 9. P. 840–852.
- Bondur V.G., Vorobev V.E.* Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2015. V. 51. № 9. P. 949–968.
- Gopp N.V., Savenkov O.A., Smirnov A.V.* Tsifrovoye kartografirovaniye urozhaynosti yarovoy pshenitsy na osnove vegetatsionnykh indeksov i otsenka eye izmeneniy v zavisimosti ot svoystv antropogenno-preobrazovannykh pochv [Digital mapping of spring wheat yield based on vegetation indices and estimation of its changes depending on the properties of anthropogenically transformed soils] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2019. T. 16. № 3. P. 125–139 (In Russian).
- 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.
- Ikenov I.A.* Informatsionnaya sistema otsenki sostoyaniya rastitelnosti na sel'skokhozyaystvennykh polyakh [Information system for assessing the state of vegetation in agricul-

- tural fields] // *Vestn. nauki*. 2019. T. 4. № 5(14). P. 485–491 (In Russian).
- Mikhaylenko I.M., Voronkov I.V.* Metody obnaruzheniya sornyakov, bolezney i vrediteley rasteniy po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Methods for detection of weeds, pests and diseases of plants from remote sensing data] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. T. 13. № 3. P. 72–83 (In Russian).
- Sid'ko A.F., Botvich I.Yu., Pis'man T.I., Shevyrnogov A.P.* Uglovoe raspredelenie otrazhatel'nykh harakteristik agrocenozov po nazemnym distantsionnym izmereniyam [Angular distribution of the reflective characteristics of agrocecosis ground remote sensing] // *Zhurn. Sib. feder. un-ta. Tekhnika i tekhnologii*. 2014. № 6. P. 665–673 (In Russian).
- Solpiyeva Zh.A., Urmambetova T.K.* Otsenka sostoyaniya elovykh lesov po sputnikovym dannym LANDSAT 8 na primere gosudarstvennogo natsionalnogo parka "Chon-kemin" [Assessment of the state of spruce forests using LANDSAT 8 satellite data on the example of the "Chon-Kemin" State National Park] // *Vestn. Kyrgyzskogo gos. un-ta stroitelstva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*. 2018. T. 1(59). P. 36–40 (In Russian).
- Tovstik E.V., Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya.* Identifikatsiya uchastkov massovogo rosta borshchevika Sosnovskogo s pomoshchyu spektralnykh indeksov po dannym Sentinel-2 [Identification of sites of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden. using spectral indices according to Sentinel-2 images] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2019. № 3. P. 34–40 (In Russian).
- Shevyrnogov A.P., Pisman T.I., Kononova N.A., Botvich I.Yu., Larko A.A., Vysotskaya G.S.* Sezonnaya dinamika rastitelnosti zaleznykh zemel Krasnoyarskoy lesostepi po nazemnym i sputnikovym dannym [Seasonal dynamics of fallow land vegetation in Krasnoyarsk forest steppe according to ground and satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. № 6. P. 39–51 (In Russian).
- Shukilovich A.Yu., Fedotova E.V., Maglinets Yu.A.* Primeneniye sensora MODIS dlya operativnogo monitoringa zemel selskokhozyaystvennogo naznacheniya [Using Modis data for agricultural areas monitoring] // *Zhurn. Sib. feder. un-ta. Tekhnika i tekhnologii*. 2016. T. 9. № 7. P. 1035–1044 (In Russian). DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-1035-1044
- Che'Ya N., Gupta M., Doug G., Lisle A., Basnet B., Campbell G.* Spectral discrimination of weeds using hyperspectral radiometry // *Proc. 5th Asian conf. Precis. Agric. (ACPA)*. 25–28 June. Jeju, Korea, 2013. P. 325.
- Gaznayee H.A., Al-Quraishi A.M.F.* Analysis of agricultural drought, rainfall, and crop yield relationships in Erbil Province, the Kurdistan Region of Iraq based on Landsat time-series MSAVI2 // *J. Adv. Res. in Dynamical & Control Systems*. 2019. V. 11, 12. P. 536–545. doi: 5373/JARDCS/V11SP12/20193249.
- Gitelson A., Stark R., Grits U., Rundquist D.C.* Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction // *Int. J. Remote Sens.* 2002. V. 23. P. 2537–2562.
- Gitelson A.A., Vina A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C., Keydan G., Leavitt B.* Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30(5). P. 1248. DOI: 10.1029/2002GL016450
- Herrmann I., Shapira U., Kinast S., Karnieli A., Bonfil D. J.* Ground-level hyperspectral imagery for detecting weeds in wheat fields // *Precis. Agric.* 2013. DOI: 10.1007/s11119-013-9321-x
- Hese S., Schmullius C.* High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // *Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf.* 2009. V. 11. № 2. P. 130–141. DOI: 10.1016/j.jag.2008.12.002
- Hutto K.C., Shaw D.R., Byrd J.D., King R.L.* Differentiation of turfgrass and common weed species using hyperspectral radiometry // *Weed Sci.* 2006. V. 54. № 2. P. 335–339. DOI: 10.1614/WS-05-116R.1
- Lamba D.W., Brown R.B.* PA – precision agriculture: remote-sensing and mapping of weeds in crops // *J. Agr. Eng. Res.* 2001. V. 78(2). P. 117–125. DOI: 10.1006/jaer.2000.0630
- Martin M.P., Barreto L., Riaco D., Fernandez-Quintanilla C., Vaughan P.* Assessing the potential of hyperspectral remote sensing for the discrimination of grassweeds in winter cereal Crops // *Int. J. Remote Sens.* 2011. V. 32(1). P. 49–67. DOI: 10.1080/01431160903439874
- Moran J.A., Mitchell A.K., Goodmanson G., Stockburger K.A.* Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods // *Tree Physiol.* 2000. V. 20. P. 1113–1120. DOI: 10.1093/treephys/20.16.1113
- Petit S., Boursault A., Guilloux M., Munier-Jolain N., Reboud X.* Weeds in agricultural landscapes. A review // *Agron. Sustain. Dev.* 2011. V. 31(2). P. 309–317. DOI: 10.1051/agro/2010020
- Pflanz M., Nordmeyer H., Schirrmann M.* Weed mapping with UAS Imagery and a Bag of Visual Words based image classifier // *Remote Sens.* 2018. V. 10(10). P. 1530. DOI: 10.3390/rs10101530
- Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I.* Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia // *Remote Sens. Environ.* 2011. V. 115. P. 3539–3553.
- Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y. N.* The information content of spectral vegetation indices in the interpretation of satellite images of cultivated fields // *Biophys.* 2019. V. 64. № 4. P. 588–592.
- Planet Team. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth; Planet Company: San Francisco, CA, USA, 2018; Available online: <https://api.planet.com> (accessed on 10 January 2019).
- Qi I., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S.* A modified soil adjusted vegetation index // *Remote Sens. Environ.* 1994. V. 48. № 2. P. 119–126.
- Sims D.A., Gamon J.A.* Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sens. Environ.* 2002. P. 337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X
- Thorp K., Tian L.F.* A review on remote sensing of weeds in agriculture // *Precis. Agric.* 2004. V. 5(5). P. 477–508. DOI: 10.1007/s11119-004-5321-1
- Voronina P.V., Mamash E.A.* Klassifikatsiya tematicheskikh zadach monitoringa selskogo khozyaystva s ispolzovaniyem dannyykh distantsionnogo zondirovaniya MODIS [Classification of thematic tasks of agricultural monitoring using MODIS remote sensing data] // *Vychislitelnyye tekhnologii*. 2014. T. 19. № 3. P. 76–102 (In Russian).
- Vrindts E.J. De Baerdemaeker J., De Baerdemaeker, Ramon H.* Weed detection using canopy reflection // *Precis. Agric.* 2002. V. 3(1). P. 63–80. DOI: 10.1023/A:1013326304427

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ АПШЕРОНСКОГО ПОЛУОСТРОВА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2021 г. Н. Р. Джафарова^{a, b, *}, Х. Р. Исмадова^{a, b, **}

^aИнститут географии Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан

^bНациональная академия авиации, Баку, Азербайджан

*E-mail: jafarova.nata@mail.ru

**E-mail: spaseazer@rambler.ru

Поступила в редакцию 29.10.2020 г.

Рассматривается проблема создания цифровой модели местности для оптимизации использования природных ресурсов Апшеронского полуострова Азербайджана. Для этого динамично развивающегося региона актуально иметь территориально-распределенную информационную систему, где собраны экспертные знания и геопространственная информация различного уровня и содержания. Основная идея – собрать в едином информационном пространстве разноплановые данные: векторные слои различного масштаба и тематического содержания, спутниковые данные, картографические материалы и результаты наземных измерений. Для оперативного доступа к ним все данные классифицированы по масштабу и тематике и представлены в единой картографической проекции в Базе геоданных. Создание единого информационного пространства сокращает объем вычислений и время обработки данных при создании новых тематических материалов по поступающей спутниковой информации. А также служит значительной поддержкой при обработке и интерпретации спутниковой информации. Взаимосвязь данных осуществляется средствами управления данными в геоинформационных системах.

Ключевые слова: цифровая модель местности, тематические векторные слои, база геоданных, классификация, группы векторных карт

DOI: 10.31857/S0205961421030040

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного динамического развития общества и усложнения технической и социальной инфраструктуры регионов информация становится таким же стратегическим ресурсом, как традиционные материальные и энергетические ресурсы. Современные информационные технологии, позволяющие создавать, хранить, перерабатывать и обеспечивать эффективные способы представления информационных ресурсов потребителю, стали важным фактором жизни общества и средством повышения эффективности управления всеми сферами общественной деятельности (Шокин, Федотов, 1998; Бондур, 1995, 2010, 2012; Бондур, Воробьев, 2015; Лаврова, Костяной и др., 2011). Существенную роль в информационном обеспечении соответствующих организаций занимают спутниковая информация, методы ее обработки (Бондур, 1995, 2014; Бондур, Старченков, 2001) и географические информационные системы (ГИС) (Берлянт, 2002; Бондур, 2014, 1995). Географические информационные системы позволяют систематизировать и анализировать поступающую разнородную ин-

формацию и представлять ее в виде цифровых моделей исследуемой местности с целью дальнейшего использования при принятии управленческих решений (Берлянт, 2002; Бондур, 2010, 2012, 2014; Чандра, Гош, 2008; Bondur, Tsidilina, 2005).

В данной работе представлена цифровая модель местности (ЦММ) и цифровая модель рельефа (ЦМР) Апшеронского полуострова Азербайджана, созданные по результатам обработки разновременной спутниковой и картографической информации, а также по наземным контактным измерениям. Для создания ЦММ и ЦМР привлекались результаты различных международных и региональных проектов, в которых участвовали авторы данной статьи. В ходе выполнения проектов накоплена цифровая база пространственных данных (векторных, растровых, результатов наземных измерений, обработки спутниковой информации). Используемые исходные и выходные данные существовали в различных масштабах и картографических проекциях, как в бумажном варианте, так и в цифровом. Очевидно, что существование таких разноплановых данных не способствовало управлению информацией и

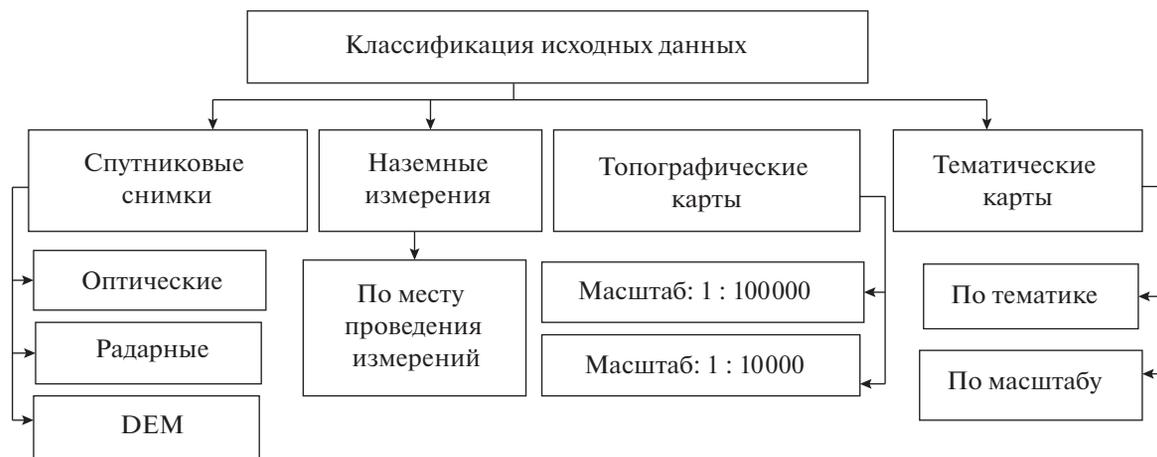


Рис. 1. Классификация исходной информации.

принятию оперативного решения для конкретных тематических задач.

Для Апшеронского полуострова с помощью ГИС-технологий все данные, полученные от различных источников информации, объединены в единой Базе геоданных (БГД), представлены в электронном виде и обрабатываются в едином информационно-аналитическом комплексе (Бадалова, 2012; Исмадова и др., 2017а, 2012б; Исмадова, 2005; Исмадова и др., 2017; Мехтиев и др., 2013; Исмаилов и др., 2017; Мехтиев и др., 2014; Jafarova, 2017). База геоданных имеет возможность пополняться новой информацией. Периодическое обновление Базы геоданных стало возможным благодаря спутниковой информации, получаемой с азербайджанского спутника AZERSKY. В настоящее время космические технологии получили широкое развитие в Азербайджане в связи деятельностью ОАО «АЗЕРКОСМОС», который предоставляет своим клиентам космическую информацию со спутника AZERSKY (PAN: 1.5 м; MS: 6м, spectral band: 4, RGB и NIR).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

Исходными данными для создания обширной цифровой модели местности были:

1. Аэрокосмические снимки: GEOEYE1, PLEIADES1, RAPIDEYE, SENTINEL, SPOT6/7, AZERSKY, IKONOS, LANDSAT 7/8, TERRASAT, EROSA, CARTOSAT2;

2. Картографические материалы составили топографические карты масштаба 1 : 100000 и 1 : 10000, а также различные тематические карты.

Все исходные данные после первичной обработки представлялись в единой картографической проекции в Базе геоданных. Методика составления единого информационного пространства для Апшеронского полуострова состояла в

создании Базы геоданных по результатам выполненных в разные годы международных и региональных проектов при участии авторов статьи. Исходная информация классифицируется по целевому назначению. С этой целью создается файловая База геоданных, где в цифровом виде исходная информация разбита на следующие пять отдельных структур: THEMATIC MAP, SATELLITE, VEKTOR, TOPOGRAPHIC, FIELD DATA (рис.1).

Все данные географически привязаны и имеют базовую картографическую проекцию: UTM, WGS 84, zone 39N.

Блок «ВЕКТОР» Базы геоданных представлен тематическими векторными слоями, составленными в процессе выполнения различных международных и региональных проектов, который периодически обновляется.

Составляющая блока «ВЕКТОР» ЦММ представляет собой совокупность пространственно-распределенных данных о природно-ресурсных объектах территории, полученных из различных источников для осуществления рационального управления этими территориями.

ГРУППЫ ТЕМАТИЧЕСКИХ ВЕКТОРНЫХ СЛОЕВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Группа векторных карт по процессам опустынивания

Группа векторных карт по процессам опустынивания содержит информацию по причинам, степени и типам опустынивания Апшеронского полуострова масштаба 1 : 100000 (Исмадова и др., 2017; Исмадова, 2005; Мамедов и др., 2002, 2016; Мамедов, Исмадова, 2018). Построение группы карт производилось по следующей схеме: по картографическим материалам создавались векторные слои землепользования, линейные векторные слои (дороги, каналы, коллекторы, трубопроводы,

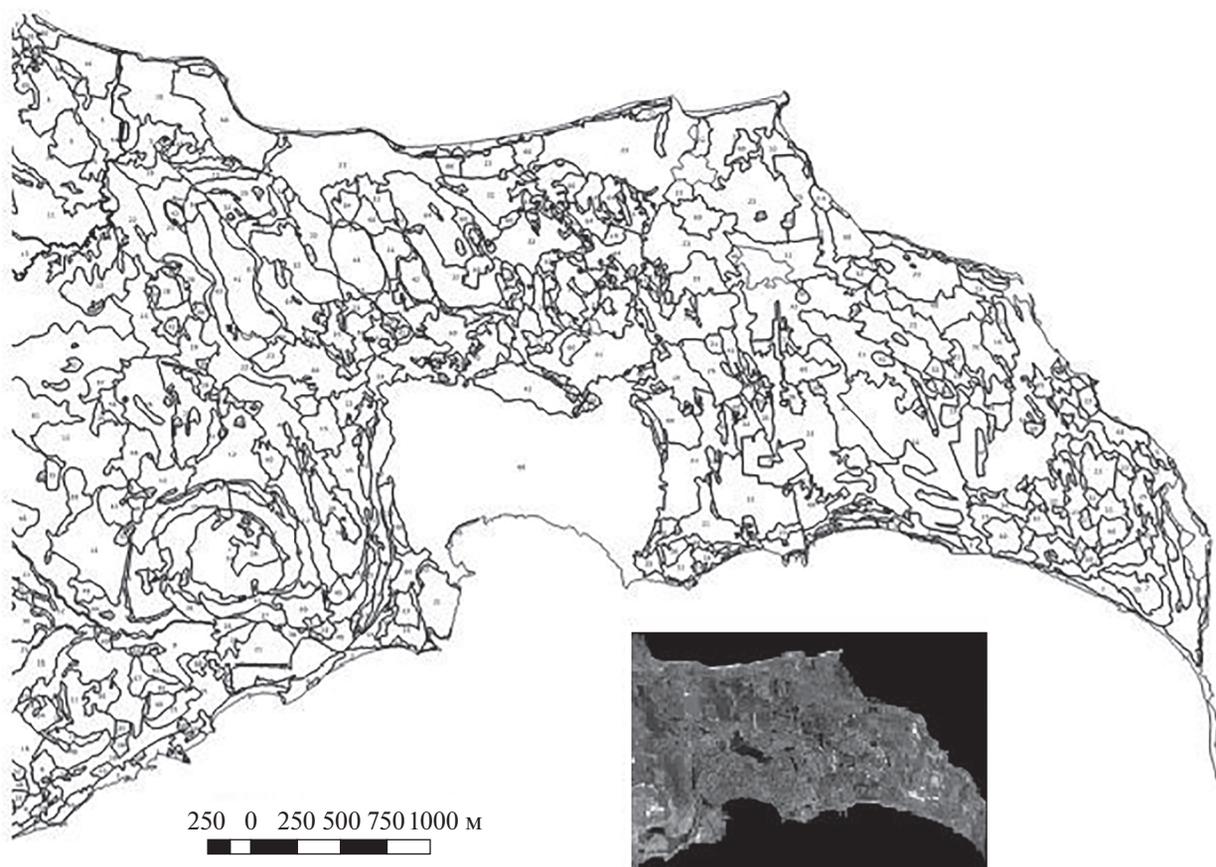


Рис. 2. Карта локальных ландшафтов, полученная при векторизации с космического снимка LANDSAT TM.

линии электропередач и т.д.), полигональные векторные слои (населенные пункты, сельскохозяйственные угодья, озера, болота, солончаки, водохранилище, отстойники, загрязненные территории, свалки, отвалы, промышленные зоны, аэропорты и т.д.). В результате выполнения процесса обработки космических снимков LANDSAT TM (1984, 1998, 2000 гг.) была составлена карта локальных ландшафтов Апшеронского полуострова, содержащая 67 наименований по совокупности следующих данных: растительности, типам почв, литологии, водной поверхности (рис. 2).

Для каждого ландшафтного контура с использованием международных показателей оценивались критерии опустынивания (причина, степень, тип) (Мамедов и др., 2002). Карты процессов опустынивания составлялись для оценки опустынивания за период 1984–2000 гг. Карты составлялись в рамках проекта ТАСИС “Борьба с Опустыниванием” (1998–2001 гг.) по технологии FAO UN (Food and Agriculture Organization United Nations). Составленные векторные слои землепользования и другие линейные и полигональные векторные слои эксперты использовали в каче-

стве информационной поддержки при оценке процессов опустынивания.

Группа карт растительность/землепользование

Группа карт растительность/землепользование создавалась по технологии FAO UN (Исмадова, 2005). Схема создания была следующей: векторизовались основные топографические объекты по топокартам масштаба 1 : 100000, которые служили поддержкой для дешифрирования космического снимка LANDSAT TM (1998–2000 гг.). Итоговая векторная карта, размещаемая в базе данных, содержала информацию о земном покрытии и землепользовании в масштабе 1 : 50000. Легенда карты, соответствующая классификации FAO UN (Antonio Di Gregorio, 1998), содержала следующие составляющие:

1. Земное покрытие – растительность, населенные пункты, горные территории и почвы, водные объекты, сельскохозяйственные территории, индустриальные зоны;
2. Классы землепользования, которые содержат 32 наименования. Проект выполнялся по линии FAO UN “Strengthening Capacity inventory of

Land Cover/Land Use by Remote Sensing” с июля 1999 г. по июнь 2001 г. (Исмацова, 2005).

Группа векторных карт по процессам засоления почв

Векторные слои по процессам засоления почв составлялись на основе исследований, оценок и полевых измерений Института географии Национальной академии наук Азербайджана. Итоговая карта представлена в статье (Исмаилов и др., 2017; Исмацова и др., 2014). Контуры исследуемых ландшафтов оцифровывались по снимку LANDSAT 7 (разрешение 30 м). Для каждого контура проводилась оценка процессов засоления почв и водной поверхности по данным наземных измерений с использованием следующих показателей: характер засоления, степень минерализации и степень засоления.

Группа векторных карт по нефтепромыслам Апшеронского полуострова на суше

Группа векторных слоев по нефтепромыслам Апшеронского полуострова состоит из слоев, созданных по топокартам 1980-х гг. масштаба 1 : 10000 (архивная информация) и созданных по космическим снимкам: GEOEYE, PLEIADES1 – 2013 г., IKONOS – 2007 г., SPOT 6/7 – 2016 г. Использовались как панхроматические, так и мультиспектральные снимки. Это позволило увеличить разрешение мультиспектральных снимков с помощью операции Pansharpening в программном комплексе ENVI5.2 (Бондур, 2014).

Таким образом, у нас были снимки с достаточным пространственным разрешением (0.65; 1; 1.15 м) для дешифрирования объектов мелких размеров, таких как нефтяные качалки и вышки (рис. 3, а). Причем для дешифрирования снимков имеется база топографических данных масштаба 1 : 100000 и масштаба 1 : 10000.

Точечные векторные слои нефтяных скважин, созданные по топокартам масштаба 1 : 10000, были наложены на космический снимок, что позволило идентифицировать их на снимке (рис. 3, а). На рис. 4 показан результат дешифрирования нефтяных скважин на нефтепромысле им. З. Тагиева по разновременным данным – снимку, полученному в 2013 г. со спутника GEOEYE (рис. 4, б) и карте 1980 г. (рис. 4, а). По данным векторизации выявлено, что большая часть территории в настоящее время отдана под жилищные застройки (рис. 4, в). При векторизации по карте 1980 г. выявлено 524 нефтяные скважины, а по космическому снимку 2013 г. дешифрировано 126 скважин (качалки и вышки). Это обстоятельство свидетельствует о сокращении деятельности данного нефтепромысла. Подобные векторные слои по ряду нефтепромыслов на Апшеронском полуострове также включены

в Базу геоданных. Работа выполнялась в рамках проекта Socar (шифр: SOCAREF2012, Исмацова и др., 2017).

Разновременные космические снимки и картографические материалы прошлых лет позволяют не только проследить динамику объектов инфраструктуры нефтепромыслов, но позволяют также проводить мониторинг загрязнений почв и водных объектов нефтью и отходами от нефтедобычи (Бондур, 2010, 2012; Бондур, Воробьев, 2015).

По спутниковой информации высокого разрешения были изучены спектральные характеристики различных участков загрязненных почв (рис. 3, б).

Группа векторных слоев по нефтепромыслам Апшеронского полуострова на Каспийском море

В данной группе созданы векторные слои всех эстакад и нефтяных платформ с топографических карт и по снимкам.

По космическим снимкам высокого разрешения GEOEYE1, PLEIADES1, SPOT 6/7, AZERSKY, IKONOS создана фотографическая База данных по различным типам платформ и различным типам разлива нефти, которая является информационной поддержкой для дешифрирования космических снимков (Бондур, 2012, 2010; Лаврова и др., 2011; Мехтиев и др., 2014).

По космическим снимкам для всех морских нефтепромыслов были оцифрованы эстакады и морские платформы, которые не указаны на архивных картах. Соответственно, создавались векторные слои батиметрии, подводных и надводных камней, линий электропередач, маяков, жилых строений на эстакадах, нефтехранилища, портов и нефтепромыслов (НГДУ) и т.д. (Бадалова, 2012; Мехтиев и др., 2014; Ismatova et al., 2018). Выполнение проекта SOCAR (шифр: SOCAREF2012) по инвентаризации объектов нефтепромыслов на Апшеронском полуострове и на море позволило создать единое информационное пространство для объектов инфраструктуры всех нефтепромыслов в следующей классификации, данной на рис. 5.

Группа геологических векторных слоев и цифровая модель рельефа Апшеронского полуострова

Данная группа слоев содержит тематические слои с геологических карт масштаба 1 : 500000 (геологическая, тектоническая, структурная) (Вабаев и др., 2009). Она содержит такие слои как линеаменты, сдвиги, надвиги, изогипсы, глубинные разломы и т.д. (рис. 6). На рис. 6, в эти векторные слои наложены на цифровую модель рельефа.



Спектральные характеристики тестовых участков

Количественные характеристики	Профиль отсчетов спектральной яркости	Тестовые участки	Местоположение тестовых участков
Ср. значение – 38.750 min – 24 max – 50 Разброс – 26			
Ср. значение – 42.208 min – 38 max – 50 Разброс – 12			

Рис. 3. а. Созданные векторные слои нефтяных скважин с топокарт (снимок справа) и наложение их в ГИС на космический снимок (слева). **б.** Пример исследования спектральных характеристик загрязненных земель (Мехтиев, Исмадова и др., 2013)

Цифровая модель рельефа (ЦМР) построена двумя способами и включена в цифровую модель местности Апшеронского полуострова. Первый способ – это ЦМР, построенная на основе DEM-модели, полученной со спутника SPOT6. На рис. 6, а показана DEM-модель (топографическая) по комбинации уклона, экспозиции и те-

ни, созданная в программном комплексе ENVI 5.2. Второй способ – построение TIN-модели по точкам высот масштаба 1 : 10000. Схема создания: создана точечная тема по высотам с топокарт масштаба 1 : 10000. Далее с помощью инструментов Spatial Analyst Tools (Topo to Raster) строится TIN-модель (рис. 6, б).

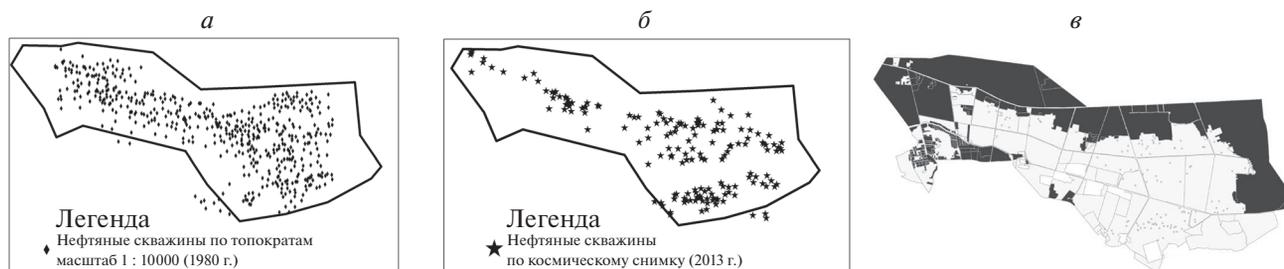


Рис. 4. Сравнительный анализ инфраструктуры нефтепромысла им. З. Тагиева по нефтяным скважинам по состоянию на 1980 и 2013 гг. *а* – распределение скважин на нефтепромысле им. З. Тагиева в 1980 г., *б* – распределение скважин на нефтепромысле им. З. Тагиева в 2013 г., *в* – темным цветом указана территория нефтепромысла, отведенная под жилые постройки.



Рис. 5. Классификация векторных слоев объектов инфраструктуры нефтепромыслов на Апшеронском полуострове.

Оцифрованные в 2D формате по структурным и тектоническим картам слои, наложенные на цифровую модель рельефа, такие как уклон, экспозиция, кривизна и др., дают для геологов более подробную информацию.

Цифровая модель рельефа крупного масштаба может служить поддержкой для поиска месторождений углеводородов (рис. 6, *в*), наблюдения эрозийных процессов, оценки экологических

рисков и многих других процессов и явлений (например, деятельности грязевых вулканов, рис. 6, *з*) (Щепин и др., 2007; Чандра, Гош, 2008; Ismatova et al., 2018).

Группа социально-экономических векторных слоев

Группа социально-экономических векторных карт содержит следующие слои: демография, об-

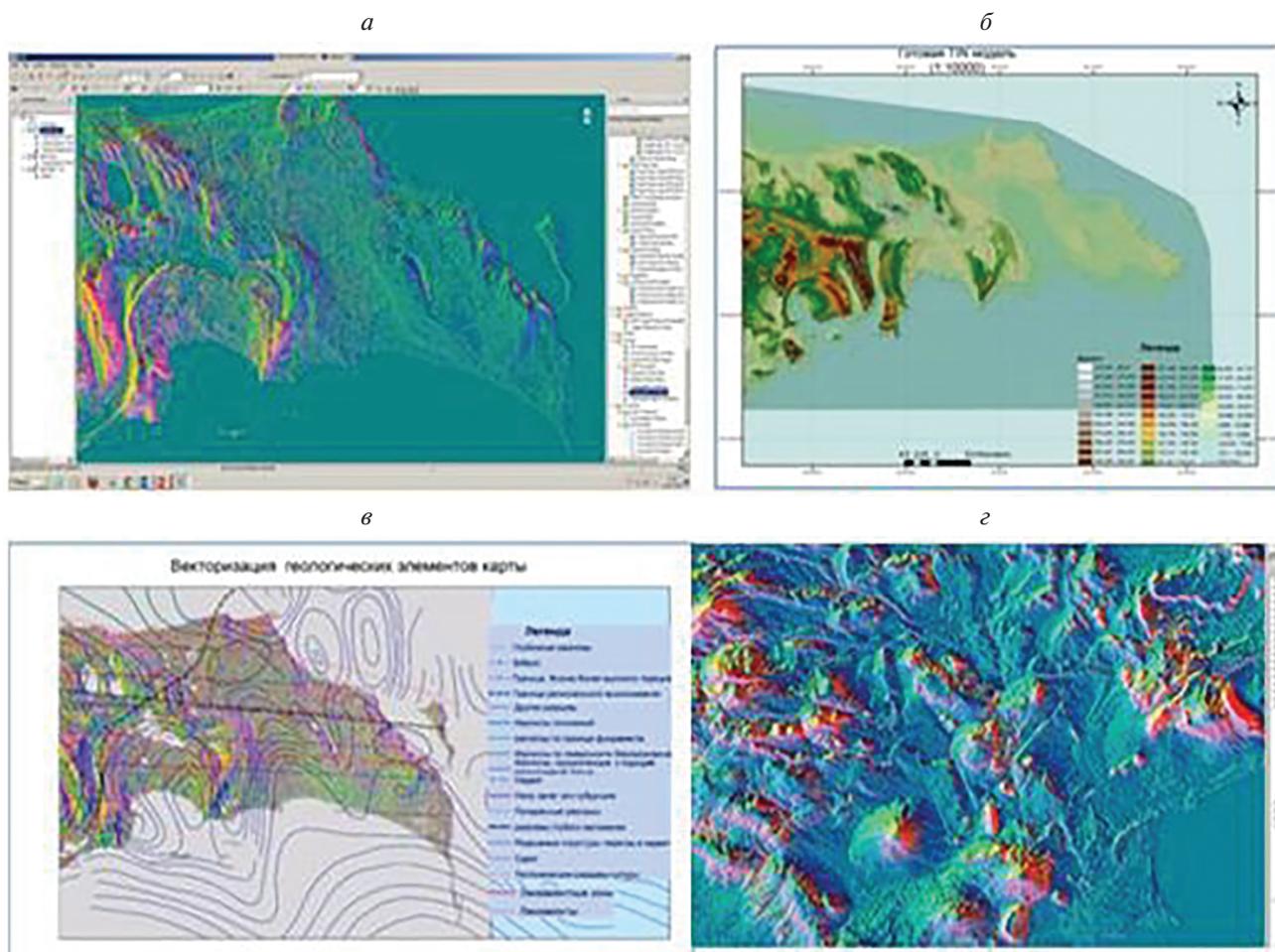


Рис. 6. Сверху: DEM- и TIN-модели Апшеронского полуострова (а и б соответственно), внизу: слева – наложение векторных слоев геологических элементов на ЦМР, справа – цифровая модель грязевых вулканов в прибрежной зоне Каспийского моря (в и з соответственно).

разование, медицина, сельское хозяйство, промышленность, транспорт. Эти данные собраны по Апшеронскому району Азербайджана, по г. Баку и Сумгаит (Jafarova, 2017).

Определение взаимосвязи природных и социальных условий проживания – это была основная задача социально-экономического картографирования с помощью ГИС-технологий. На рис. 7 показаны карты из блока социально-экономических показателей. На рис. 7, а дана карта освоенности территории Апшеронского полуострова, которая была создана по космическому снимку AZERSKY (2016 г.). Если сравнивать ее с топокартами или архивными снимками, то можно наблюдать значительный рост площади населенных пунктов, а следовательно, и прирост населения. На рис. 7, б представлен результат мониторинга территории по разновременным космическим снимкам и прежним топографическим картам. Результат показывает интенсивное освоение ранее не занятой прибрежной территории полуост-

рова и увеличение площади населенных пунктов за последние 25 лет. Выделенные контура соответствуют границам населенных пунктов по топокартам 1980–1987 гг. По разновременной спутниковой информации хорошо прослеживается динамика прибрежных территорий, где расположены зоны отдыха, морские порты, зоны затопления и подтопления.

В этой серии карт имеются данные по демографии (количество населения по городам, количество женщин и мужчин, естественный прирост, смертность и рождаемость), по развитию туризма, росту доходов, занятости населения, по образованию, медицине, сельскому хозяйству, промышленности и транспорту и т.д. Для изучения прибрежной территории на суше и динамики ее ландшафтов в настоящее время достаточно использовать снимки со спутника AZERSKY с пространственным разрешением 6 м для мультиспектральной съемки и 1.5 м для панхроматической съемки. Операции PANSHARPING в ПО

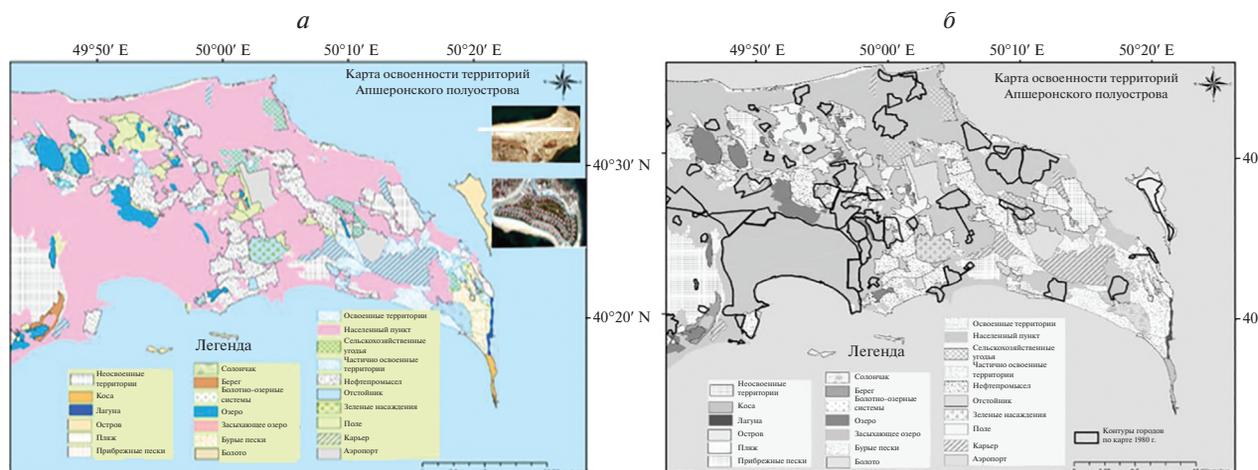


Рис. 7. а – карта освоенности территории Апшеронского полуострова, по снимку AZERSKY 2016 г., б – карта с указанием контуров населенных пунктов с границей 1987 г., наложенных на контуры тех же пунктов по состоянию на 2016 г.

ENVI 5.2. позволяют трансформировать мультиспектральные снимки 6 м в мультиспектральные снимки с разрешением 1.5 м.

На карте (рис. 7, а) представлены два космических снимка территории мыса Амбуран. Один снимок 2004 г., где мы видим пустое поле, и ниже эта территория в 2016 г., где в настоящее время построена рекреационная зона.

Мониторинг изменений ландшафтов, эко и геосистем по спутниковой информации позволяет проследить, в том числе, динамику процессов опустынивания (Исмадова, Мамедова, 2017). Этот процесс можно наблюдать по карте освоенности территории полуострова (рис. 7, а), на основании которой можно сделать вывод, что при развитии опустынивания может преобладать техногенная причина.

СОЗДАНИЕ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ ДЛЯ АПШЕРОНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Таким образом, выше было показано, что при выполнении различных проектов с использованием спутниковой и другой пространственной информации были созданы различные тематические векторные слои на исследуемую территорию. Работы в разных проектах иногда дублировались, слои ландшафтов и землепользования содержали разные легенды в разных картографических проекциях и масштабах.

Отсюда возникла задача: для более легкого доступа к существующим группам векторных слоев и картографическим материалам с целью их использования, необходимо систематизировать и собрать все группы данных в едином информационном пространстве. В этом случае они будут ис-

пользованы более оперативно, без дублирования одинаковых операций по единой схеме доступа к данным и их обработки с целью создания новых тематических слоев на их основе и текущей спутниковой информации (Исмадова, Талыбова, 2014).

Для создания единого информационного пространства (ЦММ) все созданные слои были классифицированы. На схеме рис. 8 дана классификация векторных слоев, созданных по топографическим картам, включенных в ЦММ по схемам, данным на рис. 9 и 10.

С помощью программного комплекса *ArcGIS 10.3* создается векторная База геоданных (БГД "VECTOR"), которая представлена в двух структурах: "TOPOLOGY" и "THEMATIC".

В группу векторных карт БГД "TOPOLOGY" входят векторные слои элементов топографических карт масштабов 1 : 100000 и 1 : 10000: дороги, каналы, трубопроводы, населенные пункты, геосистемы, экосистемы, социально-экономические системы и др. (рис. 8). Топографические карты масштаба 1 : 100000 имеют точные географические координаты. Топографические карты масштаба 1 : 10000 не имели координатные данные, и их географическая привязка осуществлялась по опорным точкам.

Карты 1 : 10000 масштаба привязывались относительно к космическим изображениям, погрешность привязки составляла 0.00006 м. Таким образом, сформировав базовую топографическую основу масштабов 1 : 100000 и 1 : 10000, была решена задача географической привязки всей поступающей на обработку информации (наземных измерений, различных таблиц, карт и др. источников).

Тематическая База геоданных "THEMATIC" обширная и состоит из групп тематических век-

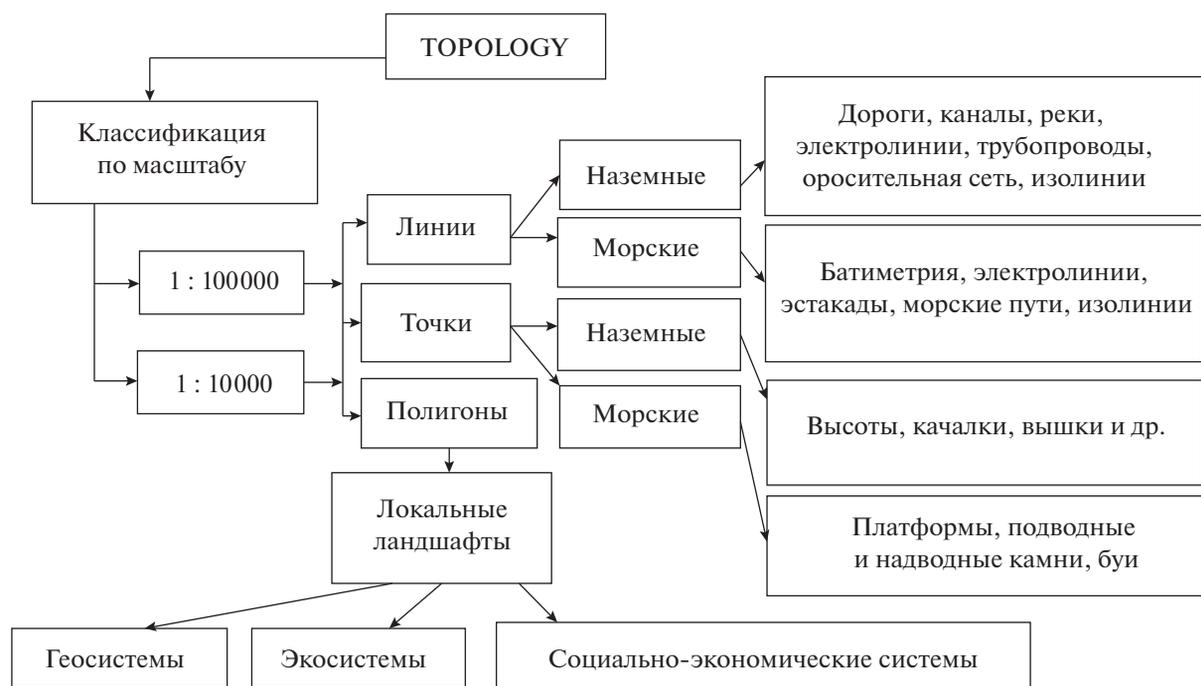


Рис. 8. Классификация базовых векторных слоев, векторизованных с топографических карт.

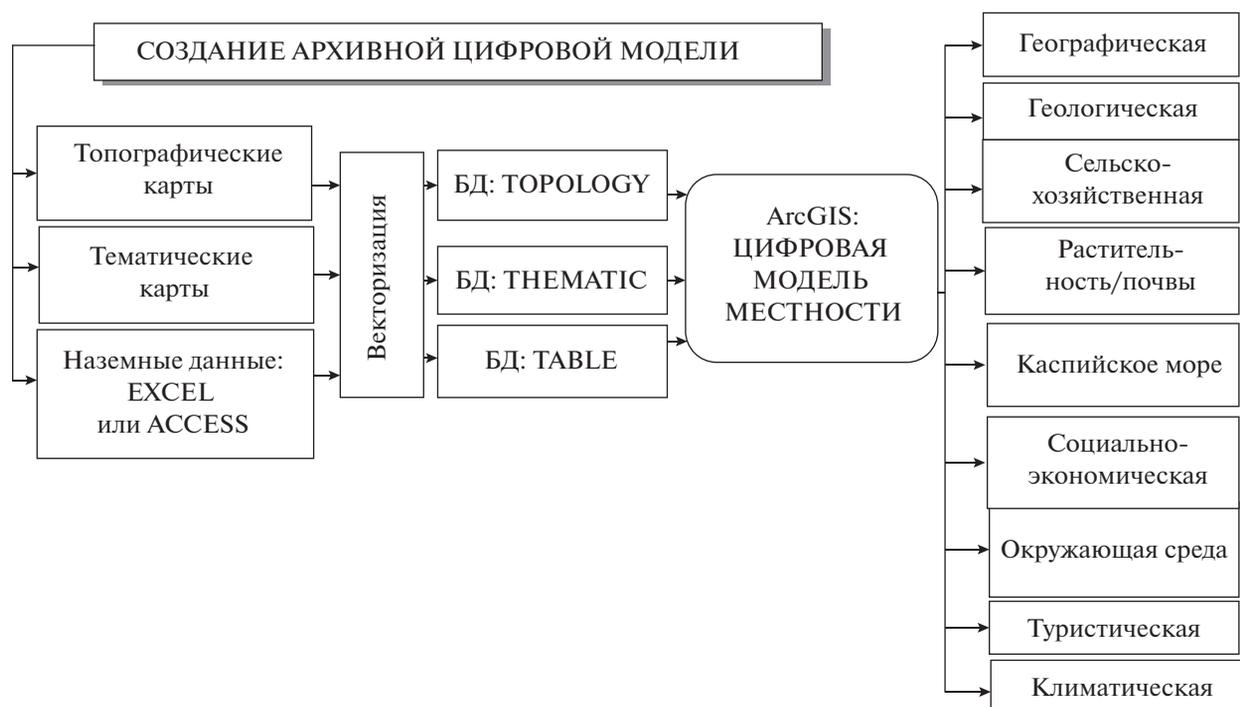


Рис. 9. Схема создания базовой цифровой модели местности (ЦММ) по группам векторных слоев различного содержания.

торных слоев, полученных путем векторизации с тематических карт масштаба 1 : 500000 (общей географической, геологической, сельского хо-

зяйства, растительности, почвенной, тектонических разломов, геоморфологической, туристической, климатической и др., рис. 9).

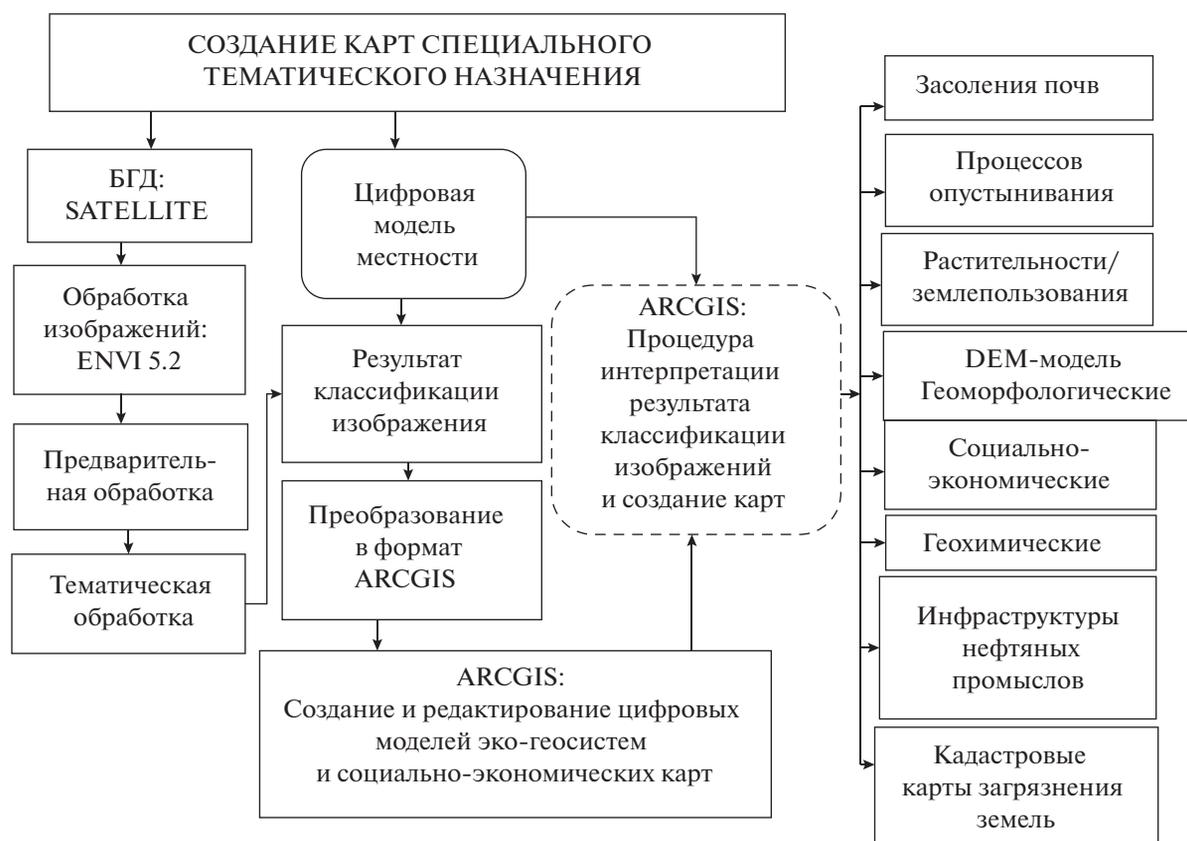


Рис. 10. Блок-схема создания новых специальных карт, при помощи созданной базы топографических и тематических векторных слоев на базе обработки спутниковой информации.

Карты по специальным тематическим направлениям создаются на основе обработки спутниковой информации и интерпретации результатов обработки изображений (рис. 10). Обработка аэрокосмической информации выполняется с помощью программных продуктов по обработке изображений (ENVI 5.2.). Результат обработки преобразуется в векторный формат. Анализ, редактирование и интерпретация проводятся с помощью мощного инструментария анализа и создания картографической продукции программы ArcGIS версии 10.3 и выше (рис. 10).

Для поиска нужной информации или обновления цифровая модель Апшеронского полуострова связана с Базой данных, созданной в MS ACCESS. Например, на рис. 11, а показаны данные по частным оценкам почв на пригодность земель. Вся информация разделена по квадратам на картах масштаба 1 : 100000 (например, квадрат карты К-39-124 разбит на квадраты 50000 масштаба и закодирован цифрами, например: 3.1, 3.2, 3.3, 3.4). Для того чтобы посмотреть информацию по квадрату 3.2, необходимо сделать запрос (рис. 11, в), и по этому запросу выдаются все зафиксированные объекты по месторасположению на данном квадрате (рис. 11, б, в).

Создание Базы данных в MS ACCESS связано с тем, что многие пользователи не владеют опытом работ с геоинформационными системами и многим ГИС недоступны, но MS ACCESS находится на каждом компьютере, и информация может обновляться в привычной и доступной программе. Далее, так как БД MSACCESS связана с ЦММ в ГИС, то обновленная информация фиксируется инструментами ГИС.

Таким образом, структура созданной цифровой модели местности позволяет обновлять информацию по текущим данным, а архивные данные могут служить для сравнительного анализа и оценки динамики происходящих явлений и ситуаций.

Построенные цифровые модели местности и рельефа, база данных служат поддержкой при принятии решений.

Таким образом, использование ГИС-технологий позволяет учитывать широкий спектр природных и других факторов при обосновании различных направлений хозяйственной деятельности, а спутниковая информация предоставляет объективную информацию о состоянии природно-ресурсных объектов исследуемого региона.

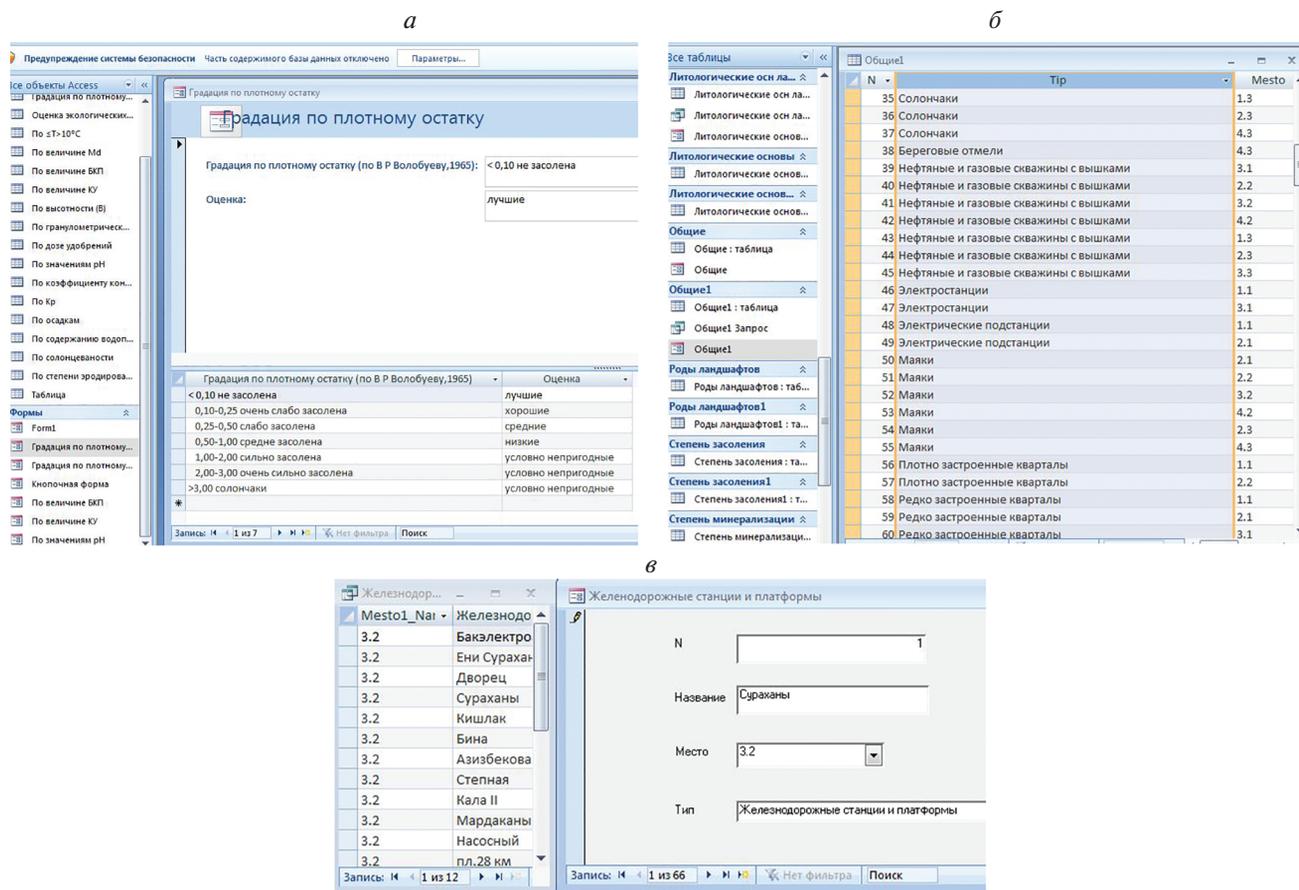


Рис. 11. а – база данных частных оценок почв. б – фрагмент Базы данных объектов, гео- и эко-ландшафтов, информация разбита по местоположению в квадратах топографических карт Апшерона. в – по запросу “Место 3.2” выделяются железнодорожные станции, находящиеся в этом квадрате ж/д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание обширной единой цифровой модели Апшеронского полуострова актуально для динамично развивающегося региона Азербайджана, который является самым густонаселенным районом, с развитой инфраструктурой дорог, с нефтедобывающей, обрабатывающей и другой промышленностью.

Построенные цифровые модели местности и рельефа способствуют расширению масштабов практического внедрения космической информации в информационную структуру Апшеронского полуострова.

Представленные на ее основе цифровые модели различной тематики могут использоваться для повышения эффективности регионального управления и оценки развития эколого-социально-экономического состояния данного региона.

Систематизированные информационные ресурсы позволяют с достаточной простотой организовывать поиск нужной информации, поддержи-

вают распределенные системы хранения данных, дают возможность использования удаленных методов редактирования и пополнения информации.

Созданная цифровая модель для Апшеронского полуострова в настоящее время используется как один из блоков образовательного геосервиса для студентов и магистров аэрокосмического факультета в Национальной академии авиации и в образовательном процессе в Бакинском государственном университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадалова А.Н.* Роль спутниковой информации в задачах экологического мониторинга прибрежной зоны Каспийского моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 1–11.
- Берлянд А.М.* Картография. М.: Аспект Пресс, 2002. 336 с.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса, 2010. № 6. С. 6–17.

- Бондур В.Г.* (ред.) Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. М.: Научный мир, 2012. 558 с.
- Бондур В.Г.* Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 2. С. 14–38.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Исмаилов А.И., Абдуллаев Х.И., Исмаилов Х.Р., Аршад Я.* Вычисление различных индексов для определения засоленных земель на основе обработки мультиспектральных космических снимков // География и природные ресурсы. Труды Азерб. Географического Общества. Баку, 2017. Т. 5. № 1. С. 118–122. ISBN 978-9952-8032-5-9.
- Исмаилов Х.Р., Мамедова Н.Р., Мамедов Т.Р.* Применение данных дистанционного зондирования в различных проектах пространственного анализа территории // Взаимосвязь человека и окружающей среды. Баку, 2017. Т. 20. С. 257–264.
- Исмаилов Х.Р.* Автоматизированное дешифрирование процессов опустынивания по данным дистанционного зондирования. // Изв. АНАКА. 2005. Т. 8. № 1(8). С. 16–22.
- Исмаилов Х.Р.* Роль данных ДЗ при картировании земель в Азербайджане. // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. Москва. 2005. С. 273–278.
- Исмаилов Х.Р., Исмаилов А.И., Сулейманова Е.Р.* Картографирование процессов засоления почв Апшеронского полуострова на базе современных информационных технологий // Вест. Алтайского Гос. Универ. № 5(115). 2014. С. 86–89.
- Исмаилов Х.Р., Талыбова С.С.* Образовательный геосервис “Обработка данных дистанционного зондирования” // Научные материалы. Нац. Акад. Авиации, Баку, 2014. № 16–3. С. 61–67.
- Исмаилов Х.Р., Талыбова С.С., Джабаров Х.И.* Создание информационной аналитической системы по нефтепромыслам Апшеронского полуострова на базе спутниковой информации высокого разрешения // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. М., 2017. С. 91.
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
- Мамедов Р.М., Будагов Б.А., Микаилов А.А., Исмаилов Х.Р.* Динамика процессов опустынивания в восточной части Азербайджанской республики // Изв. Наук о Земле. НАН Азербайджана. 2002. № 2. С. 7–17.
- Мамедов Р.М., Исмаилов Х.Р., Джафарова Н.Р.* Комплексная методика составления карт процессов опустынивания Апшеронского полуострова на основе космических снимков // Изв. Нац. Акад. Наук Азерб. 2016. № 3–4. С. 65–76.
- Мамедов Р.М., Исмаилов Х.Р.* Проблемы опустынивания на территории Азербайджана // Вестник Нац. АН Азерб. 2018. Т. 5. № 3. С. 32–47.
- Мехтиева А.Ш., Исмаилов Х.Р., Бадалова А.Н.* Методика формирования оптимальных эталонных участков загрязненных отходами от нефтедобычи территорий для тестирования систем дистанционного зондирования // Меж. сбор. науч. трудов. Информационные технологии и системы. Выпуск 2(11). Санкт-Петербург, 2013. С. 74–78.
- Мехтиева А.Ш., Исмаилов Х.Р., Бадалова А.Н., Талыбова С.С.* Аэрокосмический мониторинг нефтегазовых месторождений // Научные материалы. НАА. Баку. 2014. № 2. С. 26–34.
- Чандра А.М., Гош С.К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.
- Шокин Ю.И., Федотов А.М.* Распределенные системы // Вычислительные технологии. 1998. Т. 3. № 5. С. 79–93.
- Щепин М.В., Евдокимов С.В., Головченко Ю.В.* Выявление кольцевых структур по результатам обработки космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 4. С. 74–87.
- Babaev V.M., Mekhtiyev A.Sh., Pashayev A.M., Baqirov H.S., Mamedov Q.Sh., Ahmedov D.M., Masimov A.A., Imamverdiyev N.F., Mamedova Z.I.* Tectonic development, geodynamic conditions of formation and patterns of location of mineral deposits in the Caucasian segment of the Mediterranean belt (Azerbaijan). Baku: BGU, 2009. 146 p.
- Bondur V., Tsidilina M.* Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Antonio Di Gregorio.* Land cover classification system(LCCS) // Classification Concepts and User. FAO UN. Rome, 1998. 95 с.
- Ismatova Kh.R., Talibova S.S., Jabarov H.I., Sultanov S.A., Jafarova N.R.* Prospects for increasing the efficiency of aerospace monitoring methods used to solve the problems of the oil and gas complex // EurasianGIScongress. 2018. Proceeding book. P. 605–617.
- Jafarova N.R.* Aerocosmic Monitoring for Ecological and Social and Economic Cartography // February experience of youth advanced potential space problems – I International Scientific and Practical Youth Conference materials. February. 2017. Baku. P. 21–23.

Digital Model of the Apsheron Peninsula Based on Satellite Information

N. R. Jafarova^{1,2} and Kh. R. Ismatova^{1,2}

¹*Institute of Geography, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan*

²*National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan*

The problem of creating a digital terrain model to optimize the use of natural resources of the Apsheron Peninsula of Azerbaijan is considered. For this dynamically developing region, it is important to have a geographically distributed information system, where expert knowledge and geospatial information of various levels and content are collected. The main idea is to collect diverse data in a single information space: vector layers of various scales and thematic content, satellite data, cartographic materials and results of ground measurements. For quick access to them, all data is classified by scale and subject matter and presented in a single cartographic projection in the Geodatabase. Creation of a single information space reduces the amount of computation and data processing time when creating new thematic materials on the incoming satellite information. And also serves as a significant support for the processing and interpretation of satellite information. Data interconnection is carried out by means of data management in geographic information systems.

Keywords: digital terrain model, thematic vector layers, geodatabase, classification, groups of vector maps

REFERENCES

- Bondur V.G.* (ed.). Aerokosmicheskiy monitoring ob'yektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace monitoring of oil and gas facilities]. M.: Nauchnyy mir, 2012. 558 p.
- Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2014. V. 50. № 9. P. 840–852.
- Bondur V.G.* Printsipy postroeniya kosmicheskoy sistemy monitoringa Zemli v ekologicheskikh i prirodno-resursnykh tselyakh [Principles of constructing a space system for monitoring the Earth for environmental and natural resource purposes] // *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka.* 1995. № 2. P. 14–38 (In Russian).
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka.* 2001. № 3. P. 118–143.
- Bondur V.G., Vorobev V.E.* Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2015. V. 51. № 9. P. 949–968.
- Bondur V., Tsidilina M.* Features of Formation of Remote Sensing and Sea Truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Berlyand A.M.* Kartografiya [Cartography]. M.: Aspekt Press, 2002. 336 p. (In Russian).
- Badalova A.N.* Rol' sputnikovoy informatsii v zadachakh ekologicheskogo monitoringa pribrezhnoy zony Kaspiskogo morya [The role of satellite information in the tasks of environmental monitoring of the coastal zone of the Caspian Sea] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2012. № 2. P. 1–11 (In Russian).
- Lavrova O.Yu., Kostyanov A.G., Lebedev S.A. et al.* Kompleksnyy sputnikovyy monitoring morey Rossii [Comprehensive satellite monitoring of the seas of Russia]. M.: IKI RAN, 2011. 480 p. (In Russian).
- Ismatova Kh.R., Mamedova N.R., Mamedov T.R.* Prime-neniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya v razlichnykh proyektakh prostranstvennogo analiza territorii [Application of remote sensing data in various projects of spatial analysis of the territory] // *Vzaimosvyaz' cheloveka i okruzhayushchey sredy.* Baku, 2017. T. 20. P. 257–264.
- Ismatova Kh.R.* Avtomatizirovannoye deshifirovaniye protsessov opustynivaniya po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Automated interpretation of desertification processes based on remote sensing data] // *Izv. ANAKA.* 2005. T. 8. № 1(8). P. 16–22.
- Ismatova Kh.R.* Rol' dannykh DZ pri kartirovaniy zemlepol'zovaniya v Azerbaydzhanе [The role of remote sensing data in land use mapping in Azerbaijan] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* Moskva, 2005. P. 273–278 (In Russian).
- Ismatova Kh.R., Ismailov A.I., Suleymanova E.R.* Kartografirovaniye protsessov zasoleniya pochv Apsheronского полуострова na baze sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy [Mapping of soil salinization processes in the Apsheron Peninsula based on modern information technologies] // *Vest. Altayskogo Gos. Univer.* № 5(115). 2014. P. 86–89 (In Russian).
- Ismatova Kh.R., Talybova S.S.* Obrazovatel'nyy geoservis "Obrabotka dannykh distantsionnogo zondirovaniya" [Educational geoservice "Remote sensing data processing"] // *Nauchnyye materialy. Nats. Akad. Aviatsii, Baku.* 2014. № 16–3. P. 61–67.
- Ismatova Kh.R., Talybova S.S., Dzhabbarov K.H.I.* Sozdaniye informatsionnoy analiticheskoy sistemy po neftepromyslam Apsheronского полуострова na baze sputnikovoy informatsii vysokogo razresheniya [Creation of an information analytical system for the oil fields of the Apsheron Peninsula based on high-resolution satellite information] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa / Pod. red. E.A. Lupyana, O.Yu. Lavrovoy.* M., 2017. P. 91 (In Russian).
- Ismailov A.I., Abdullayev Kh.I., Ismatova Kh.R., Arshad Y.* Vychisleniye razlichnykh indeksov dlya opredeleniya zasolenennykh zemel' na osnove obrabotki mul'tispektral'nykh

- kosmicheskikh snimkov [Calculation of various indices for determining saline lands based on processing of multispectral satellite images] // *Geografiya i prirodnyye resursy. Trudy Azerb. Geograficheskogo Obshchestva*. Baku, 2017. T. 5. № 1. P. 118–122. ISBN 978-9952-8032-5-9.
- Mamedov R.M., Budagov B.A., Mikailov A.A., Ismatova Kh.R.* Dinamika protsessov opustynivaniya v vostochnoy chasti Azerbaydzhanskoj respubliki [Dynamics of desertification processes in the eastern part of the Azerbaijan Republic] // *Izv. Nauk o Zemle. NAN Azerbaydzhana*. 2002. № 2. P. 7–17.
- Mekhtiyev A.Sh., Ismatova Kh.R., Badalova A.N.* Metodika formirovaniya optimal'nykh etalonnnykh uchastkov zagryaznennykh otkhodami ot nefte dobychi territoriy dlya testirovaniya sistem distantsionnogo zondirovaniya [Methodology for the formation of optimal reference areas contaminated with waste from oil production areas for testing remote sensing systems] // *Mezh. sbor. nauch. trudov. Informatcionnyye tekhnologii i sistemy. Vypusk 2(11)*. Sankt-Peterburg, 2013. P. 74–78 (In Russian).
- Mekhtiyev A.Sh., Ismatova Kh.R., Badalova A.N., Talybova S.S.* Aerokosmicheskiy monitoring neftegazovykh mestorozhdeniy [Aerospace monitoring of oil and gas fields] // *Nauchnyye materialy. NAA. Baku*, 2014. № 2. P. 26–34.
- Mamedov R.M., Ismatova Kh.R., Dzhafarova N.R.* Kompleksnaya metodika sostavleniya kart protsessov opustynivaniya Apsheron'skogo poluostrova na osnove kosmicheskikh snimkov [Complex methodology for compiling maps of desertification processes of the Apsheron Peninsula based on satellite images] // *Izv. Nats. Akad. Nauk Azerb*. 2016. № 3–4. P. 65–76.
- Mamedov R.M., Ismatova Kh.R.* Problemy opustynivaniya na territorii Azerbaydzhana [Problems of desertification in the territory of Azerbaijan] // *Vestnik Nats. Akademii Nauk Azerb*. 2018. T. 5. № 3. P. 32–47.
- Shchepin M.V., Yevdokimov S.V., Golovchenko YU.V.* Vyyavleniye kol'tsevykh struktur po rezul'tatam obrabotki kosmicheskikh snimkov [Identification of ring structures based on the results of processing satellite images] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 4. P. 74–87 (In Russian).
- Shokin Yu.I., Fedotov A.M.* Raspredelonnnyye sistemy [Distributed systems] // *Vychislitel'nyye tekhnologii*. 1998. T. 3. № 5. P. 79–93 (In Russian).
- Chandra A.M., Gosh S.K.* Distantsionnoye zondirovaniye i geograficheskiye informatsionnyye sistemy [Remote sensing and geographic information systems]. M.: Tekhnosfera, 2008. 312 p. (In Russian). *Antonio Di Gregorio*. Land cover classification system (LCCS). // *Classification Concepts and User*. FAO UN. Rome, 1998. 95 p.
- Babaev V.M., Mekhtiyev A.Sh., Pashayev A.M., Baqirov H.S., Mamedov Q.Sh., Ahmedov D.M., Masimov A.A., Imamverdiyev N.F., Mamedova Z.I.* Tectonic development, geodynamic conditions of formation and patterns of location of mineral deposits in the Caucasian segment of the Mediterranean belt (Azerbaijan). Baku: BGU, 2009. 146 p.
- Jafarova N.R.* Aerocosmic Monitoring for Ecological and Social and Economic Cartography // February experience of youth advanced potential space problems – I International Scientific and Practical Youth Conference materials. February. 2017. Baku. P. 21–23.
- Ismatova Kh.R., Talibova S.S., Jabarov H.I., Sultanov S.A., Jafarova N.R.* Prospects for increasing the efficiency of aerospace monitoring methods used to solve the problems of the oil and gas complex // *Eurasian GIS congress*. 2018. Proceeding book. P. 605–617.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СНИМКОВ ИСЗ НА ПОЛУЧАЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЫВОВ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

© 2021 г. Л. Н. Дымент^{а, *}, П. В. Аксенов^а, С. М. Лосев^а, В. С. Порубаев^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: ldyment@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.11.2020 г.

Проведено сравнение значений характеристик разрывов в ледяном покрове морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, рассчитанных по данным снимков с искусственных спутников Земли пространственного разрешения 250, 375 и 500 м. Показано, что модальная ориентация разрывов практически не зависит от пространственного разрешения снимков. Установлено, что между значениями пространственной плотности разрывов, рассчитанными по данным снимков различного разрешения, существует хорошая связь. Получены уравнения регрессии, позволяющие оценить значения удельной длины разрывов с шириной от 250 м по снимкам с более низким пространственным разрешением.

Ключевые слова: спутниковые снимки, пространственное разрешение, разрывы в ледяном покрове

DOI: 10.31857/S0205961421030039

ВВЕДЕНИЕ

Разрывы в дрейфующем ледяном покрове Арктического бассейна и арктических морей в зимний период образуются под влиянием неравномерности дрейфа льда. Протяженность разрывов в ледяном покрове может достигать нескольких сотен километров, иногда она сопоставима с размерами арктического моря. Ширина разрывов изменяется от нескольких метров до нескольких километров. Интерес к изучению разрывов обусловлен, прежде всего, их практической значимостью, т.к. они являются потенциальными маршрутами более легкого плавания судов при сложных ледовых условиях. Наличие систем разрывов, однонаправленных с генеральным курсом судна, существенно повышает скорость его движения (Фролов, 2001). Данные о климатических характеристиках разрывов используются при планировании морских транспортных операций (Горбунов, 1996). На основе информации о разрывах разрабатывались методы составления прогнозов их преобладающей ориентации и зон образования (Горбунов, 2001).

В настоящее время исходными данными о разрывах в ледяном покрове являются снимки искусственных спутников Земли (ИСЗ) (Асмуз, 2010; Горбунов, 2001). Основным преимуществом космической съемки является высокая степень обзорности, т.е. охват одним снимком поверхности большой площади.

Основным параметром спутникового снимка является его пространственное разрешение (ПР), определяющее площадь поверхности, отображаемую на снимке одним пикселем. Снимки, поступающие с ИСЗ, подразделяются на снимки с высоким, средним и низким ПР. Численные значения границ каждой группы несколько условны и существенно зависят от области применения спутниковой информации. Так, при идентификации объектов городской структуры снимки с ПР > 50 м считаются снимками с низким ПР, тогда как при глобальной съемке океана и суши соответствующим критерием служит ПР > 250 м (Бушуев, 2011). При низком ПР предоставляется возможность охватить на одном снимке наиболее обширную территорию, но при этом различить только объекты больших размеров.

С практической точки зрения снимки с высоким и средним ПР имеют значение для ограниченного по площади района плавания. При использовании снимков с ПР 100 м и менее охваченная акватория составляет не более 300–400 км². При этом наиболее длинные разрывы оказываются не полностью вошедшими в область снимка. Составление “мозаичного” изображения из нескольких снимков значительно затрудняет весь процесс сбора исходной информации о разрывах и неминуемо вносит погрешность в получаемый результат. В связи с этим получение исходных данных о разрывах в пределах всего моря производится по

снимкам с низким ПР. На таких снимках разрывы в ледяном покрове представляются в виде узких контрастных линий на фоне сплошного ледяного покрова. При этом учитываются разрывы с открытой водой и с образовавшимся в них льдом не старше серо-белого.

При необходимости обобщить результаты обработки снимков, полученных с разных ИСЗ и имеющих различное ПР, остро встает вопрос о его влиянии на получаемые значения характеристик разрывов. В работе (Лосев, 2003) была рассмотрена зависимость плотности разрывов от ПР снимков, полученных в ноябре 1979 г. при съемке дрейфующего льда с самолета радаром бокового обзора в море Лаптевых на полигоне со сторонами 180×240 км. Однако в настоящее время для получения данных о разрывах в ледяном покрове морей обычно используются снимки ИСЗ, принимаемые в видимом и инфракрасном диапазонах.

В данной работе представлены результаты исследования влияния ПР современных спутниковых снимков на получаемые значения характеристик ориентации и плотности разрывов в ледяном покрове на всей акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для получения исходных данных использовались снимки ИСЗ TERRA/EOS-AM1, передаваемые спектрорадиометром MODIS в видимом и ИК-диапазонах, и снимки ИСЗ SuomiNPP с аппаратурой VIIRS, работающей в ИК-диапазоне. Снимки, передаваемые MODIS по первому и второму каналам на волнах, длина которых составляет 620–670 и 841–876 нм соответственно, имеют ПР 250 м, т.е. на них зафиксированы разрывы, ширина которых $d \geq 250$ м, а разрывы с $d < 250$ м не отображаются.

ПР снимков, передаваемых по третьему и четвертому каналам на волнах длиной 459–479 и 545–565 нм соответственно, в 2 раза ниже. Разрывы, ширина которых $d < 500$ м, на этих снимках почти не фиксируются.

Снимки, полученные с ИСЗ SuomiNPP по третьему и четвертому каналам на волнах, длина которых равна соответственно 478–488 и 545–565 нм, характеризуются ПР равным 375 м.

Для последующего анализа было отобрано по 10 спутниковых снимков с ПР 250, 375 и 500 м, половина из которых охватывала акваторию моря Лаптевых, а остальные — акваторию Восточно-Сибирского моря. Все снимки были получены за период март–апрель 2018 г. Интервал между датами приема снимков составлял 5–10 сут. В выбранные для исследования даты акватория морей была менее, чем в остальные дни рассматриваемого периода, закрыта облаками. В процессе дешифрирования и обработки снимка средствами ArcMap определялись географические координаты

каждого относительно прямолинейного участка разрыва, т.е. участка, в пределах которого изменение ориентации разрыва не превосходит 10° . По координатам концов для каждого отрезка разрыва рассчитывались его протяженность и ориентация относительно оси X , за которую было выбрано южное направление меридиана 140° з.д. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты дешифрирования разрывов в море Лаптевых на снимках ИСЗ, имеющих различное ПР, за 6 апреля 2018 г.

Расчет характеристик разрывов проводился по квадратам регулярной сетки 100×100 км. Из-за некоторого присутствия облачности не все они были обеспечены достаточным количеством данных о разрывах. При анализе использовались только квадраты, полностью свободные от облачности на всех трех снимках за выбранную дату: с ПР 250, 375 и 500 м. В общей сложности было отобрано 77 квадратов на акватории моря Лаптевых и 144 квадрата на акватории Восточно-Сибирского моря.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве характеристики преобладающего направления разрывов в квадрате была принята их модальная ориентация α_m — направление, в диапазоне $\pm \Delta\alpha$ от которого суммарная протяженность разрывов является наибольшей.

Модальная ориентация разрывов α_m определялась по квадратам на акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского при величине модального интервала равной 40° , т.е. при $\Delta\alpha = 20^\circ$. При этом, начиная с диапазона 0° – 40° , рассчитывалась суммарная протяженность прямолинейных отрезков разрывов, ориентация которых соответствовала данному интервалу. Затем последовательно границы расчетного диапазона смещались на 1° , и расчет повторялся. Таким образом, были получены значения для 180 диапазонов. За величину модальной ориентации α_{m1} разрывов в квадрате принималась середина интервала, в котором рассчитанная суммарная протяженность разрывов оказывалась максимальной. Сам интервал при этом назывался модальным. Отношение протяженности разрывов в модальном интервале к суммарной протяженности всех разрывов в квадрате отражает обеспеченность модального интервала и выражается в процентах. Иногда в квадрате присутствовало двумодальное распределение ориентации разрывов. В качестве критерия для выделения второго по значимости модального направления α_{m2} было принято выполнение следующего условия: в квадрате должен существовать диапазон ориентации разрывов с обеспеченностью не менее 25%, направление середины которого отличалось бы от ориентации первой моды не менее чем на 30° , а отношение суммарной протяженности разрывов в нем к ми-

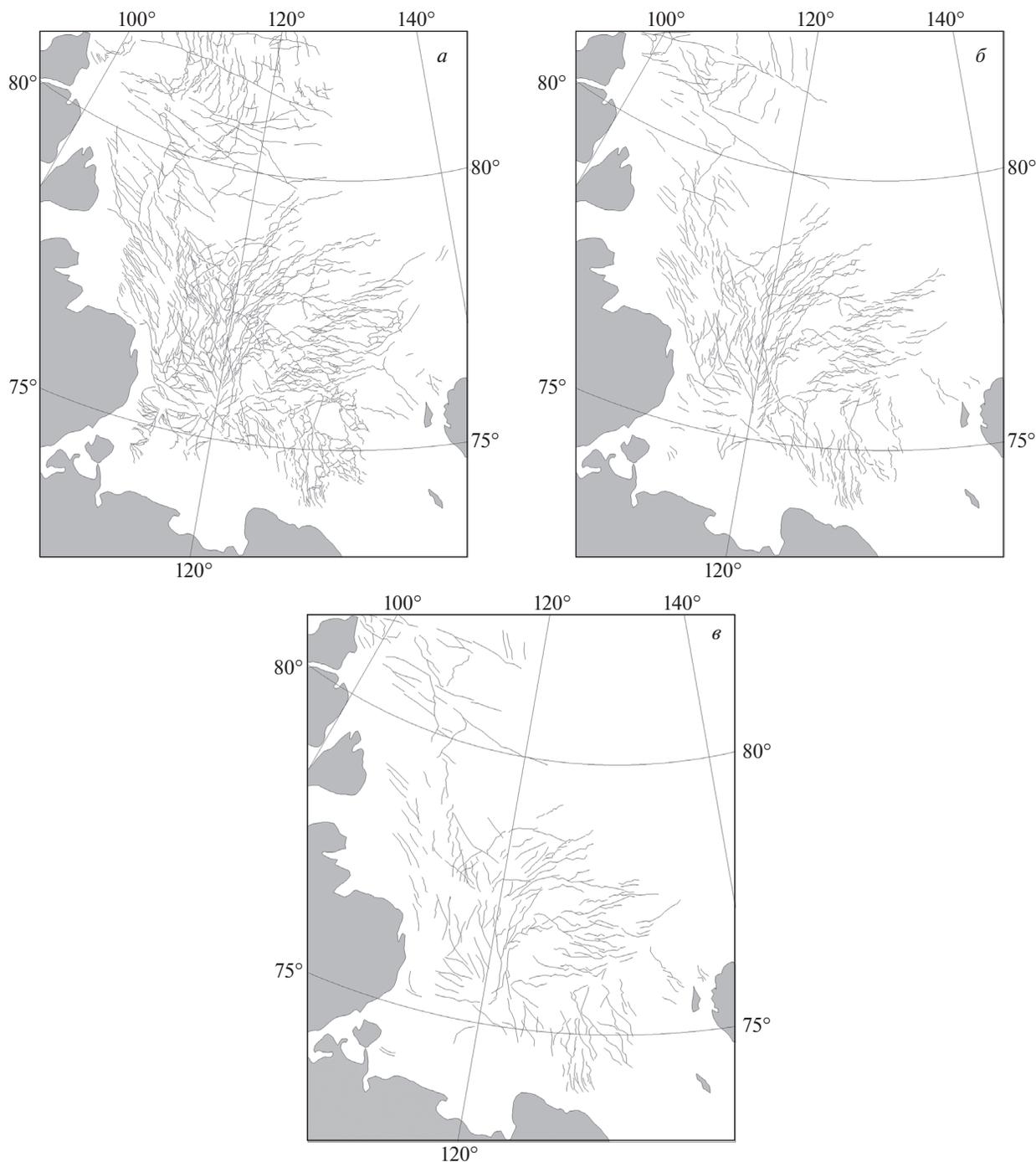


Рис. 1. Разрывы в ледяном покрове моря Лаптевых 6 апреля 2018 г., полученные по снимкам ИСЗ TERRA/EOS-AM1 (а, в) и SuomiNPP (б). а – ПР 250 м; б – ПР 375 м; в – ПР 500 м.

нимальному значению суммарной протяженности разрывов на интервалах $[\alpha_{m1}; \alpha_{m2}]$ и $[\alpha_{m2}; \alpha_{m1}]$ при этом превышало 1.4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что средняя величина различий в значениях модальной ориентации разрывов, полученных по

спутниковым снимкам с разным ПР, не превышает 10° в море Лаптевых и 9° в Восточно-Сибирском море. Среднее квадратическое отклонение (СКО) этой величины также не велико и составляет 8° – 10° и 8° – 9° в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском соответственно.

В обоих морях встречались квадраты, в которых при уменьшении ПР снимка с 250 до 500 м

Таблица 1. Сравнение значений модальной ориентации разрывов, полученных по данным снимков ИСЗ с разным ПР

Характеристики	Море Лаптевых			Восточно-Сибирское море		
	ПР сравниваемых снимков, м			ПР сравниваемых снимков, м		
	250–375	375–500	250–500	250–375	375–500	250–500
Средняя величина различий в значениях модальной ориентации разрывов, градусы	8	10	10	8	9	6
СКО различий в значениях модальной ориентации разрывов, градусы	8	10	10	8	9	8
Минимальное различие, градусы	0	0	0	0	0	0
Максимальное различие, градусы	44	45	44	53	57	52
Доля случаев с различием значений модальной ориентации более 30°, %	1.3	3.8	6.4	2.1	3.4	2.1
Количество квадратов, участвовавших в расчете	77			144		

расчетное значение модальной ориентации разрывов оставалось неизменным. Наряду с этим были и случаи, где указанная величина существенно менялась даже при снижении ПР на 125 м.

При мореплавании разрывы считаются попутными, если их направление отличается от генерального курса судна не более, чем на 30° (Фролов, 2001). Поэтому в табл. 1 также приводится обеспеченность случаев, когда различие в определении модальной ориентации разрывов по спутниковым снимкам с разным ПР является наиболее существенным, т.е. превосходит эту величину. Как видно из данных таблицы, число таких случаев невелико и составляет 1–6% от общего количества исследованных квадратов в море Лаптевых и 2–3% в Восточно-Сибирском море. Анализ квадратов, в которых различие в определении модальной ориентации разрывов по снимкам с разным ПР превысило 30°, показал, что наиболее частой причиной значительного расхождения полученных значений является существование в квадратах двумодального распределения ориентации разрывов с близкими величинами обеспеченности первого и второго модального интервалов. При расчетах по данным, полученным со снимка с одним ПР, одно из двух преобладающих направлений принималось за первую моду, а при расчетах при другом ПР это же направление принималось за вторую моду. В редких случаях модальное направление разрывов в квадрате бывает слабо выражено, и обеспеченность модального интервала составляет около 30% (заметим, что при полностью равновероятном распределении ориентации разрывов в квадрате обеспеченность любого направления при задаваемой величине модального интервала 40° равна 22.2%). При этом также может возникнуть большое различие в рассчитанных значениях модальной ориентации разрывов, т.к. ее выделение в данном случае носит условный характер. Однако частота таких ситуаций крайне мала и составляет менее 1%.

Таким образом, в обоих рассмотренных морях изменение ПР снимков ИСЗ даже в 2 раза не приводит к существенным различиям в значениях определяемой по ним модальной ориентации разрывов. Следовательно, преобладающее направление разрывов в ледяном покрове является характеристикой, не зависящей от ПР снимка ИСЗ.

Другой не менее важной характеристикой разрывов является их удельная длина, представляющая собой меру плотности разрывов в пространстве. Удельная длина численно равна суммарной протяженности разрывов на площади 1 км² и выражается в м/км².

Диапазон полученных в ходе расчетов значений удельной длины разрывов достаточно широк. При ПР снимка 250 м ее значения в квадратах сетки Восточно-Сибирского моря варьируют от 12 до 227 м/км². Очевидно, что оперировать абсолютными значениями удельной длины разрывов при анализе ее изменений в большом количестве квадратов не представляется возможным. Например, уменьшение удельной длины на 10 м/км² для квадрата с ее начальным значением 20 м/км² весьма существенно, а в квадрате, где величина удельной длины составляла 200 м/км², такое понижение можно считать незначительным. По этой причине в дальнейшем при оценке изменений плотности разрывов везде будет использоваться ее относительная величина, т.е. изменение по отношению к начальному значению, и выражаться в %.

В отличие от модальной ориентации удельная длина разрывов в подавляющем большинстве случаев существенно понижается при уменьшении ПР снимка. На снимке с ПР 375 м фиксируется в среднем на 21–25% меньше суммарной протяженности разрывов по сравнению с определенной по снимку с ПР 250 м (табл. 2). При дальнейшем уменьшении ПР с 375 до 500 м рассчитан-

Таблица 2. Сравнение значений удельной длины разрывов, полученных по данным снимков ИСЗ с разным ПР

Характеристики	Море Лаптевых			Восточно-Сибирское море		
	ПР сравниваемых снимков, м			ПР сравниваемых снимков, м		
	250–375	375–500	250–500	250–375	375–500	250–500
Средняя величина понижения удельной длины разрывов, %	25	30	48	21	29	44
СКО понижения удельной длины разрывов, %	14	16	15	14	15	14
Минимальное понижение удельной длины разрывов, %	0	0	9	0	0	0
Доля случаев с незначительным понижением удельной длины разрывов, %	12	4	0	15	5	2
Максимальное понижение удельной длины разрывов, %	60	68	80	59	62	75
Доля случаев с понижением удельной длины разрывов более чем в 2 раза, %	4	9	42	2	6	31
Коэффициент корреляции	0.86	0.84	0.75	0.91	0.89	0.88
Уравнение аппроксимации	$l_{250} = 1.112l_{375} + 13.82$	$l_{375} = 1.053l_{500} + 14.74$	$l_{250} = 1.209l_{500} + 28.76$	$l_{250} = 1.106l_{375} + 13.96$	$l_{375} = 1.162l_{500} + 15.15$	$l_{250} = 1.394l_{500} + 24.03$
Средняя ошибка аппроксимации, %	16	16	20	15	17	19
СКО ошибки аппроксимации, %	12	14	17	14	17	25
Количество квадратов, участвовавших в расчете	77			144		

ная удельная длина разрывов понижается в среднем еще на 30%. СКО в обоих случаях составило около 15%. Тем не менее существовали квадраты, в которых при уменьшении ПР на 125 м значение удельной длины разрывов изменилось незначительно или осталось прежним. Их доля от общего числа рассмотренных квадратов мала (2%). Причиной неизменности значений удельной длины разрывов при понижении ПР снимка является отсутствие разрывов с шириной $d < 375$ м или $d < 500$ м. Незначительное уменьшение удельной длины (менее чем на 5%) при понижении ПР снимков с 250 до 375 м было выявлено в 12 и 15% квадратов в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском соответственно. При понижении ПР на такую же величину с 375 до 500 м удельная длина изменяется более существенно, и доля квадратов, в которых не произошло существенного уменьшения плотности разрывов, составила всего 4–5% от общего их числа. Наряду с этим встречались случаи, когда уменьшение ПР снимка на 125 м приводило к снижению удельной длины разрывов более чем в 2 раза (59–68%).

При сравнительном анализе значений удельной длины разрывов, рассчитанных по снимкам с ПР 250 и 500 м, в море Лаптевых случаев с незначительным ее изменением уже выявлено не было, а в Восточно-Сибирском море доля таких случаев составила всего 2%. В среднем суммарная протяженность дешифрируемых разрывов в квадрате при уменьшении ПР снимка на 250 м понизилась

на 48 и 44% соответственно в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском при такой же величине СКО, как и в случае уменьшения ПР на 125 м.

Коэффициенты корреляции между значениями удельной длины разрывов, рассчитанными при различном ПР снимков, высокие и составляют более 0.75. Оценка коэффициентов корреляции с помощью критерия Стьюдента показала, что они являются значимым при доверительной вероятности 0.99. Это позволило аппроксимировать связь между значениями удельной длины разрывов, получаемыми со снимков с разным ПР, уравнениями регрессии.

Полученные уравнения (см. табл. 2) дают возможность сделать надежную оценку плотности разрывов, которая была бы получена со снимка с ПР 250 м, по результатам дешифрирования снимка с меньшим ПР. Сопоставление значений удельной длины разрывов, полученных при дешифрировании снимков с ПР 250 м, со значениями, рассчитанными по уравнениям аппроксимации по данным снимков с меньшим ПР, показало, что в среднем величина получаемой ошибки составляет 15–20%. Установлено, что значения удельной длины разрывов, полученные при ПР снимка 375 м, примерно в 1.3 раза меньше соответствующего значения, рассчитанного по данным снимка с ПР 250 м. В свою очередь, удельная длина разрывов, определенная по снимку с ПР 500 м, в среднем в 1.4 раза ниже ее значения, вычисленного по снимку с ПР 375 м. Рассчитанная по снимку с ПР

500 м удельная длина разрывов в среднем в 1.7–1.9 раза меньше, чем при определении ее по снимку с ПР 250 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственное разрешение снимка ИСЗ, безусловно, оказывает влияние на получаемую величину плотности дешифрируемых на нем разрывов в ледяном покрове.

Найдены уравнения регрессии между значениями удельной длины разрывов, полученными по данным снимков с различным ПР для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

Полученные линейные уравнения позволят в дальнейшем объединять при расчетах данные по разрывам, полученные со снимков с разным ПР.

Преобладающее направление разрывов, полученное по данным снимков с различным пространственным разрешением, остается неизменным.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках целевой научно-технической программы Росгидромета на 2020–2024 гг. “Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными

сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Пяткин В.П. Космический мониторинг ледяных полей Арктики и Антарктики // *ГЕО-СИБИРЬ*. 2010. Т. 1. № 3. С. 153–160.

Бушуев А.В., Бычкова И.А., Григорьев А.В., Захваткина Н.Ю., Лошилов С.Л., Масанов А.Д., Смирнов В.Н., Фролов С.В., Юлин А.В., Александров В.Ю. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г. Смирнова. Санкт-Петербург: ААНИИ, 2011. 240 с.

Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Метод диагностики и среднесрочного прогноза разрывов в ледяном покрове Карского моря // *Труды ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 94–102.

Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н. Оценка характеристик разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по снимкам самолетного радиолокатора бокового обзора и снимкам со спутников Земли “Метеор” и “NOAA” // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 2. С. 59–67.

Фролов С.В., Клячкин С.В. Учет влияния ориентации разрывов в ледяном покрове на скорость движения судна во льдах // *Труды ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 103–111.

Gorunov Ju.A., Diment L.N., Losev S.M. Taking into account generalized characteristics of leads in the ice cover for selecting the routes of ship escort by icebreakers // *INSROP Working paper*. 1996. № 68(141). P. 10–20.

Influence of the Spatial Resolution of Satellite Images on the Obtained Values of the Characteristics of Leads in the Ice Cover of the Arctic Seas

L. N. Dymant¹, P. V. Aksenov¹, S. M. Losev¹, and V. S. Porubaev¹

¹ *State Scientific Center of the Russian Federation the Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

The values of the characteristics of leads in the ice cover of the Laptev and East Siberian seas calculated from satellite images with spatial resolution of 250, 375 and 500 m are compared. It is shown that the modal orientation of leads practically does not depend on the spatial resolution of images. It is established that there is a good relationship between the values of the spatial density of leads calculated from the data of images of different resolutions. Regression equations are obtained that allow us to estimate the values of the specific length of leads with a width of 250 m or more from images with lower spatial resolution.

Keywords: satellite images, spatial resolution, leads in the ice cover

REFERENCES

Asmus V.V., Krovotyntsev V.A., Pyatkin V.P. Kosmicheskii monitoring ledyanyh poley Arktiki i Antarktiki [Space monitoring of Arctic and Antarctic ice fields] // *GEO-SIBIR*. 2010. V. 1. № 3. P. 153–160 (In Russian).

Bushuev A.V., Bychkova I.A., Grigor'ev A.V., Zakhvatkina N.Yu., Loshilov S.L., Masanov A.D., Smirnov V.N., Frolov S.V., Yulin A.V., Aleksandrov V.Yu. Sputnikovye metodyopredeleniya harakteristikledyanogo pokrova morey [Satellite methods for determining the characteristics of the sea ice cover] / Pod red. V.G. Smirnova. Sankt-Peterburg: AANII, 2011. 240 p. (In Russian).

Frolov S.V., Klyachkin S.V. Uchet vliyaniya orientatsii razryvov v ledyanom pokrove na skorost' dvizheniya sudna vo l'dah [Accounting for the effect of orientation of leads in the ice cover on the speed of the ship in the ice] // *Tруды ААНИИ*. 2001. V. 443. P. 103–111 (In Russian).

Gorunov Ju.A., Diment L.N., Losev S.M. Taking into account generalized characteristics of leads in the ice cover for selecting the routes of ship escort by icebreakers // *INSROP Working paper*. 1996. № 68(141). P. 10–20.

Gorunov Yu.A., Losev S.M., Dymant L.N. Metod diagnostiki i srednesrochnogo prognoza razryvov v ledyanom pokrove Karskogo morya [Method of diagnostics and medium-term forecast of leads in the Kara sea ice cover] // *Tруды ААНИИ*. 2001. V. 443. P. 94–102 (In Russian).

Losev S.M., Gorunov Yu.A., Dymant L.N. Otsenka harakteristik razryvov v ledyanom pokrove morya Laptevyyh po snimkam samoletnogo radiolokatora bokovogo obzora i snimkam so sputnikov Zemli “Meteor” i “NOAA” [Assessment of the characteristics of leads in the Laptev sea ice cover from side-view aircraft radar images and images from the “Meteor” and “NOAA” satellites] // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 2. P. 59–67 (In Russian).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ В НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2021 г. А. И. Козлов^а, В. П. Савиных^б, В. И. Троицкий^{б,с,*}

^аМосковский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

^бМосковский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

^сФинансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Россия

*E-mail: v.troja@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.10.2020 г.

Для решения задач корреляционно-экстремальной навигации по микроволновому излучению предложены модели излучения земных покровов (параметрические модели излучения), в которых модельные расчеты производятся с привлечением ограниченного количества доступных априорных факторов, поддающихся описанию (открытые водные объекты, открытые грунты, искусственные покрытия и др.), и комбинируются со статистическими параметрами радиационных характеристик земных покровов, определяемых по результатам экспериментов с учетом их состояния, а влияние атмосферы учитывается на основе концепции эффективной температуры ее излучения путем введения аддитивной добавки к собственному излучению покровов.

Ключевые слова: автономная навигация, синтез эталонных изображений, моделирование, микроволновое излучение, земные покровы

DOI: 10.31857/S0205961421030052

ВВЕДЕНИЕ

Проблема автономной навигации летательных аппаратов по радиотепловому излучению в СВЧ диапазоне (микроволновому излучению) остается актуальной до настоящего времени (Антюфеев и др., 2014; Щербинин, 2011). Основные трудности при этом определяются возможностью создания опорных (эталонных) изображений и обеспечения их достаточной информативности. При решении этой задачи целесообразно использование методов синтеза эталонных изображений (ЭИ), которые предполагают заполнение основы таких изображений, которая формируется с использованием топографических либо специальных карт, дешифрованных материалов аэрокосмической съемки, данными об информативных признаках радиотеплового излучения (Богородский и др., 1981; Выставкин и др., 1989; Логвин, Троицкий, 1995; Старых и др., 2012). Подобное осуществляется с использованием специальных методов синтеза изображений на основе моделей полей излучением на входе аппаратуры дистанционного зондирования аэрокосмических систем наблюдения (Бондур, Савин, 1995; Бондур, 2000а, б; Бондур и др., 2003).

Синтез опорных изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах (КЭСН) летательных аппаратов (ЛА) с использо-

ванием микроволнового излучения земных покровов предполагает использование топографических карт для коррекции участков траектории полета, выделение однородных элементов объектового состава и наполнение их информативными для заданного диапазона длин волн характеристиками излучения. При этом необходимо учитывать, что характеристики микроволнового излучения земной поверхности зависят от многих факторов, учет которых является чрезвычайно сложной задачей (Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б; Бондур и др., 2019).

Проведенные оценки навигационных свойств экспериментально полученных тепловых полей позволили выявить закономерности, существенные при синтезе опорных изображений земной поверхности, такие как возможность объединения различных типов объектов в группы до 4–6 объектов без существенного ущерба навигационным характеристикам соответствующего эталонного радиотеплового поля, а также возможность расширения понятия “тип объекта” на этапе интерпретации аэрокосмических изображений, когда тип объекта представляет собой совокупность ограниченного числа четко различающихся на топографических и тематических картах объектов (Троицкий, 1997, 2013а, 2014а, б).

Использование для этих целей моделей излучения различных типов земных покровов требует

привлечения большого объема разнообразной априорной информации (Бондур, 2000а; Бондур, Савин, 1995), которая получается, в том числе, путем обработки больших потоков данных дистанционного зондирования (Бондур, 2010, 2014; Бондур, Старченков, 2001), что в рассматриваемых приложениях практически нереально.

Другой путь — непосредственное использование для заполнения основы ЭИ баз экспериментальных данных, также достаточно проблематичен по следующим причинам:

- составление полных каталогов, отвечающих самым различным параметрам земных покровов и атмосферы представляет собой сложную и трудоемкую задачу;
- в подобных каталогах невозможно предусмотреть все многообразие встречающихся земных покровов.

В настоящей работе для решения задач корреляционно-экстремальной навигации предложено использовать такие модели излучения земных покровов, в которых модельные расчеты для поддающихся описанию с привлечением ограниченного количества доступных априорных факторов (открытые водные объекты, открытые грунты, искусственные покрытия и др.) комбинируются со статистическими параметрами радиационных характеристик покровов, определяемых по результатам экспериментов с учетом их состояния, а влияние атмосферы учитывается на основе концепции эффективной температуры излучения атмосферы путем введения аддитивной добавки к собственному излучению покровов.

АНАЛИЗ НАВИГАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАДИОТЕПЛОвого ПОЛЯ

Изучение навигационных свойств экспериментально полученных радиотепловых полей позволило выявить две закономерности, существенные при синтезе ЭИ участков земной поверхности, а именно:

- возможность объединения объектов различных типов в группы (до 4–6) без существенного ущерба для навигационных характеристик соответствующего эталонного радиотеплового поля;
- возможность расширения понятия “тип объекта” на этапе дешифрирования космических и аэрофотоснимков, когда фактически под типом объекта понимается совокупность ограниченного количества различающихся на топографических и тематических картах объектов.

Остановимся на этом вопросе подробнее. Проведенное нами большое количество как летных, так и численных (на модели радиотепловой КЭСН) экспериментов по изучению характеристик микроволнового излучения, выполнявшихся по ряду предварительно отобранных, исходя из

обеспечения различной информативности и возможности привязки к наземным ориентирам трасс районов экспериментов в различных сезонных (весна—осень и осень, зима, весна) и погодных условиях (Троицкий, 2013а, 2018а), было проанализировано следующим образом. Все многообразие земных покровов было разбито более чем на 30 групп, среди которых можно упомянуть такие как поле, река, огороды деревни, постройки деревни, луг на окраине деревни, прибрежный луг, озеро, асфальтобетонная дорога, гравийная дорога с кюветами и откосами насыпи, поросшими травой, просека с высоковольтной линией, изреженная сосново-березовая посадка, осиново-березовый лес, ольховый лес, балка луговая, поросшая по краям деревьями и кустарником, и т.д. В другой серии экспериментов рассматривались трассы хвойно-лиственной лесостепи. В экспериментах по трассам в зимних условиях полагалось, что снежный покров имел толщину порядка 30–40 см.

По результатам экспериментов объекты различных типов объединялись в одну группу, исходя из степени близости средних значений радиояростной температуры в пределах одного объекта. Для каждого маршрута число градаций температуры земных покровов доводилось до определенного минимума, когда дальнейшее уменьшение их числа приводило к заметному изменению значения радиуса корреляции реального и модельного профилей эффективных температур, а также уменьшению их коэффициента корреляции и отношения сигнал/шум.

Анализ навигационных свойств упомянутых экспериментальных профилей радиотеплового поля (РТП) при максимально возможном числе дешифрируемых объектов вдоль трасс полета и навигационных свойств при объединении объектов с близкими значениями радиояростных температур в одну группу показывает, что навигационные свойства РТП при таком объединении практически не претерпевают изменений при уменьшении числа типов объектов до 4–6.

На основе полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1. РТП ландшафтных зон с развитой гидрографической сетью обладают потенциально высокой информативностью. На участках коррекции, где достаточно велик удельный вес открытых водоемов, можно ограничиться бинарными изображениями (суша—вода), что значительно упрощает задачу синтеза.

2. При большом числе элементов земной поверхности — элементов объектового состава (ОС) — в районе коррекции возможно значительное сокращение числа градаций эффективной температуры без существенного снижения точности навигационной привязки. В этом случае до-

статочны ограничиться 4–6 градациями и даже менее, если общее число классов объектов участка коррекции невелико.

Минимальное необходимое число градаций для конкретной трассы целесообразно устанавливать, исходя из следующих сведений:

- 1) требуемой точности и надежности навигационной привязки;
- 2) объектового состава и его структуры в предполагаемом районе коррекции;
- 3) сезонных изменений и метеоусловий;
- 4) наличия априорной информации о толщине снежного покрова, влажности.

Приведенные соображения позволяют упростить процедуру синтеза ЭИ, поскольку обычно изначально выделяется меньшее число типов элементов ОС в связи с недостаточным объемом априорной информации.

С учетом перечисленных особенностей радиотепловых полей предлагается подход к формированию моделей излучения (параметрических моделей излучения), в котором модельные расчеты для поддающихся описанию с привлечением ограниченного количества доступных априорных факторов таких земных покровов, как открытые водоемы, открытые почвы, искусственные покрытия и др., сочетаются с определенными из экспериментов статистическими параметрами характеристик излучения различных покровов с учетом их состояния. При этом осуществляется учет влияния атмосферы на основе использования понятия эффективная температура излучения атмосферы, путем введения аддитивной добавки ΔT_a (приращения, обусловленного радиотепловым излучением атмосферы, отраженным от земной поверхности) к собственному излучению земных покровов по формуле $\Delta T_a = \Delta T_{a_{эф}}$ (1 – α). Модельные расчеты при этом основываются на формулах Френеля с поправкой на влияние неровностей поверхности объектов (Троицкий, 2018б).

Объекты земной поверхности описываются, как правило, очень широким спектром неровностей – от мелкомасштабных до крупномасштабных. Строгий учет одновременного влияния всего многообразия неровностей невозможен как в теоретическом плане, так и в плане получения достаточно подробной информации для их описания. Ослабить влияние неровностей можно выбором оптимальных условий измерения, например, осуществляя зондирования земной поверхности в нади́р на круговой поляризации (Троицкий, 2018б), либо под малыми углами наблюдения. Это позволяет избавиться от влияния изотропных и в значительной степени от анизотропных крупномасштабных неровностей. При этом остается предусмотреть приращение излучательной спо-

собности за счет мелкомасштабных неровностей ($\Delta\epsilon$), которые относительно невелики. Так, на длинах волн в районе 0.8 см величина $\Delta\epsilon$, согласно (Троицкий, 2018а), составляет в среднем:

- для почвогрунтов – 0.015;
- для взволнованной водной поверхности – 0.01.

Статистические данные о контрастообразующих факторах радиотеплового излучения с учетом сезона и метеоусловий могут быть получены в результате экспериментальных исследований как в данном районе, так и в районе со сходными ландшафтно-климатическими условиями (районе-аналоге). Полученные экспериментальные данные дают необходимый исходный материал для построения параметрических моделей основных типов земных покровов (Троицкий, 2013а, 2018а, 2018б).

Понятно, что подобных семейств моделей (в зависимости от рассматриваемых трасс полета и используемых критериев отбора) может быть очень много. Поскольку нас, в конечном счете, интересуют навигационные свойства радиотепловых полей, то и к соответствующим параметрическим моделям предъявляются определенные требования, основными из которых являются:

- обеспечение требуемых навигационных характеристик КЭСН, использующих в качестве эталонных синтезированные радиотепловые поля;
- полнота учета доступной априорной информации;
- обеспечение временной (сезонной, суточной) стабильности навигационных характеристик синтезируемых радиотепловых полей;
- независимость навигационных характеристик синтезированных радиотепловых полей от конкретной аппаратурной реализации КЭСН.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

На основе обобщения результатов наших работ, а также опубликованных экспериментальных данных других авторов предлагаются следующие параметрические модели.

Для периода активной вегетации растительности (для средней полосы России, например, этот период с мая по сентябрь включительно) этим требованиям удовлетворяют семейства моделей таких объектов:

1. Хвойный лес

$$\overline{T}_\Lambda = 0.993T + 0.007T_a(0)\sec(50^\circ) - \Delta T,$$

где ΔT – поправка на случай, если растительность смочена водой в результате осадков или обильной росы ($\Delta T \approx 10$ К).

2. Смешанный лес, хорошо развитые и густые травянистые покровы или сельскохозяйственные колосовые, или мелколиственные культуры (высота растительности более 1 м)

$$\bar{T}_2 = 0.981T + 0.019T_a(0)\sec(50^\circ) - \Delta T.$$

3. Лиственный лес, заросли кустов, сады, редколесье с развитым подлеском

$$\bar{T}_3 = 0.964T + 0.036T_a(0)\sec(50^\circ) - \Delta T.$$

4. Заболоченные объекты 1, 2, 3 с подтоплением водой, сплошные тростниково-камышовые заросли на болоте

$$\bar{T}_4 = 0.94T + 0.06T_a(0)\sec(50^\circ) - \Delta T.$$

5. Полупрозрачные растительные покровы (луга, пастбища, сельскохозяйственные культуры, покосы, заросшая травой стерня, огороды и т.д.)

$$\bar{T}_5 = \bar{T}_6 + \bar{T}_2 - \bar{T}_6/2 - \Delta T.$$

6. Открытые или почти открытые участки почвы (пашня, стерня со слабой растительностью, поле со всходами сельскохозяйственных культур, огороды, практически лишенные растительности, пустыни и полупустыни и т.д.)

$$\bar{T}_6 = \alpha_c T + (1 - \alpha_c) T_a(0)\sec(20^\circ).$$

7. Небольшой населенный пункт сельского типа с неогнестойкими строениями и приусадебными участками T_7 . Расчет \bar{T}_7 для этого объекта предлагается осуществлять в двух вариантах:

– для первого варианта \bar{T}_7 определяется путем усреднения соответствующих экспериментальных данных вдоль всей трассы;

– для второго варианта:

$$T_1 = \begin{cases} \alpha_c T + 0.032 \left(1 - \frac{l_{CH}}{25}\right) + T_a(0)(1 - (\alpha_c + 0.032)) \left(1 - \frac{l_{CH}}{25}\right) \sec 30^\circ & \text{при } l_H \leq 25 \text{ см;} \\ \alpha_c T + T_a(0)(1 - \alpha_c) \sec 30^\circ & \text{при } l_{CH} > 25 \text{ см,} \end{cases}$$

где l_{CH} – толщина снежного покрова в сантиметрах;

2. Лиственный лес

$$\bar{T}_2 = (\alpha_c + 0.018)T + (1 - \alpha_c - 0.018)T_a \sec 45^\circ;$$

3. Огороды с отдельными деревьями и кустарниками

$$\bar{T}_3 = (\alpha_c + 0.005)T + (1 - \alpha_c - 0.005)T_a(0)\sec 35^\circ;$$

4. Луг

$$\bar{T}_4 = (\alpha_c + 0.03)T + (1 - \alpha_c - 0.003)T_a(0)\sec 40^\circ;$$

5. Заросли кустов, редколесье

$$\bar{T}_7 = 0.875T + 0.125T_a(0)\sec(50^\circ).$$

8. Болота и заболоченности.

– первый вариант расчета для этого объекта аналогичен первому варианту объекта по п. 7;

– при втором варианте расчета

$$\bar{T}_8 = (T - \bar{T}_9)0.75 + T_9 - \Delta T.$$

9. Открытые водоемы

$$\bar{T}_9 = \alpha_9 T_b + (1 - \alpha_9) T_a(0),$$

где T_b – температура поверхности воды (в градусах Кельвина).

Для зимнего периода времени диапазон радиояркостных контрастов меньше, чем для периода активной вегетации растительности (Бондур, 2010). Вследствие этого для “зимних” моделей существенно выполнение еще одного требования – сохранения знака контраста радиояркостных температур смежных объектов. Как показывают результаты расчетов, для зимних экспериментальных данных число ошибок в оценке знака контраста не должно превышать 10–20% общего числа контрастов. При невыполнении этого условия качество навигационного поля заметно ухудшается (резко возрастает отношение сигнал/шум).

Если о районе коррекции известно, что за время, прошедшее с момента образования устойчивого снежного покрова, не было оттепелей с температурой выше $+2^\circ\text{C}$, то величину α_c можно принимать равной $\alpha_c = 0.896$ для $\lambda = 0.8$ см и $\alpha_c = 0.912$ для $\lambda = 2.25$ см. Соответственно, для выбранных групп объектов для $\lambda = 0.8$ см имеем:

1. Лед на поверхности воды, покрытой снегом

$$\bar{T}_5 = (\bar{T}_2 - 0.026)T + T_a(0)\left(1.026 - \frac{\bar{T}_2}{T}\right)\sec 35^\circ;$$

6. Поле

$$\bar{T}_6 = (\bar{T}_4 - 0.011)T + T_a(0)\left(1.011 - \frac{\bar{T}_4}{T}\right)\sec 25^\circ;$$

7. Населенный пункт с неогнестойкими строениями, приусадебными участками

$$\bar{T}_7 = (\alpha_c + 0.02)T + T_a(0)(1.016 - \alpha_c)\sec 40^\circ;$$

8. Болото

$$\bar{T}_8 = (\alpha_c + 0.015)T + T_a(0)(1.013 - \alpha_c)\sec 30^\circ;$$

9. Заболоченные участки

$$\bar{T}_9 = (\bar{T}_8 - 0.03T) + T_a(0)\left(1.03 - \frac{\bar{T}_8}{T}\right)\sec 30^\circ.$$

Предложенное семейство моделей для периода устойчивого снежного покрова было апробировано на данных, полученных в ходе проведения многочисленных экспериментальных исследований (Троицкий, 1997, 2013а, б, 2014а, б; 2018а, б).

Исследование влияния толщины снежного покрова и плотности снега на отношение сигнал/шум реального и модельного профилей (подобно тому, как исследование влияние влажности почвогрунтов для периода активной вегетации растительности) показывает, что при значениях плотности снега более 0.2 г/см^3 значение этого отношения практически не меняется. Более критичным является значение толщины снежного покрова и, таким образом, этот параметр должен присутствовать в априорной информации о предлагаемом маршруте.

Предложенные выше два семейства моделей охватывают в зависимости от конкретного региона на период 10–11 мес. В период межсезонья, к которому относится таяние снегов и образование устойчивого снежного покрова, применение этих моделей следует корректировать дополнительной априорной информацией. На трассах конкретных полетов, когда участки коррекции могут планироваться заранее, количество контрастных покровов может быть ограничено, а в условиях объединения ряда земных покровов в группы число используемых моделей для участков коррекции траектории может становиться еще меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены параметрические модели микроволнового излучения для использования при создании эталонных изображений различных объектов в интересах обеспечения автономной навигации летательных аппаратов по радиотепловому излучению в СВЧ диапазоне. В этих моделях расчеты для поддающихся описанию радиационных характеристик различных объектов (открытые водные объекты, открытые грунты, искусственные покрытия и др.) с привлечением ограниченного количества доступных априорных факторов комбинируются со статистическими параметрами радиотеплового излучения земных покровов с учетом их состояния, определяемыми по результатам экспериментов, а влияние атмосферы учитывается на основе концепции эффективной температуры излучения атмосферы путем введения аддитивной добавки к собственному излучению объектов земной поверхности. Предложенные модели достаточно полно описывают микро-

волновое излучение разнообразных земных покровов в различные сезонные периоды.

С использованием таких параметрических моделей микроволнового излучения различных объектов земной поверхности предложен подход к решению задач корреляционно-экстремальной навигации летательных аппаратов по радиотепловому излучению в СВЧ диапазоне спектра электромагнитных волн.

Предложенные параметрические модели микроволнового излучения были использованы авторами для создания эталонных изображений при проведении летных экспериментов с радиометрическими датчиками подобных систем, подтвердивших эффективность их использования (Троицкий, 1997).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антофеев В.И., Быков В.Н., Гричанюк А.М., Иванченко Д.Д., Колчигин Н.Н., Краюшкин В.А., Сотников А.М.* Матричные радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов. Харьков: Харьковский национальный университет им. В.Н. Карамзина, 2014. 372 с.
- Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 279 с.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2000а. № 5. С. 16–27.
- Бондур В.Г.* Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры методом фазового спектра // Исслед. Земли из космоса. 2000б. № 5. С. 28–44.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
- Бондур В.Г., Аржененко Н.И., Линник В.Н., Титова И.Л.* Моделирование многоспектральных аэрокосмических изображений динамических полей яркости // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 2. С. 3–17.
- Бондур В.Г., Савин А.И.* Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 24–33.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н.* Оценка пространственной анизотропии неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного поляриметрического

зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 92–103.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008а. № 5. С. 9–14.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008б. № 6. С. 64–73.

Выставкин А.Н., Кутуза Б.Г., Обухов Ю.В., Смирнов М.Т., Терентьев Е.В. Синтез изображений геофизических полей по трассовым СВЧ радиометрическим спутниковым изображениям // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 4. С. 91–98.

Логвин А.И., Троицкий В.И. Синтез радиолокационных изображений местности по топографическим картам и материалам аэрокосмической съемки // В сб. "Совершенствование радиолокационных систем гражданской авиации и процессов их технической эксплуатации. М.: МИИГА, 1995. С. 36–40.

Старых А.В., Козлов А.И., Жилинская Г.А., Штраков А.Ю. Экспериментальная иллюстрация возможностей микроволновой радиометрии для навигации воздушных судов по наземным ориентирам // Научный вестник Московского Государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 176. С. 74–77.

Троицкий В.И. Летно-экспериментальные исследования радиометрических датчиков корреляционно-экстремальных систем навигации летательных аппаратов // Международный сборник трудов авиационных вузов "Авиационная радиоэлектроника". Москва, 1997. С. 48–53.

Троицкий В.И. Критерии информативности эталонных радиотепловых полей, используемых в корреляцион-

но-экстремальных системах навигации // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 3. С. 61–64.

Троицкий В.И. Векторное представление радиотепловых полей в задаче корреляционно-экстремальной навигации летательных аппаратов по собственному излучению земных покровов // Научный вестник Московского Государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 210. С. 37–39.

Троицкий В.И. Информативность векторных радиотепловых полей в задаче корреляционно-экстремальной навигации летательных аппаратов // Научный вестник Московского Государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 210. С. 33–36.

Троицкий В.И. Оценка временной навигационной устойчивости радиотепловых полей земной поверхности в задачах корреляционно-экстремальной навигации // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 2. С. 72–75.

Троицкий В.И. Анализ влияния основных параметров и условий функционирования КЭСН летательных аппаратов по микроволновому излучению земной поверхности на эффективность их использования // Научный вестник Московского Государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21. № 2. 2018. С. 171–180.

Троицкий В.И. Исследование влияния характеристик Земли и атмосферы на точностные характеристики радиотепловых корреляционно-экстремальных систем навигации методом математического моделирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 4. С. 442–452.

Щербинин В.В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов. Москва: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 230 с.

Parametric Models of Microwave Radiation of the Earth's Covers in Aircraft Navigation

A. I. Kozlov¹, V. P. Savinykh², and V. I. Troitsky^{2,3}

¹Moscow state University of civil aviation, Moscow, Russia

²State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

³Financial University under the government of the Russian Federation, Moscow, Russia

To solve the tasks of the correlation extreme navigation using microwave radiation, we suggest the models of land cover radiation (parametric models of radiation) where model simulations carried out involving a limited number of available a priori factors (surface water bodies, open soils, paved surfaces, etc.) are combined with statistical parameters of the radiation characteristics of various types of land cover determined from experiments taking into account their state, and the influence of the atmosphere is taken into account on the basis of the concept of the effective temperature of the atmosphere radiation by introducing an additive to the own radiation of the covers.

Keywords: autonomous navigation, synthesis of reference images, modeling, microwave radiation, land cover

REFERENCES

Antyufeev V.I., Bykov V.N., Grichanyuk A.M., Ivanchenko D.D., Kolchigin N.N., Krayushkin V.A., Sotnikov A.M. Matrix radiometric correlation-extreme navigation systems of aircraft. Kharkiv: Kharkiv national University, named after V.N. Karamzin, 2014. 372 p. (In Russian).

Bogorodsky V.V., Kanareykin D.B., Kozlov A.I. Polarization of scattered and intrinsic radio radiation of the earth's surface. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981. 279 p. (In Russian.)

Bondur V.G. Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // Izv., Atmos.

- Oceanic Phys. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G.* Metody modelirovaniya poley izlucheniya na vkhode aerokosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya [The Methods of the Emission Model Field Which Be Formed on Enter of Airspace Remote Sensing System] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 2000a. № 5. P. 16–27 (In Russian).
- Bondur V.G.* Modelirovanie dvumernykh sluchaynykh poley yarkosti na vkhode aerokosmicheskoy apparatury metodom fazovogo spektra [Phase-Spectral Method's Modeling of Two-Dimension Stochastic Brightness Field Formed at the Airspace Apparatus Entrance] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 2000b. № 5. P. 28–44 (In Russian).
- Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060
- Bondur V.G., Arzhenenko N.I., Linnik V.N., Titova I.L.* Modelirovanie mnogospektralnykh aerokosmicheskikh izobrazheniy dinamicheskikh poley yarkosti [The Simulation of Multispectral Air-Space Images of Dynamic Brightness Fields] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 2003. № 2. P. 3–17.
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Spatial anisotropy assessment of the forest vegetation heterogeneity at different azimuth angles of radar polarimetric sensing // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 926–934. DOI: 10.1134/S0001433819090093
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008a. Iss. 5. P. 9–14 (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Distantsionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008b. Iss. 6. P. 64–73 (In Russian).
- Bondur V.G., Savin A.I.* Modelling of signals on input to remote sensing equipment of aerospace environment monitoring systems // *Earth Obs. Rem. Sens.* 1996. V. 13. P. 539–553.
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2001. № 3. P. 118–143.
- Logvin A.I., Troitsky V.I.* Synthesis of radar images of the area based on topographic maps and aerospace survey material // In the collection “Improvement of civil aviation radar systems and their technical operation processes”. Moscow: MIGA, 1995. P. 36–40 (In Russian).
- Shcherbinin V.V.* Construction of invariant correlation-extreme systems and guidance of aircraft. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow state University, 2011. 230 p. (In Russian).
- Starykh A.V., Kozlov A.I., Zhilinskaya G.A., Shatrakov A.Y.* Experimental illustration of the capabilities of microwave radiometry for navigation of aircraft on ground arietinum // *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2012. № 176. P. 74–77 (In Russian).
- Troitsky V.I.* Flight experimental studies of radiometric sensors correlation-extreme navigation systems of aircraft // *International collection of works of aviation universities. Aviation Radioelectronics*. M., 1997. P. 48–53 (In Russian).
- Troitsky V.I.* The criteria of informativeness of the reference radio thermal fields used in the correlation – extreme navigation systems // *Izvestia vuzov Geodesy and aerophotsurveying*. 2013. № 3. P. 61–64 (In Russian).
- Troitsky V.I.* Vector representation of radiothermal fields in the problem of correlation-extreme navigation of aircraft on their own radiation of the earth's covers // *Civil Aviation High Technologies*. 2014. № 210. P. 37–39 (In Russian.)
- Troitsky V.I.* Information content of vector radiothermal fields in the problem of correlation-extreme navigation of aircraft // *Civil Aviation High Technologies*. 2014. № 210. P. 33–36 (In Russian).
- Troitsky V.I.* Estimation of temporal navigation stability of radiothermal fields used in correlation-extreme navigation systems // *Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotourveying*. 2013. № 2. P. 72–75 (In Russian).
- Troitsky V.I.* Analysis of the influence of the main parameters and operating conditions of correlation-extreme navigation systems of aircraft on the efficiency of their use. *Civil Aviation High Technologies*. 2018. V. 21. № 2. P. 171–180 (In Russian).
- Troitsky V.I.* On studyng the influence of the characteristics of the Earth and atmspgere on the accuracy parameters of correlation-extreme navigation system of the aircraft via the method of mathematical simulation // *Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*. 2018. V. 62(4). P. 442–452 (In Russian).
- Vystavkin A.N., Kutuza B.G., Obukhov Yu.V., Smirnov M.T., Terentyev E.V.* Synthesis of images of geophysical fields by trace microwave radiometric satellite images // *Earth exploration from space*. 1989. № 4. P. 91–98 (In Russian).

**КРАТКИЕ
СООБЩЕНИЯ**

**РОССИЯ–США: 50 ЛЕТ СОТРУДНИЧЕСТВА В КОСМОСЕ
(ИТОГИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА С США
ПО ПРОГРАММЕ “ИНТЕРКОСМОС”)**

© 2021 г. Л. А. Ведешин*

ФГБУН ИКИ РАН, Москва, Россия

*E-mail: vedeshin40@mail.ru

Поступила в редакцию 04.12.2020 г.

DOI: 10.31857/S0205961421030088

Основы совместного научно-технического сотрудничества в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях были заложены 50 лет назад во время первой встречи в Москве 18–21 января 1971 г. президента АН СССР акад. М.В. Келдыша с исполняющим обязанности директора Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) США доктором Дж.М. Лоу. На совещании делегации СССР и США договорились об основных направлениях сотрудничества в космосе и процедуре обмена результатами космических исследований. В результате был подписан “Итоговый документ о совместной деятельности в области космической физики, космической метеорологии, изучения природной среды, космической биологии и медицины”. В этих исследованиях с советской стороны принимали участие известные ученые, такие как академики Б.Н. Петров, А.П. Виноградов, О.Г. Газенко, Г.И. Петров, К.Я. Кондратьев, Е.К. Федоров и др. В ходе встречи доктор Дж. Лоу предложил провести совместный пилотируемый экспериментальный полет кораблей “Аполлон” и “Союз” (ЭПАС) для отработки методов спасения космонавтов в космосе. Академик М.В. Келдыш выразил принципиальное согласие. Среди основных направлений российско-американского сотрудничества этот проект стал главным, т.к. больше всего соответствовал принятому в 1967 г. в ООН Договору по космосу, в котором были предусмотрены обязательства государств оказывать в случае необходимости взаимную помощь космонавтам различных стран во время их нахождения в космосе или на других небесных телах. В АН СССР впервые встретились специалисты двух стран, чтобы обсудить технические проблемы стыковки космических кораблей (КК) СССР и США. Выяснилось, что они не удовлетворяют ни одному из условий совместимости, и необходима большая подготовительная работа. Совещание проходило под руководством председателя Совета по международному сотрудничеству в области исследования и использования космического пространства АН СССР (“Интеркосмос”) акад. Б.Н. Петрова и директора Центра пилотируемых космических полетов НАСА Роберта Гиллута, которым была поручена в дальнейшая координа-

ция этих работ. На встрече состоялся обмен мнениями по основным направлениям обеспечения совместимости средств сближения и стыковки КК, были представлены различные варианты схем стыковки. Американские специалисты согласились принять советский вариант стыковки, который уже практически использовался в космосе на советских КК. Стыковочный модуль КК “Аполлон” и “Союз” был создан на основе советской конструкции, разработанной чл.-корр. РАН В.П. Сыромятниковым в ОКБ-1. Андрогенный стыковочный агрегат ЭПАС был испытан в Москве и Хьюстоне в 1972 г., а также в пилотируемом полете КК “Союз-16” в 1974 г. Состоялся также обмен мнениями о проведении работ по обеспечению совместимости радиосистем и управлению полетом. Надо было решить еще одну очень важную проблему: совмещения параметров внутренней атмосферы КК после стыковки. На КК “Союз” атмосфера состояла из обычного воздуха, а на “Аполлоне” из чистого кислорода при давлении 260 мм рт. ст. Поэтому при переходе в другой корабль космонавт (астронавт) должен был провести не менее двух часов в специальной шлюзовой воздушной камере, которую надо было разработать и изготовить. 4–6 апреля 1972 г. в Москве состоялась вторая встреча специалистов СССР и США по подготовке ЭПАС с участием и.о. президента АН СССР акад. В.А. Котельникова и и.о. директора НАСА доктора Дж.М. Лоу. На этой встрече были разработаны основные принципы подготовки и проведения полета КК, а также рассмотрены технические и организационные вопросы выполнения этого проекта.

Итоговый документ, подписанный доктором Дж. Лоу и акад. М. В. Келдышем 21 января 1971 г., был взят за основу международного “Соглашения между СССР и США о сотрудничестве в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях”, подписанного 24.05.1972 г. в Москве председателем Совета Министров СССР А.Н. Косыгиным и президентом США Р. Никсоном. Соглашение предусматривало дальнейшее расширение сотрудничества сторон в области космической метеорологии, изучения природной среды, исследования околоземного пространства, Луны и планет, космической биологии и медици-

ны. Была также достигнута договоренность о проведении работ по созданию совместимых средств сближения и стыковки для ЭПАС с целью повышения безопасности полета человека в космос и обеспечения возможности осуществления в дальнейшем совместных научных экспериментов. Организация и координация совместных работ по намеченным программам и проектам Соглашения была поручена Совету “Интеркосмос” АН СССР.

Экспериментальный полет “Аполлон–Союз” (ЭПАС). После подписания Соглашения состоялась целая серия технических совещаний совместных рабочих групп специалистов СССР и США в Хьюстоне и в Москве. В 1972 г. техническим директором ЭПАС с советской стороны был назначен чл.-корр. РАН К.Д. Бушуев из ОКБ-1, а с американской – доктор Гленн Ланней – руководитель полетов НАСА на Луну. 30 января 1973 г. НАСА объявило свои экипажи по программе ЭПАС, а 5 мая 1973 г. АН СССР назвала имена советских экипажей. Заранее была утверждена дата начала совместного полета – 15.07.1975 г. В порядке подготовки к выполнению программы ЭПАС в 1974 г. были проведены испытательные беспилотные полеты модернизированных кораблей “Космос-638”, “Космос-672” и пилотируемого КК “Союз-16” с космонавтами А.В. Филлипченко и Н.Н. Руковищниковым и трех американских пилотируемых полетов по программе “Скайлэб”.

15 июля 1975 г. с космодрома Байконур состоялся запуск КК “Союз” с космонавтами Алексеем Леоновым и Валерием Кубасовым. Через 7 ч 30 мин с космодрома им. Кеннеди на мысе Канаверал состоялся старт КК “Аполлон” с астронавтами Томасом Стаффордом, Вэнсом Брандом и Доналдом Слейтоном. После маневра на орбите 17 июля 1975 г. состоялась их стыковка, и был впервые осуществлен взаимный переход с одного корабля на другой. Во время полета были осуществлены запланированные совместные научные эксперименты: “УФ-поглощение”, “Искусственное солнечное затмение”, “Универсальная печь”, “Зоннообразующие грибки”, “Микробный обмен”. Проведя вместе около двух суток, произошло разделение КК. После завершения автономного полета “Союз-19” приземлился в Казахстане, а “Аполлон” привалился в акватории Тихого океана. Совместный полет КК “Союз”–“Аполлон” заложил основу будущих международных полетов в космос и созданию в 1998 г. МКС.

17 июня 1992 г. было заключено “Соглашение между РФ и США о сотрудничестве в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях”, в котором предусматривалось осуществление полетов станции “Мир” и корабля многоразового использования “Спейс шаттл” с участием российских и американских космонавтов. Проект полета “шаттлов” на станцию “Мир” получил в США название “первой фазы”, а программа создания МКС стала “второй фазой” многостороннего космического сотрудничества. 27 марта 2001 г. вступило в силу “Соглашение между Правительствами Канады, Европейского космического агентства, Японии, Российской Федерации и Со-

единенных Штатов Америки относительно сотрудничества по международной космической станции гражданского назначения”, а 2 сентября 1993 г. Россия и США подписали “Соглашение о совместном строительстве Международной космической станции”.

Изучение природной среды (СССР–США). После подписания 24 мая 1972 г. “Соглашения между СССР и США о сотрудничестве в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях” была создана совместная рабочая группа “Изучение природной среды из космоса”, которую возглавили вице-президент АН СССР акад. А.П. Виноградов и доктор Л. Джаффи (НАСА). Перед учеными СССР и США была поставлена задача исследования глубинных структур Земли, определения запасов влаги в почве, наблюдения за посевами сельскохозяйственных культур, изучение растительного покрова, а также различных свойств Мирового океана и его биологической продуктивности путем распознавания и анализа изображений на космических и аэроснимках. Широкое применение в этих исследованиях нашли телевизионные, фотографические и другие методы съемки, получаемые с метеорологических ИСЗ “НОАА”, “Нимбус”, “Метеор-1 и 2”, спутника дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) “Ландсат-1” и с пилотируемых КК “Союз” и “Салют”. Для выполнения совместных работ учеными на национальных территориях были выбраны сходные по своим географическим признакам участки местности, на которых проводились аэрокосмические и наземные наблюдения по скоординированным программам. Эти исследования в течение нескольких лет позволили разработать новые методы получения, обработки и анализа данных ДЗЗ важные для развития сельского хозяйства и экологии.

В 1972–1977 гг. была выполнена серия совместных океанографических исследований у берегов Восточной Атлантики, Северо-Западной Атлантики, Северо-Западной Африки, в Индийском и Атлантическом океанах с использованием данных ИСЗ “Ландсат-2”, “НОАА-4 и 5” и советских научных кораблей по комплексному исследованию взаимодействия океана с атмосферными процессами, а также наблюдения за поверхностью океана: волнением, цветностью воды, температурой, биомассой и др. В течение многих лет с советской стороны этими работами руководил заместитель директора Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН акад. В.Е. Виноградов.

Эксперименты по исследованию растительности и земельных угодий методами ДЗЗ, начатые в 1975 г. советскими и американскими специалистами, были продолжены на тестовых полигонах-аналогах в штате Канзас (США) в 1987 и 1989 гг. (“FIFE-87 и -89”) и в 1991 г. на Курской биосферной станции Института географии АН СССР (Курэкс-91”) под руководством проф. В.В. Козо-дерова (Институт вычислительной математики РАН) и Д. Дирига (Годдаровский космический центр НАСА). В эксперименте “Курэкс” наряду со специалистами NASA принимали участие ученые из ряда университетов США из штатов Вашингтон, Небраска, Канзас и Мэриленд. Наряду с наземными измерениями проводилась многозональная и тепловая кос-

мическая съемка полигона (30 × 30 км) со спутников NOAA, "Landsat-TM" (США), SPOT (Франция), "Космос-1939" и со спутника "Алмаз" (СССР) радиолокатором с синтезированной апертурой.

По предложению американской стороны в 1991 г. были начаты исследования еще в одном направлении, связанном с изучением состояния бореальных лесов и их влияния на биосферу планеты. С этой целью в 1991 г. на полигонах-аналогах в штате Мейн (США) и в Саянах (Красноярский край) были организованы совместные наземные и аэрокосмические эксперименты по изучению динамики лесных экосистем и оценке их экологического состояния. Возглавлял эти исследования заместитель директора Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН проф. В.И. Сухих.

Химия и физика атмосферы. 5 августа 1991 г. в рамках программы "Интеркосмос" был запущен КА "Метеор-3/ТОМС" с американской аппаратурой для контроля состояния озонового слоя Земли. Американский УФ-спектрометр ТОМС в течение четырех лет регистрировал интенсивность солнечного излучения и излучения, рассеянного от Земли и ее атмосферы. Прием научной информации со спутника осуществлялся наземными пунктами в Уоллопсе (США) и в Обнинске. Реализация этого проекта позволила в глобальном масштабе наблюдать изменчивость озонового слоя атмосферы. В течение 1991–1995 гг. спутник обеспечивал мировое научное сообщество данными об изменениях озонового слоя Земли. Для продолжения исследований в области физики атмосферы в декабре 2001 г. был запущен еще один спутник "Метеор-3М/SAGE-III" с американским прибором, предназначенным для изучения стратосферных аэрозолей и газов. Работы по сотрудничеству с NASA в этой области многие годы возглавляет акад. Г.С. Голицын (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН).

Модуль "Природа" пилотируемой станции "Мир". Одно из центральных мест в развитии научно-методических и технических средств ДЗЗ по программе "Интеркосмос" принадлежит проекту создания комплекса аппаратуры для специализированного модуля "Природа". Работы по проекту были начаты в 1982 г. В его реализации принимали участие специалисты Болгарии, Германии, Италии, ПНР, Румынии, СССР, ЧСФР, США и Франции.

Для модуля "Природа" странами-участницами проекта был разработан большой комплекс оптической, радиофизической и квантово-оптической аппаратуры для проведения исследований по отработке методов ДЗЗ при решении различных глобальных и региональных задач с высокой точностью, надежностью и пространственным разрешением. Такие данные были необходимы для решения многих экологических, при-

родно-ресурсных и гидрометеорологических задач как фундаментального, так и прикладного характера. В проекте "Природа" были воплощены новейшие разработки стран-участниц программы "Интеркосмос" в области ДЗЗ.

23 апреля 1996 г. состоялся запуск модуля "Природа" к станции "Мир". На модуле "Природа" функционировали 18 различных комплексов целевой аппаратуры ДЗЗ.

Для обработки огромных потоков получаемой космической информации в ИРЭ РАН был создан и оборудован с помощью НАСА Центр обработки и хранения космической информации с соответствующим каталогом экспериментов, архивом и базой данных, что давало возможность участникам экспериментов на модуле "Природа" иметь открытый доступ к информации.

В ходе полета модуля "Природа" ученые США и России выполнили ряд экспериментов в области космической геодезии, а также активно сотрудничали в разработке и реализации программы изучения земной поверхности. Работы по сотрудничеству с NASA возглавлял заместитель директора ИРЭ РАН проф. Н.А. Арманд.

В 2001 г. модуль "Природа" вместе со станцией "Мир" прекратил свое существование в связи с завершением программы и запуском МКС.

В СССР в период с 1967 по 1991 г. по программе "Интеркосмос" были реализованы многочисленные космические проекты и эксперименты, в которых участвовало более 20 стран. В результате сотрудничества с зарубежными странами на совместной основе было разработано более 100 научных приборов и систем для проведения исследований на советских КА, которые Советский Союз предоставлял странам-участницам программы "Интеркосмос" на безвозмездной основе. С помощью советских КА, АМС и пилотируемых кораблей и станций учеными были получены важные научные и практические результаты в области космической физики, метеорологии, наук о Земле, медико-биологических проблем в космосе, исследований Луны и планет Солнечной системы и др.

Преемником Совета "Интеркосмос" в 1992 г. стал Совет по космосу РАН, в составе которого была создана секция "Международное сотрудничество". В рамках этой секции осуществляется международное сотрудничество по космическим исследованиям на основе двухсторонних соглашений между институтами РАН и зарубежными организациями.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема "Мониторинг", госрегистрация № 01.20.0.2.00164).