

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОСЕННЕГО ЦВЕТЕНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ У ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ

**М.К. Пичугин, И.А. Гурвич,
Е.С. Хазанова, П.А. Салюк**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт
имени В. И. Ильичева ДВО РАН¹

В этой работе продемонстрированы возможности оптических наблюдений со спутников Sentinel-2, 3 для изучения связанных физических и биологических процессов в поверхностном слое океана во время интенсивного осеннего цветения фитопланктона у юго-восточного побережья Камчатки в сентябре 2020 г. В Авачинском заливе цветение водорослей проявлялось в виде областей с высокой концентрацией хлорофилла-а, придавая морской поверхности соответствующий темно-зеленый оттенок. На композитном изображении с разрешением 10 м из-за выраженных спектральных различий на морской поверхности выделялись скопления водорослей, организованные в сложные системы мезомасштабных и субмезомасштабных взаимодействующих вихревых структур. По данным реанализа ERA5 установлено, что среднемесячная температура поверхности океана (ТПО) акватории Авачинского залива в сентябре 2020 г. показала положительную аномалию с максимумом ТПО (12.0°C) за последние 42 года при климатической норме 10.4°C. Мы допускаем, что при сохранении тенденции роста в ближайшие годы этот максимум будет превышен.

ВВЕДЕНИЕ

В сентябре 2020 года наблюдалось интенсивное цветение морской воды у юго-восточного побережья Камчатки. Особый интерес представляет Авачинский залив, где были зафиксированы массовая гибель морских животных, отравление десятков человек и химические ожоги роговицы глаза у нескольких спортсменов по серфингу на Халактырском пляже [2]. Среди прочих версий выдвинуто предположение, что эти события могут быть связаны с аномально активным размножением микроводорослей, выделяющих ядовитые вещества [4].

Несмотря на то, что интенсивное цветение фитопланктона обычное явление в эстуариях и прибрежных водах северо-западной части Тихого океана, некоторые типы цветения водорослей классифицируются как вредоносные из-за продуцирования сильных токсинов [3, 5], в том числе представляющих опасность для здоровья людей.

В этом контексте использование спутниковых методов картирования вредоносного цветения водорослей, основанных на оптических свойствах морской воды, получает все большее распространение в зада-

чах мониторинга прибрежных акваторий, в том числе со сложной конфигурацией берегов [6, 7].

В этом кратком сообщении мы ставим целью:

- продемонстрировать преимущества совместных оптических наблюдений со спутников Sentinel-2, 3 для изучения связанных физических и биологических процессов в поверхностном слое океана на примере активного цветения морской воды у юго-восточного побережья Камчатки в сентябре 2020 г.;
- обратить внимание на некоторые особенности межгодовых колебаний и тенденций в изменчивости температуры поверхности океана в этом районе.

■ Цветение микроводорослей на спутниковых изображениях высокого и среднего разрешения: Sentinel -2, -3

На рис. 1 представлено композитное изображение (R – 665 нм, G – 560 нм, B – 490 нм) Авачинского залива и прилегающей акватории открытого океана, полученное со спутника Sentinel-2B (радиометр MSI)

¹ 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (423) 231-14-00.
E-mail: pichugin@poi.dvo.ru

с пространственным разрешением 10 м, и поле концентрации хлорофилла-а (Chl-a) у юго-восточного побережья Камчатки со спутника Sentinel-3В (радиометр OLCI) с разрешением 300 м. Дата 26 сентября 2020 г. выбрана исходя из минимальной облачности и сопряжения измерений со спутников. Отметим, что в сентябре 2020 г. лишь для 46% изображений Sentinel-3А/-3В над Авачинским заливом было безоблачно или малооблачно.

В заливах цветение водорослей проявлялось в виде областей с высокими, относительно открытых вод Тихого океана, значениями Chl-a, превышающими 8–10 мг/м³ (рис. 1, б), типичными для этих районов в сентябре–октябре [11]. Пространственное распределение Chl-a содержит спиральные структуры, отражающие высокую вихревую активность в рассматриваемой области [1].

Композитное изображение также показывает цветение воды в прибрежных районах, которое придает морской поверхности глубокий темно-зеленый оттенок (рис. 1, а) из-за выраженных спектральных различий. На рис. 1 дополнительно показаны спектры коэффициента яркости моря ($Rrs(\lambda)$), полученные по результатам измерений Sentinel-2В. Красным цветом обозначен спектр (1), соответствующий темно-зеленой области на изображении, где концентрации хлорофилла-а максимальны. Синим цветом отмечен спектр (2) из темно-синей области

изображения. Различия в значениях $Rrs(\lambda)$ могут быть обусловлены как увеличенной концентрацией фитопланктона для случая 1, что приводит к уменьшению значений $Rrs(\lambda = 443 \text{ нм})$ и $Rrs(\lambda = 490 \text{ нм})$ [12], так и различиями в видовом составе водорослей. Второй фактор меняет соотношения Rrs на разных длинах волн и может привести к большим значениям $Rrs(\lambda = 560 \text{ нм})$ для спектра (1) по сравнению со спектром (2) [13].

На снимке выделяются скопления водорослей, организованные в сложные системы мезомасштабных и субмезомасштабных взаимодействующих вихревых структур. Непосредственно у берега (Халактырский пляж) 26 сентября наблюдался развитый антициклонический вихрь диаметром около 40–50 км с повышенной концентрацией пигмента – в центре вихря оценки Chl-a со спутника Sentinel-3В показали 17–20 мг/м³.

■ Изменчивость температуры поверхности океана

Отметим некоторые особенности изменчивости температуры поверхности океана (ТПО) вокруг Камчатки как одного из факторов, способного отчасти влиять на распространение и интенсивность вредоносного цветения некоторых видов водорослей [9]. На рис. 2, б показано отклонение среднемесяч-

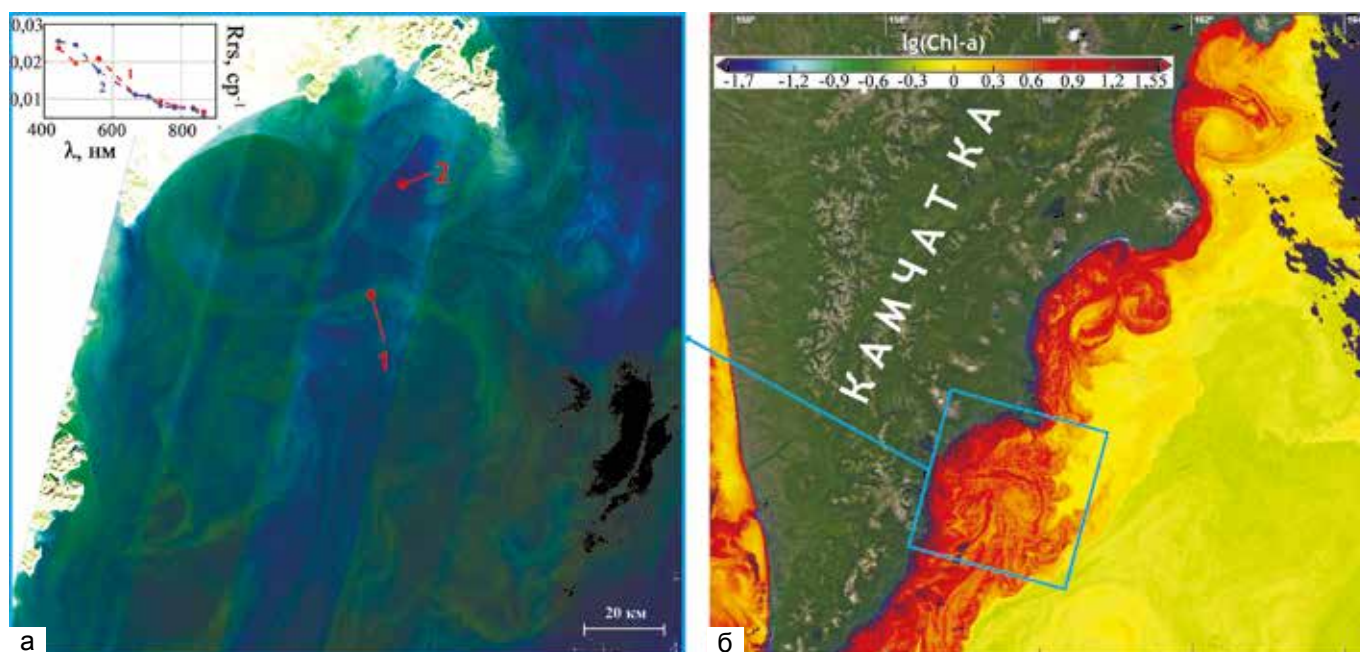


Рис. 1. Видимое изображение акватории Авачинского залива со спектрами яркости в двух точках (1, 2), полученное в 01:50 UTC 26 сентября 2020 г. со спутника Sentinel-2В. Данные уровня L1C были взяты из архива [8]; атмосферная коррекция выполнена с использованием алгоритма ACOLITE 20190326.0 [9] (а); концентрация хлорофилла-а (Chl-a, мг/м³) у юго-восточного побережья Камчатки, полученная 26 сентября 2020 г. со спутника Sentinel-3В. Изображение взято с портала Globcurrent [10] (б); шкала является логарифмической – $\lg(\text{Chl-a})$

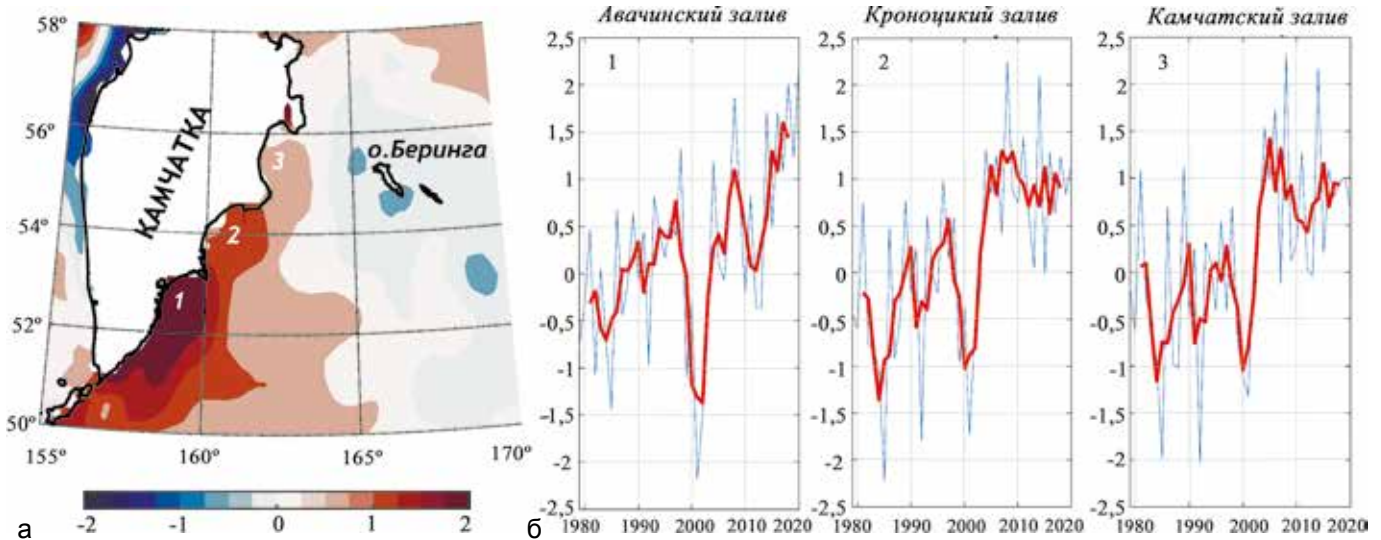


Рис. 2. Отклонение среднемесячной температуры поверхности океана (ТПО, °С) в сентябре 2020 г. от нормы 1981–2010 гг (а); аномалии ТПО в сентябре (отклонение от нормы 1981–2010 гг.) с 1979 по 2020 г. в Авачинском (1), Кроноцком (2) и Камчатском (3) заливах (б); аномалии нормированы на среднеквадратичное отклонение; красная линия: 5-летнее скользящее среднее

ной ТПО в сентябре 2020 г. относительно климатической нормы за 30 лет (1981–2010 гг.). Поля ТПО взяты из реанализа ERA5 в узлах регулярной сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [15, 16]. Авачинский залив и прилегающие с юга тихоокеанские воды демонстрируют повышенные значения ТПО, создавая более теплые локальные условия, в которых развивалось осеннее цветение водорослей.

Межгодовая изменчивость аномалии ТПО (нормированной на среднеквадратичное отклонение σ) в сентябре с 1979 по 2020 г. показала, что в Авачинском, Кроноцком и Камчатском заливах наблюдается статистически значимый положительный линейный тренд ($p < 0,01$). Причем для Авачинского залива (52–53,25 с.ш., 158–160 в.д.) ТПО в сентябре 2020 г. была максимальной (12,0°C) за последние 42 года и отклонялась от климатической нормы (10,4°C) более чем на 2σ . Вместе с тем в течение 2010-х ТПО в Авачинском заливе устойчиво растет; более северные заливы (Кроноцкий и Камчатский) такой тенденции не проявляют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрированы возможности спутников Sentinel-2 и Sentinel-3 для оперативного мониторинга цветения водорослей в акваториях у юго-восточного побережья Камчатки со сложной мезомасштабной и субмезомасштабной циркуляцией вод. В сентябре 2020 г. изменчивость ТПО акватории Авачинского залива, взятая из усовершенствованного реанализа ERA5, показала положительную анома-

лию с максимумом (12,0°C) за последние 42 года при климатической норме 10,4°C. Мы допускаем, что при сохранении тенденции роста в ближайшие годы этот максимум будет превышен.

Важно понимать, что повышение ТПО – лишь один из факторов, способных влиять на интенсивность вредоносного цветения водорослей. Необходимы комплексные исследования гидрометеорологических условий возникновения и распространения цветения микроводорослей в заливах Камчатки, которые могут послужить основой развития региональных программ оперативного мониторинга прибрежных акваторий.

Невозможно определить, вредно ли цветение микроводорослей, опираясь только на спутниковые измерения. Для оптимальной оценки рисков в прибрежных акваториях необходим сбалансированный и междисциплинарный подход, обеспечивающий оперативное прогнозирование по данным дистанционного зондирования, отбор проб “на месте” и моделирование распространения.



ЛИТЕРАТУРА

1. Булатов Н.В., Лобанов В.Б. Исследование мезомасштабных вихрей восточнее Курильских островов по данным метеорологических спутников Земли // Исследование Земли из космоса. 1983. № 3. С. 40–47.
2. Васильева А. «Увы, мы ничего понять не можем». – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4519291> (дата обращения: 06.11.2020 г.).
3. Коновалова Г.В. Динофлагелляты (Dinophyta) дальневосточных морей России и сопредельных акваторий Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 1998. 300 с.
4. Кравцова И. «Они создавали эту планету. Они могут убить человека». Беседа с руководителем лаборатории морской микробиоты «Национального научного центра морской биологии» во Владивостоке Татьяной Орловой. – URL: <https://meduza.io/feature/2020/10/13/oni-sozdavali-etu-planetu-oni-mogut-ubit-cheloveka> (дата обращения: 06.11.2020 г.).
5. Vershinin A.O., Orlova T.Y. Toxic and harmful algae in the coastal waters of Russia // *Oceanology*. 2008. Vol. 48. P. 524–537.
6. Caballero I., Fernández R., Escalante O.M. et al. New capabilities of Sentinel-2A/B satellites combined with in situ data for monitoring small harmful algal blooms in complex coastal waters // *Sci Rep*. 2020. Vol. 10, No. 8743.
7. Rodríguez-Benito C.V., Navarro G., Caballero I. Using Copernicus Sentinel-2 and Sentinel-3 data to monitor harmful algal blooms in Southern Chile during the COVID-19 lockdown // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 161. P. 111–722.
8. Sentinels Scientific Data Hub. – URL: <https://scihub.copernicus.eu/> (дата обращения: 06.09.2020 г.).
9. The Remote Sensing and Ecosystem Modelling team. – URL: <https://odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite> (дата обращения: 06.09.2020 г.).
10. European Space Agency GlobCurrent portal. – URL: <https://globcurrent.oceandatalab.com> (дата обращения: 04.10.2020 г.).
11. Sasaoka K. et al. Temporal and spatial variability of chlorophyll-a in the western subarctic Pacific determined from satellite and ship observations from 1997 to 1999 // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2002. Vol. 49, Iss. 24–25. P. 5557–5576.
12. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100 (C7). P. 1321–1332.
13. Churilova T., Suslin V., Sosik H., Efimova T., Moiseeva N., Moncheva S., Krivenko O. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52, Iss. 1. P. 123–136.
14. Gobler C.J. et al. Ocean warming since 1982 has expanded the niche of toxic algal blooms in the North Atlantic and North Pacific oceans // *Proceedings Natl Acad. Sci. USA*. 2017. Vol. 114. P. 4975–4980.
15. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, Iss. 730. P. 1999–2049.
16. The Climate Data Store. – URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения: 11.10.2020 г.).

