

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. Четркова^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, Четркова, 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; Nohner-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 мочных 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-

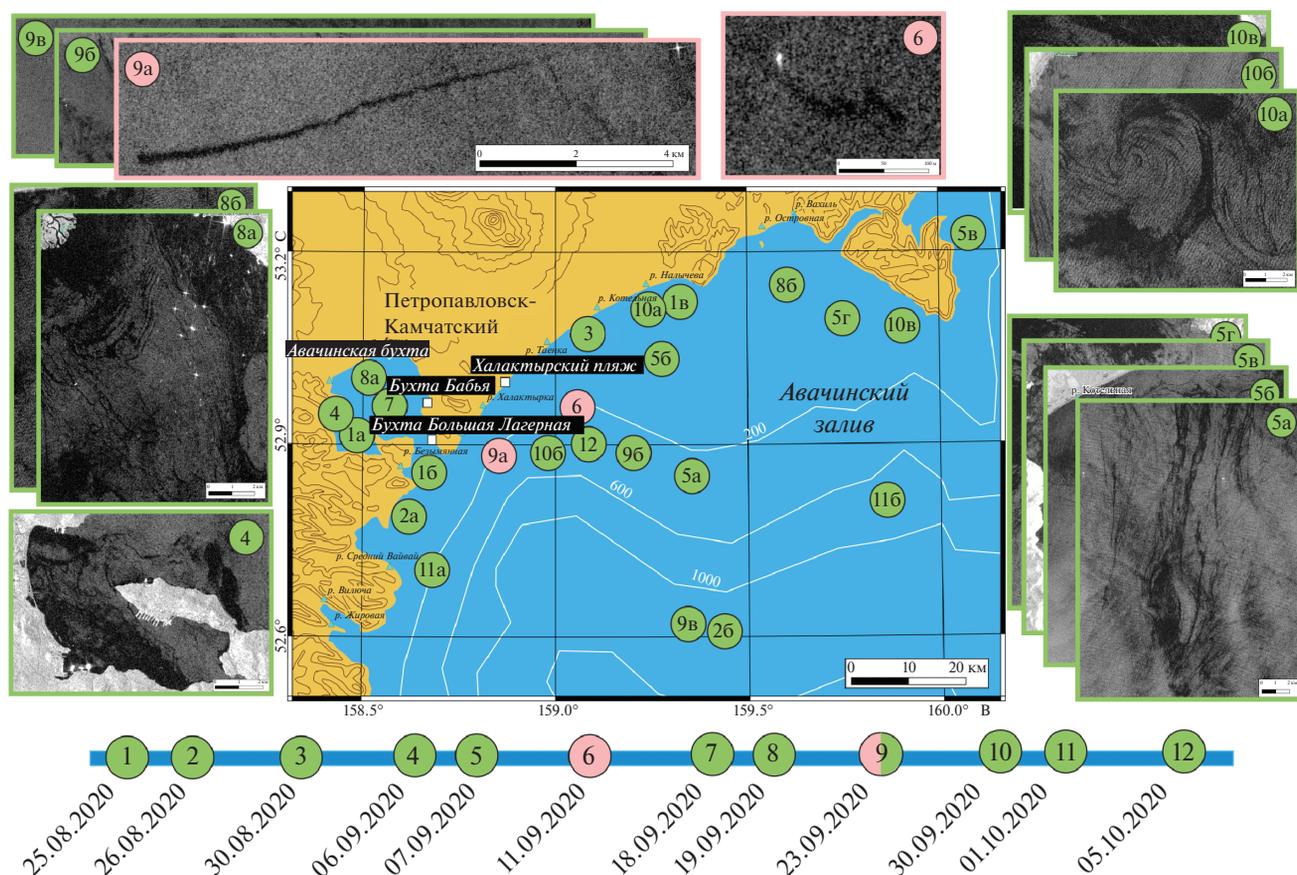


Рис. 2. Результаты дешифрирования космических радиолокационных изображений Авачинского залива и Авачинской бухты, полученных со спутников Sentinel-1A/B в период с 25 августа по 5 октября 2020 г. Места обнаружения пленочных образований показаны кругами с нумерацией (судовые разливы показаны розовым цветом,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

окологеривной зоне акватории, биогенные ПАВ зарегистрированы на более обширных пространствах. Сликотые образования, обладающие дешифровочными признаками биогенных ПАВ, обнаруживались на участках, отмеченных на рис. 2 маркерами "16", "1в", "2а", "26", "3", "5а", "56", "5в", "5г", "86", "96", "9в", "10а", "106", "10в", "11а", "116" и "12". Биогенные ПАВ образуются в результате жизнедеятельности водорослей, бактерий и других организмов. Ниже будет показано, что в Авачинском заливе в период развития экологического происхождения 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 происхождения подвергался как незначительному локальному антропогенному, так и интенсивному естественному негативному воздействию. Выявленные на основании анализа прямых и косвенных дешифровоч-

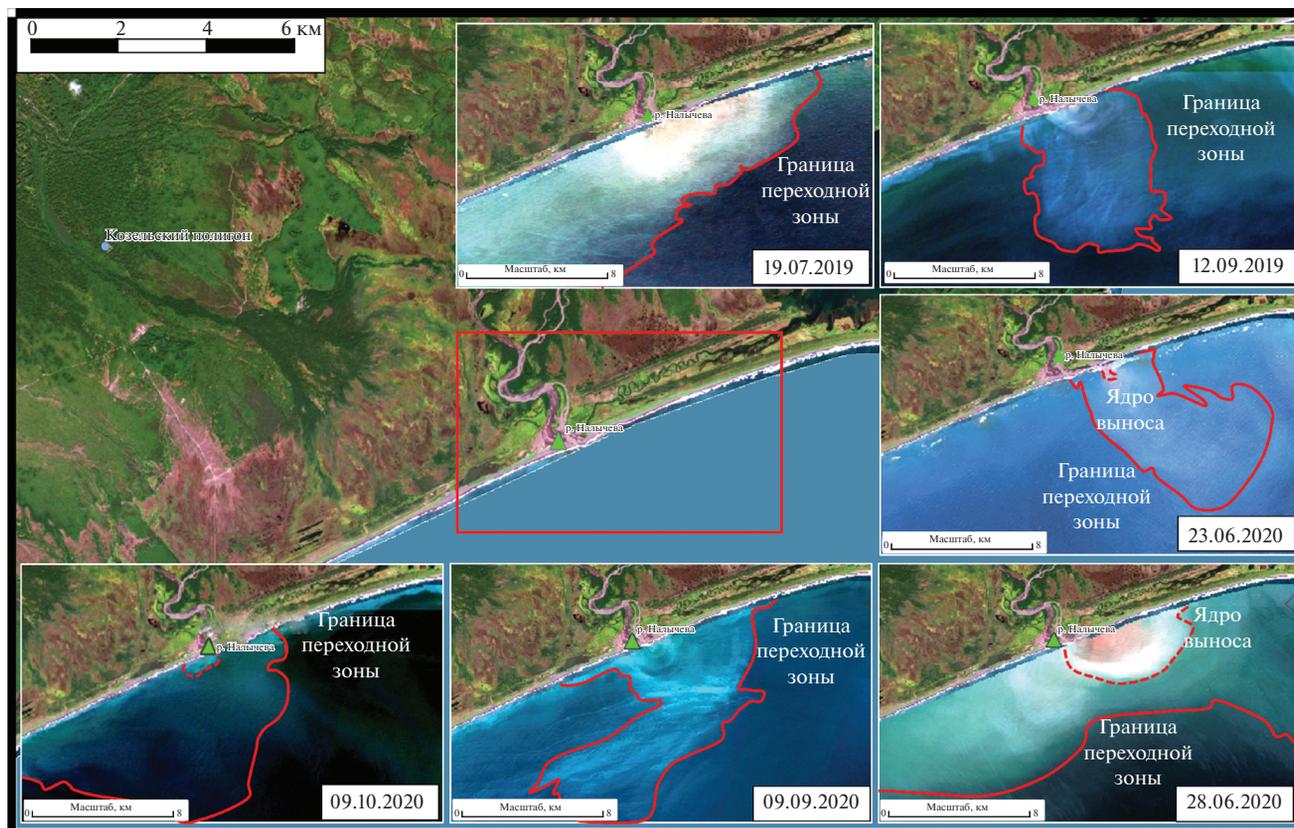


Рис. 3. Примеры регистрации оптических неоднородностей, связанных с поступлением стока р. Нальчева в Авачинский залив. Космические оптические многоспектральные изображения получены со спутников Sentinel-2A/B. Выделены элементы “плюмов” (ядро и граница переходной зоны).

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, *a*.

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, *a*, 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, *a*). По сравнению с фоновыми значениями, например 4 сентября 2020 г. (см. рис. 4, *a*), 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,

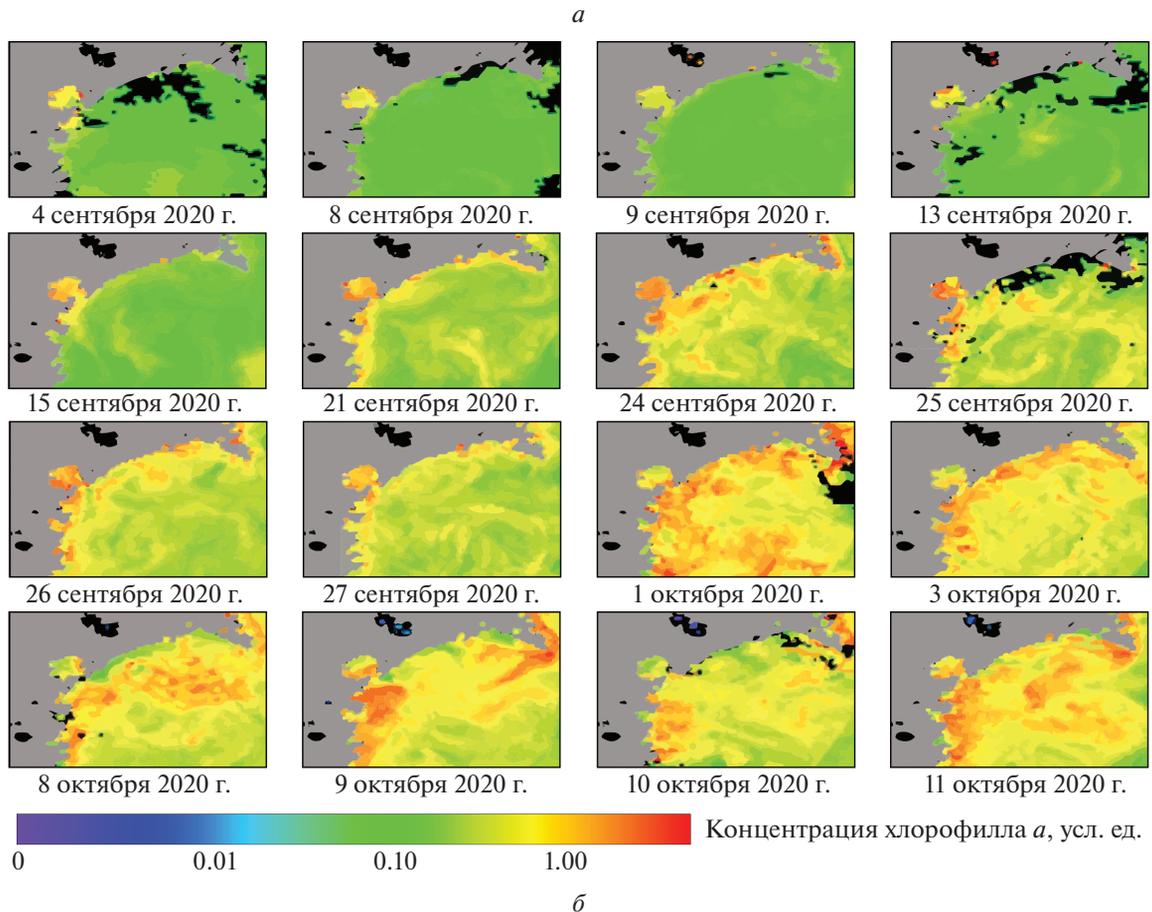


Рис. 4. Информационные продукты, сформированные в ходе оценки интенсивности цветения фитопланктона в Авачинском заливе: *a* – суточные пространственные распределения концентрации хлорофилла *a* (в относительных единицах) в сентябре–октябре 2020 г., полученные на основании обработки данных аппаратуры 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-

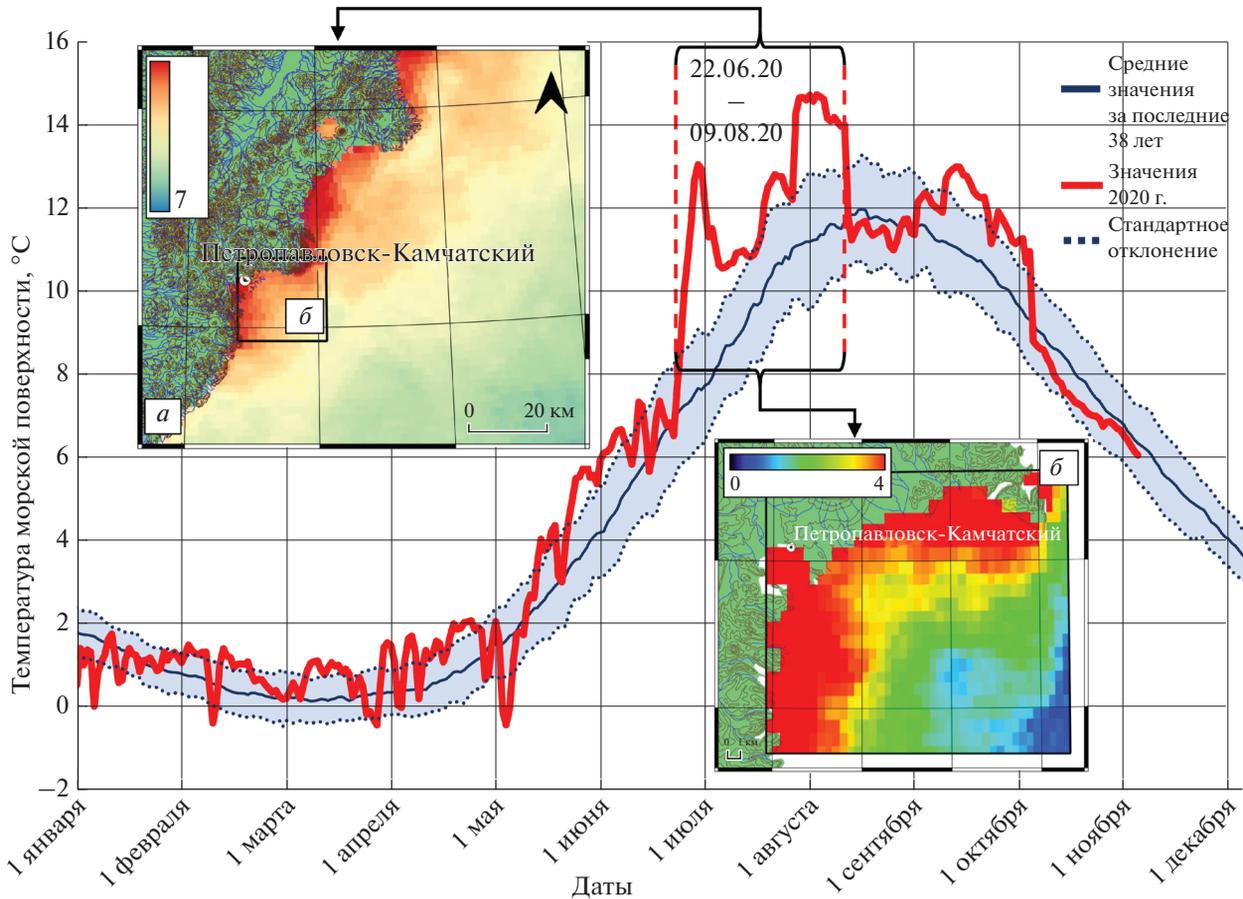


Рис. 5. Графики осредненных за 1981–2020 гг. суточных значений температуры морской поверхности в Авачинском заливе (на основе продукта NOAA OISST) – климатическая норма (синяя линия), диапазон стандартных отклонений (пунктирные линии), а также температуры морской поверхности в этом заливе для различных 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-

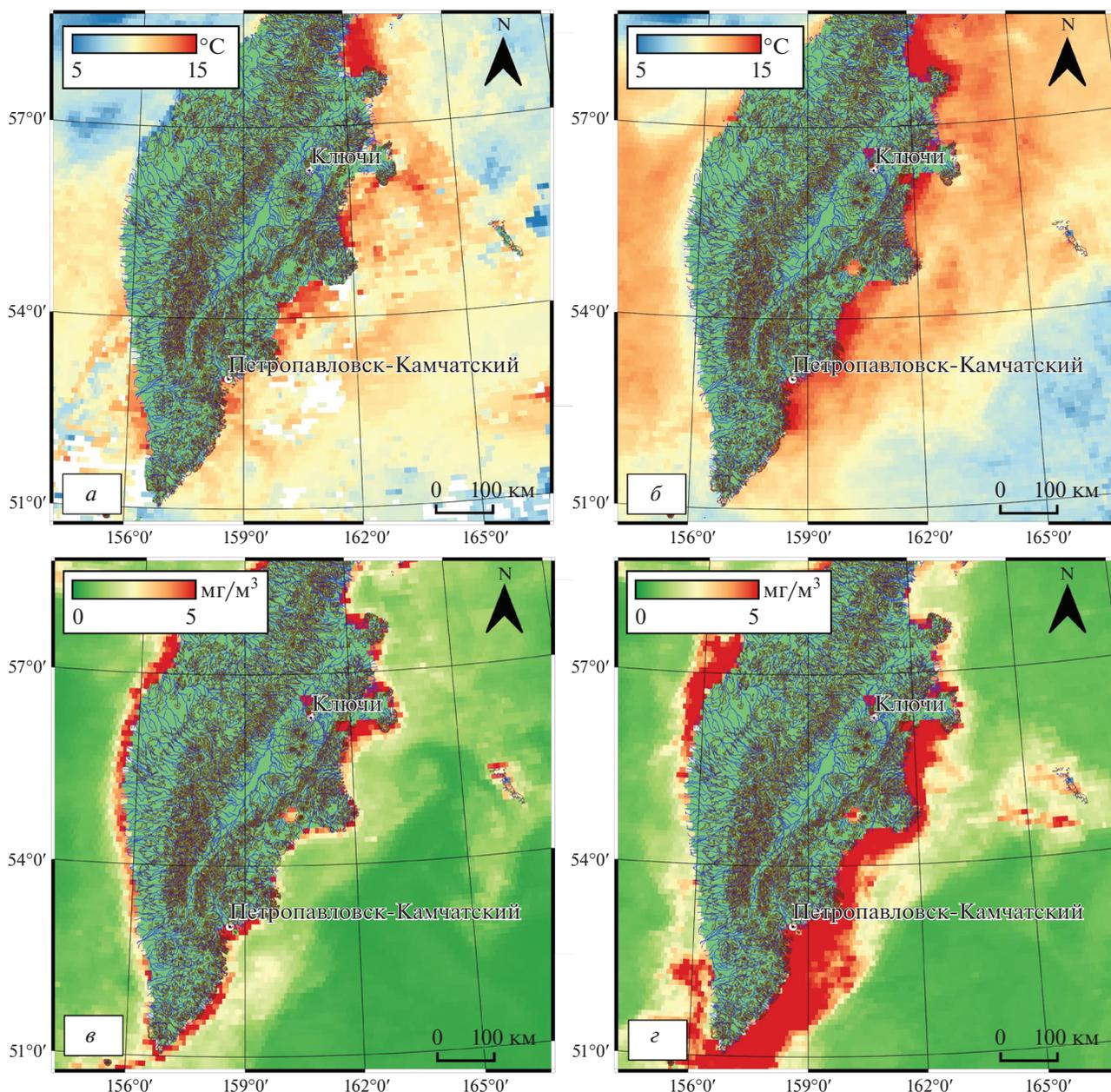


Рис. 6. Пространственные распределения усредненных значений температуры морской поверхности в июле 2019 (а) и 2020 (б) гг. и пространственные распределения значений концентрации хлорофилла *a* в сентябре 2019 (в) и 2020 (г) гг.

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>