

УДК 551.468

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗ КОСМОСА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСШЕСТВИЯ У ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА В СЕНТЯБРЕ-ОКТЯБРЕ 2020 г., СВЯЗАННОГО С КРАСНЫМ ПРИЛИВОМ

© 2021 г. Академик РАН В. Г. Бондур^{1,*}, В. В. Замшин¹, О. И. Чверткова¹

Поступило 16.12.2020 г.

После доработки 17.12.2020 г.

Принято к публикации 17.12.2020 г.

Приводятся результаты космического мониторинга чрезвычайной экологической ситуации у полуострова Камчатка, вызвавшей массовую гибель гидробионтов осенью 2020 г. На основании анализа долговременных рядов спутниковых данных (более 15 тыс. сцен) 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 3–6°C), которые привели к аномальному росту концентрации хлорофилла *a* (в 5–8 раз выше фоновых значений) в конце сентября–начале октября 2020 г. В результате этого существенно изменился биогенный режим, что привело к вредоносному цветению водорослей (красный прилив), вызвавшему гибель гидробионтов как в Авачинском заливе, так и в прибрежных акваториях всего полуострова Камчатка.

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

DOI: 10.31857/S2686739721030014

ВВЕДЕНИЕ

В сентябре-октябре 2020 г. у побережья Камчатки, в том числе в Авачинском заливе в районе Халактырского пляжа, сложилась неординарная ситуация, связанная с массовой гибелью гидробионтов, неестественным цветом и запахом океанской воды. Фиксировались случаи отравления людей, взаимодействовавших с водной средой. Для выявления причин этого чрезвычайного экологического происшествия был организован и проведен космический мониторинг прибрежных акваторий у полуострова Камчатка.

Космические средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обладают рядом достоинств, таких как большая обзорность; оперативность; возможность 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 [1].

С использованием методов ДЗЗ могут регистрироваться вариации гидрооптических характеристик морской воды [2], происходящие за счет изменения рассеяния и поглощения света вследствие вариаций концентрации взвешенных и растворенных органических веществ [3], в том числе из-за наличия фитопланктона [4]; искажения пространственно-временной структуры волнения [1]; наличие пленок поверхностно-активных веществ [1]; поля течений [1]; внутренние волны [5]; приливные явления [6]; вариации температуры морской поверхности [1] и др. Дистанционная регистрация таких значимых параметров водной среды с привлечением результатов подспутниковых измерений [7] и результатов математического моделирования [8] позволяет осуществлять эффективный мониторинг морских акваторий, подверженных воздействию антропогенных [1, 9] и естественных факторов [3, 4].

В настоящей работе приведены результаты космического мониторинга чрезвычайной экологической ситуации, произошедшей у берегов Камчатки осенью 2020 г., на основании которых сделано заключение об основной причине ее возникновения.

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", Москва, Россия

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследования проводились в акватории Авачинского залива в районе Халактырского пляжа, где в конце сентября—начале октября 2020 г. была впервые обнаружена массовая гибель гидробионтов, а также в прибрежных акваториях всего полуострова Камчатка.

В процессе космического мониторинга проводились сбор, обработка и анализ временных серий актуальных и архивных данных ДЗЗ, а также дополнительной информации. Было собрано и обработано более 15 тыс. архивных и актуальных космических изображений, полученных со спутников AQUA, TERRA, NOAA, SENTINEL-1/2 и др. При этом за счет применения геоинформационных технологий и согласованных интерфейсов обмена данными обеспечивалась возможность применения специализированных методов обработки космических изображений и дополнительной информации [10]. В настоящей работе использовались подходы, апробированные при дистанционных исследованиях в различных акваториях морей и океанов [1–3, 7, 9], а также опыт, накопленный при разработке и применении экспериментального образца наземно-космической системы мониторинга прибрежных акваторий [10].

В ходе проведения исследований регистрировались различные значимые параметры водной среды, имеющие важное значение для выявления негативных воздействий на прибрежные акватории, а именно [1, 2, 4, 10]:

а) спектральная отражательная способность морской поверхности в оптическом диапазоне электромагнитных волн;

б) удельная эффективная площадь рассеяния морской поверхности в С-диапазоне спектра радиоволн;

в) концентрация хлорофилла *a* в приповерхностном слое морской среды;

г) температура морской поверхности;

д) скорость и направление приповерхностного ветра и др.

Особое внимание в настоящей работе уделялось таким основным значимым параметрам водной среды, как концентрация хлорофилла *a*, свидетельствующего о содержании фитопланктона в приповерхностном слое акватории [10], а также температура морской поверхности. В табл. 1 приведены источники данных, временные интервалы проведения мониторинга и ключевые задачи, решаемые с использованием этих основных параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Временной ряд суточных пространственных распределений концентрации хлорофилла *a* (в относительных единицах) в Авачинском заливе, построенных на основании данных много-спектральной аппаратуры VIIRS спутников NOAA (<https://www.star.nesdis.noaa.gov/>) в различные дни сентября–октября 2020 г., представлен на рис. 1.

Анализ данных, представленных на рис. 1, позволил выявить резкое увеличение значений концентрации хлорофилла *a* (приблизительно в 5 раз) по сравнению с предыдущими днями, произошедшее 24 сентября 2020 г., практически по всей площади залива. Высокий уровень концентрации хлорофилла *a* в данной акватории наблюдался и в последующие дни. Наиболее высокий рост концентрации хлорофилла *a* (до ~7–8 раз) был выявлен 1 октября 2020 г. (см. рис. 1).

Для оценки отклонения от нормы уровня концентрации этого параметра в период чрезвычайной экологической ситуации, которая привела к массовой гибели гидробионтов, был проведен анализ временного ряда данных, полученных спектрорадиометрами MODIS спутников AQUA и TERRA [11] за период времени с 24 февраля 2000 г. по 31 октября 2020 г.

В результате предварительной обработки и обобщения более чем 10 тыс. архивных космических сцен построены распределения среднемесячных (с мая по октябрь) концентраций хлорофилла *a* (мг/м³) для акватории Авачинского залива с 2000 по 2020 г., которые представлены на рис. 2.

На основании результатов анализа данных, представленных на рис. 2, установлено, что, начиная с 2000 г., в акватории Авачинского залива не наблюдалось столь высоких среднемесячных концентраций хлорофилла *a*, как в конце сентября—начале октября 2020 г. Среднемесячное значение этого параметра в октябре 2020 г. составило ~14.9 мг/м³, при этом среднее значение за 2000–2019 гг. (для октября) составило ~3.8 мг/м³ при максимуме (~9.3 мг/м³), выявленном в октябре 2017 г. (см. рис. 2). Таким образом, в октябре 2020 г. концентрация хлорофилла *a* превысила климатическую норму почти в 4 раза, и для этого параметра был достигнут исторический максимум в рассматриваемый интервал времени с 2000 по 2020 г.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в конце сентября—начале октября 2020 г. в акватории Авачинского залива наблюдались аномально высокие концентрации хлорофилла *a*, следовательно, и фитопланктона. Это связано с интенсивным вредоносным цветением микроводорослей, так называемым явлением красного прилива [12], которое встречается в дальневосточных морях России [4, 13] и в других акватории-

Таблица 1. Основные исследуемые параметры водной среды, источники данных, решаемые задачи

Исследуемый параметр	Источник данных	Временной интервал исследования	Временной интервал получения данных	Основные решаемые задачи
Концентрация хлорофилла <i>a</i> в приповерхностном слое	Многоспектральные изображения, полученные спектрорадиометрами MODIS спутников AQUA/TERRA	24.02.2000–31.10.2020	Ежесуточно	1. Анализ долговременных (~20 лет) рядов концентрации хлорофилла <i>a</i> (осредненной по площади Авачинского залива), сопоставление результатов измерений 2020 г. с климатической нормой. 2. Формирование и анализ среднемесячных карт концентрации хлорофилла <i>a</i> для всех прибрежных акваторий Камчатки
	Многоспектральные изображения, полученные сканирующими радиометрами VIIRS спутников NOAA	01.01.2019–10.10.2020	Ежесуточно	1. Анализ пространственного распределения концентрации хлорофилла <i>a</i> в пределах Авачинского залива во время развития экологического бедствия
Температура морской поверхности	Данные спектрорадиометров MODIS спутников AQUA/TERRA	01.06.2020–10.10.2020	Ежесуточно	1. Анализ пространственного распределения температуры морской поверхности в пределах Авачинского залива летом 2020 г. и во время развития экологического бедствия
	Оптимальная интерполяционная температура поверхности моря (OISST) NOAA	01.09.1981–10.10.2020	Ежесуточно	1. Анализ долговременной (~39 лет) динамики температуры морской поверхности (осредненной по площади Авачинского залива). Сопоставление тепловых аномалий лета 2020 г. с климатической нормой. 2. Анализ пространственных распределений температуры морской поверхности в районе всего полуострова Камчатка летом 2020 г. и во время развития экологического бедствия

ях [12]. Одна из особенностей, сопровождающих красные приливы, заключается в насыщении водной среды токсинами, отравляющими некоторые виды организмов, существующих в экосистеме [12, 13], которые и привели к гибели гидробионтов в исследуемой акватории.

Для оценки пространственных масштабов вспышки фитопланктона исследовался временной ряд среднемесячных карт концентраций хло-

рофилла *a*, полученных по космическим данным, в прибрежных акваториях всего полуострова Камчатка. На рис. 3 для сравнения приведены пространственные распределения концентраций этого параметра для данного региона в сентябре 2019 и 2020 г. Анализ рис. 3 свидетельствует о том, что в сентябре 2020 г. значения концентраций хлорофилла *a* были значительно более высокими и наблюдались в прибрежных акваториях вокруг

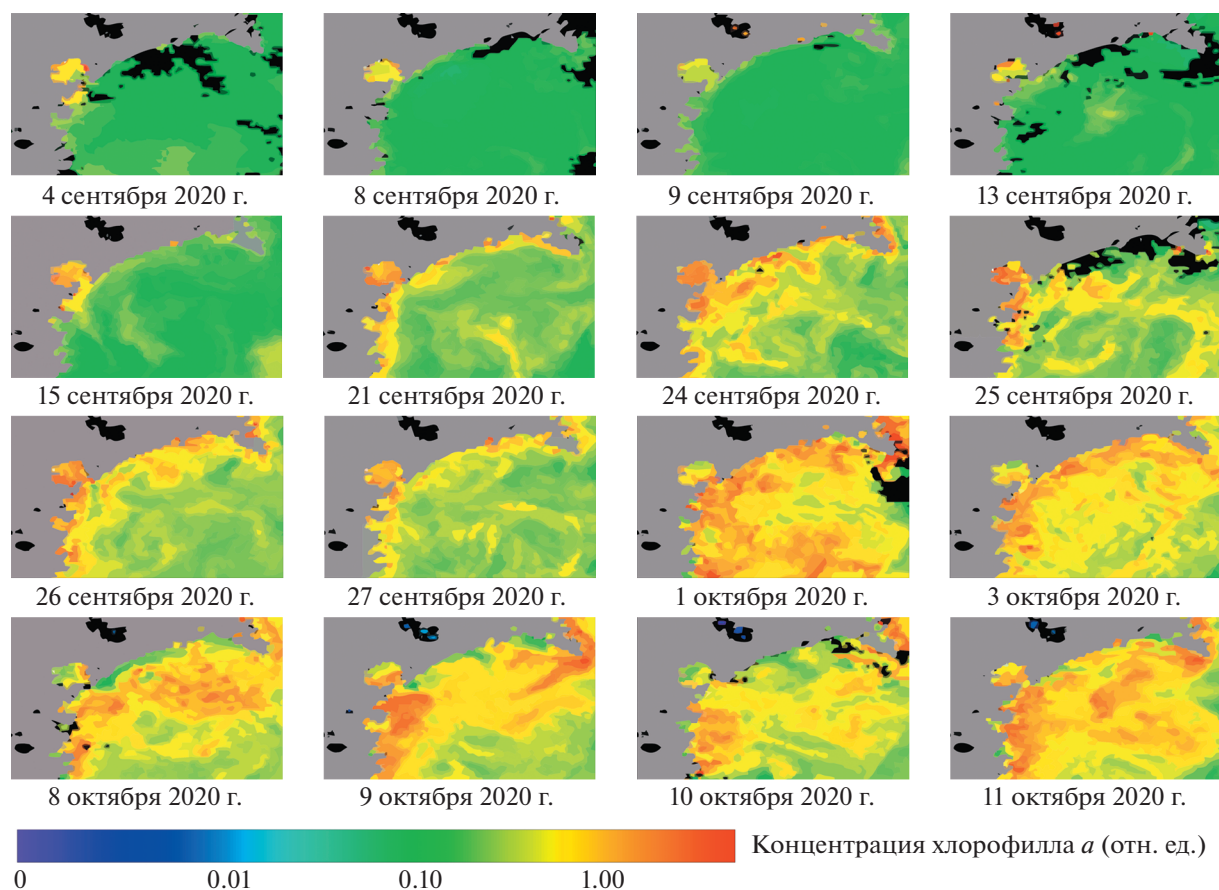


Рис. 1. Временной ряд суточных пространственных распределений концентрации хлорофилла *a* (в относительных единицах) в сентябре–октябре 2020 г., измеренных в Авачинском заливе с помощью аппаратуры VIIRS спутников NOAA.

всего полуострова Камчатка. Это также приводило к интенсивному вредоносному цветению микроводорослей (красный прилив [12, 13]), вызвавшему гибель гидробионтов и в других малонаселенных районах вокруг полуострова Камчатка.

Для выяснения возможных причин аномального роста концентрации хлорофилла *a* (развития фитопланктона), которое связано с красным приливом, были проанализированы данные о температуре морской поверхности в Авачинском заливе и в прибрежных акваториях всей Камчатки. Как известно, повышение температуры морской воды приводит к увеличению биомассы микроводорослей, а следовательно, и к повышению концентрации хлорофилла *a* (см., например, [14]).

Результаты исследования температуры морской поверхности в прибрежных акваториях Камчатки представлены на рис. 4. Пунктирной линией на рис. 4 показаны осредненные (с 1981 по 2020 г.) суточные значения температуры морской поверхности в Авачинском заливе, а сплошной линией — значения температур морской поверхности в этом заливе в различные дни 2020 г.,

сформированные на основе значений оптимальной интерполяционной температуры (NOAA OISST, версия v2.1), полученных с использованием спутниковых и подспутниковых данных, а также результатов их интерполяции [15].

На врезке, приведенной справа на рис. 4, показано пространственное распределение температуры морской поверхности в Авачинском заливе 27 июля 2020 г., полученное в результате обработки данных прибора MODIS (спутник AQUA). На врезке, представленной слева на рис. 4, продемонстрировано отклонение температуры морской поверхности 29 июня 2020 г. от климатической нормы в прибрежных акваториях вокруг всего полуострова Камчатка (результат обработки данных NOAA/OISST).

Из анализа данных, приведенных на рис. 4, следует, что в июне–сентябре 2020 г. фиксировались аномальные превышения (более чем на 3–6°C) температуры морской поверхности в Авачинском заливе по сравнению со средними многолетними значениями для этих месяцев. В частности, сильные температурные аномалии с высо-

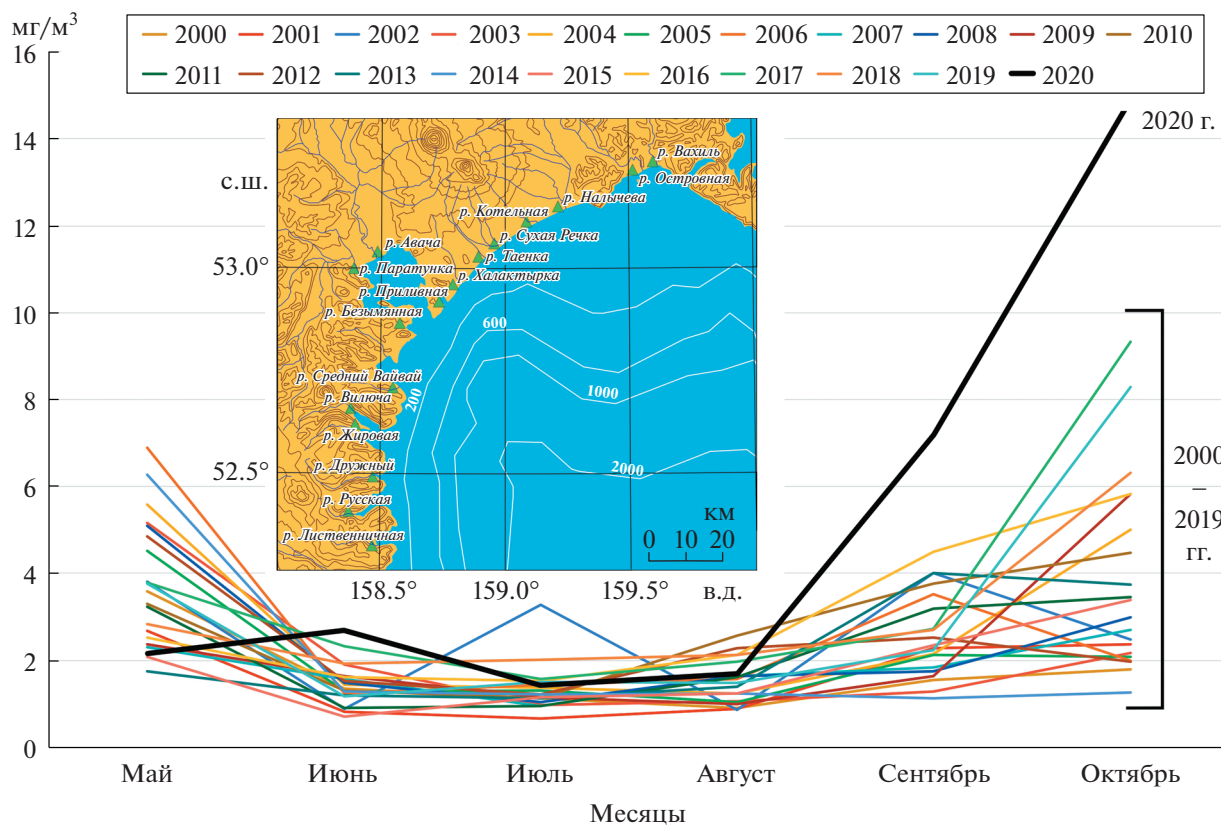


Рис. 2. Распределения среднемесячных (с мая по октябрь) концентраций хлорофилла *a* ($\text{мг}/\text{м}^3$) в акватории Авачинского залива (карта показана на врезке) за период времени с 2000 по 2020 г.

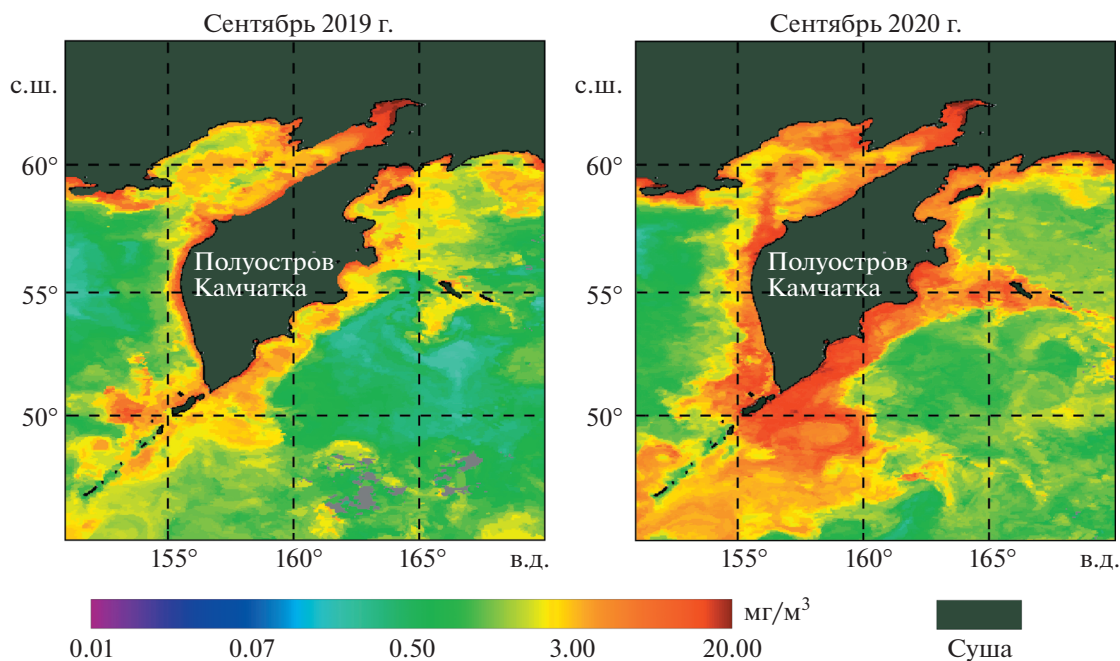


Рис. 3. Пример сопоставления карт среднемесячных концентраций хлорофилла *a* ($\text{мг}/\text{м}^3$) в прибрежных акваториях полуострова Камчатка в сентябре 2019 г. (слева) и в сентябре 2020 г. (справа).

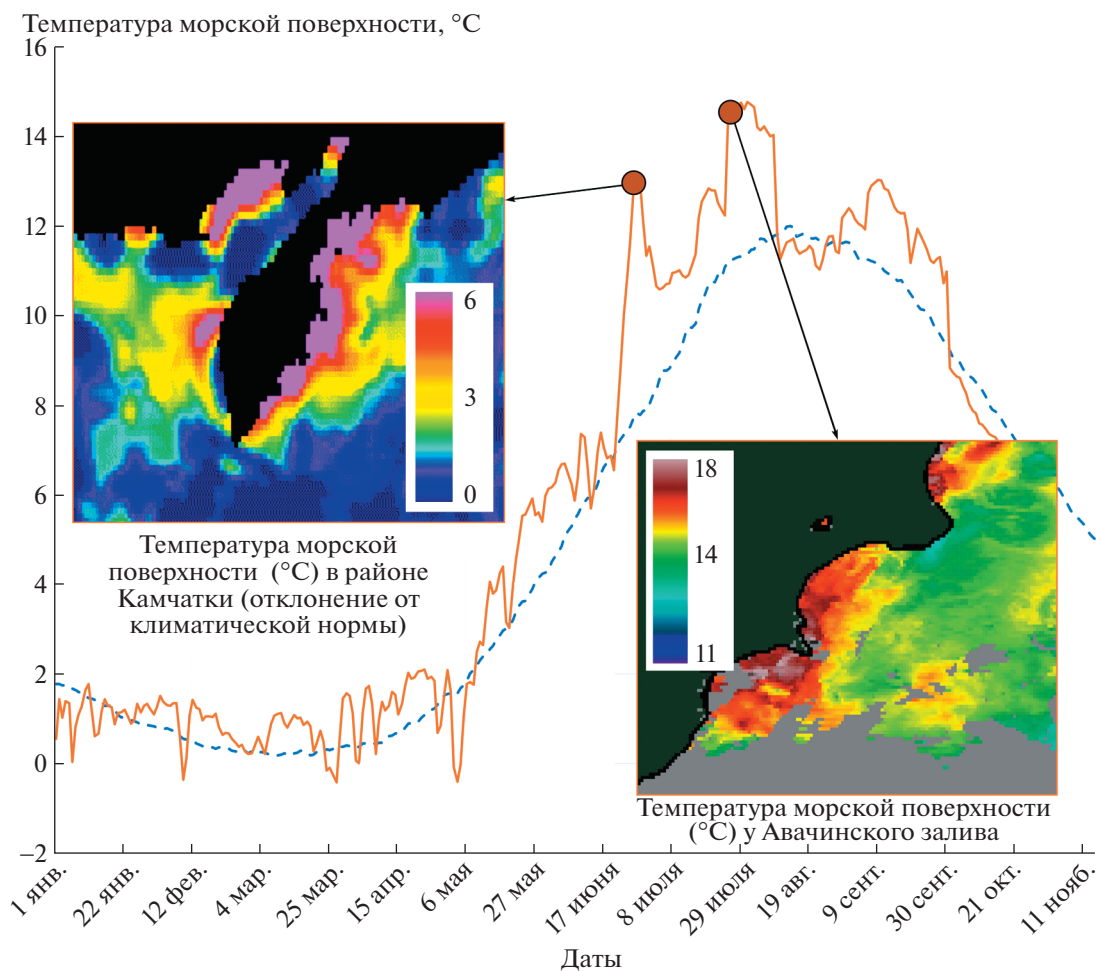


Рис. 4. Осредненные суточные значения температуры морской поверхности в Авачинском заливе за период времени с 1981 по 2020 г. (пунктирная линия) и температуры морской поверхности в этом заливе в различные дни 2020 г. (сплошная линия) (данные NOAA/OISST). Врезка справа – пространственное распределение температуры морской поверхности в заливе 27 июля 2020 г. (данные AQUA/MODIS). Врезка слева – отклонение температуры морской поверхности 29 июня 2020 г. от климатической нормы в прибрежных акваториях вокруг Камчатки (обработка данных NOAA/OISST).

кой температурой у побережья Авачинского залива регистрировались по данным аппаратуры MODIS (спутник AQUA) 27 июля 2020 г. (показано на рис. 4 справа). Положительные аномалии температуры морской поверхности, превышающие на 3–6°C климатическую норму, регистрировались также на значительных площадях вдоль всего побережья полуострова Камчатка (см. врезку на рис. 4 слева).

Это свидетельствует о том, что чрезвычайная экологическая ситуация у полуострова Камчатка, которая привела к массовой гибели гидробионтов осенью 2020 г., имеет природное происхождение и связана с развитием вредоносного цветения водорослей, получившего имя “медвежий” красный прилив, вызванный существенными положительными температурными аномалиями (до

6°C), сформировавшимися в исследуемых акваториях летом 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов космического мониторинга, проведенного в акватории Авачинского залива и в прибрежных акваториях всего полуострова Камчатка, где осенью 2020 г. произошла чрезвычайная экологическая ситуация, связанная с массовой гибелью гидробионтов, получены и проанализированы долговременные ряды спутниковых (более 15 тыс. сцен) и других данных о концентрации хлорофилла *a* (с 2000 по 2020 г.) и температуре морской поверхности (с 1981 по 2020 г.).

С использованием этих данных установлено, что в исследуемом районе в конце сентября–на-

чале октября 2020 г. наблюдался аномальный (по сравнению с предыдущими 20 годами) рост концентрации хлорофилла *a* (в 5–8 раз выше фоновых значений), свидетельствующий о существенном изменении биогенного режима.

Установлено также, что в июле–сентябре 2020 г. в исследуемых акваториях наблюдались сильные положительные аномалии температуры (отклонения от климатической нормы до 6°C), которые способствовали вредоносному цветению водорослей (красный прилив), вызвавшему гибель гидробионтов в прибрежных зонах Авачинского залива и всего полуострова Камчатка.

Таким образом, результаты исследований, проведенных на основании космических данных, показали, что причиной чрезвычайной экологической ситуации, вызвавшей массовую гибель гидробионтов в Авачинском заливе и у побережья всего полуострова 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 при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bondur V.G.* Satellite Monitoring and Mathematical Modelling of Deep Runoff Turbulent Jets in Coastal Water Areas // *Waste Water – Evaluation and Management*, 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>
2. *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 // *Исследования Земли из космоса*. 2005. № 4. С. 54–61.
3. *Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova 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 Science*. 2018. V. 14. № 1. P. 87–103. <https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
4. *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*. Отв. ред. А.В. Адрианов. Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 325–353.
5. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.
6. *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.
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 Int. Symp. Remote Sensing of Environment*. ISRSE, 2005. P. 192–195.
8. *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.
9. *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 // *Исследование земли из космоса*. 2017. № 6. С. 3–22. <https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>
10. *Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas / *Proc. of the Scientific-Practical Conference “Research and Development-2016”*, K.V. Anisimov, et al. (eds.). 2018. P. 625–637. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>
11. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Chlorophyll Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. DOI: data/. <https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/L3M/CHL/2018>
12. *Anderson D.M.* Toxic Algal Blooms and Red Tides: A Global Perspective, in *Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology* / T. Okaichi, D.M. Anderson, and T. Nemoto, Eds., Elsevier, 1989. P. 11–16.
13. *Орлова Т.Ю.* Красные приливы и токсические микроводоросли в дальневосточных морях России // *Вестник ДВО РАН*. 2005. № 1. С. 27–31.
14. *Sukhanova I.N., Flint M.V.* Anomalous Blooming of Coccolithophorids Over the Eastern Bering Sea Shelf // *Oceanology*. 1998. Т. 38. № 4. С. 502–505.
15. *Reynolds R.W., Banzon V.F.* NOAA CDR Program (2008): NOAA Optimum Interpolation 1/4 Degree Daily Sea Surface Temperature (OISST) Analysis, Version 2. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5SQ8XB5>

STUDYING FROM SPACE THE ENVIRONMENTAL DISASTER NEAR THE KAMCHATKA PENINSULA RELATED WITH A RED TIDE IN SEPTEMBER-OCTOBER 2020

Academician of the RAS **V. G. Bondur^{a,#}, V. V. Zamshin^a, and O. I. Chvertkova^a**

^a *AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

The results of satellite monitoring of an environmental disaster near the Kamchatka Peninsula that caused mass mortality of aquatic organisms in Autumn 2020 are presented. An analysis of long-term series of satellite data (more than 15 thous. scenes) 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 anomalies of temperature (3–6°C deviation of the climatic norm) that caused abnormal increase in chlorophyll_a concentrations (5–8-fold exceeding background) in the end of September – beginning of October 2020. Thus, the biogenic mode changed greatly what resulted in harmful algae blooms (red tide) and caused aquatic organism mortality both in Avacha Bay and in coastal water areas of the whole Kamchatka Peninsula.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, satellite data, coastal water areas, red tide, Kamchatka