

Особенности распределения концентрации хлорофилла *a* у восточного побережья Камчатки осенью 2020 года по спутниковым данным

Ж. Р. Цхай¹, Г. В. Шевченко^{1,2}

¹ Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, 693023, Россия
E-mail: tshay@yandex.ru

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Южно-Сахалинск, 693022, Россия

Анализ многолетних данных (2002–2020), полученных со спектрорадиометра MODIS, показал, что сезонное увеличение концентрации хлорофилла *a* у юго-восточного побережья п-ова Камчатка в сентябре–октябре является типичным для этого района. Однако развитие фитопланктона на данной акватории в конце сентября–начале октября 2020 г. было весьма активным, содержание пигмента в несколько раз превышало средние многолетние показатели, в том числе в Авачинском и Кроноцком заливах. Высокие концентрации вещества отмечены не только в прибрежных участках с интенсивным речным стоком, но также в районах шельфа и материкового склона на удалении от берега до 100 км. Вероятной причиной этого явления стало поступление биогенных элементов из более глубоких слоёв в результате ветроволнового перемешивания, обусловленного прохождением над изучаемым районом трёх глубоких циклонов в период с 19 сентября по 7 октября 2020 г. При оценке термических условий было установлено, что в осенний период 2020 г. у берегов Камчатки наблюдались значительные положительные аномалии температуры воды. Тем не менее высокие концентрации хлорофилла *a* в этом районе фиксировались неоднократно, например в октябре 2018 и 2019 гг. при нормальных температурных условиях. Таким образом, осенью корреляция между вариациями температуры воды и содержанием пигмента в Авачинском и Кроноцком заливах выражена слабо. Во временной функции первой моды разложения по ЕОФ определены два сезонных пика активной фотосинтетической деятельности — в мае и октябре. С 2016 г. осеннее размножение фитопланктона обильнее весеннего. В пространственном распределении первой моды выделены прибрежные области и обширная зона вдоль края шельфа в районе Авачинского залива, второй моды — приустьевые участки в Камчатском заливе.

Ключевые слова: фитопланктон, «красные приливы», температура поверхности океана, метод естественных ортогональных функций, северо-западная часть Тихого океана

Одобрена к печати: 11.02.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-226-238

Введение

Большой общественный резонанс, вызванный случаями массовых выбросов гидробионтов в Авачинском заливе в сентябре–октябре 2020 г., причиной которых некоторые авторы считали активное размножение токсичных микроводосролей рода *Karenia* (<https://www.interfax.ru/russia/730785>, https://lenta.ru/news/2020/12/18/reason_kamchatka), побудил нас провести исследование особенностей пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* у восточного побережья п-ова Камчатка. Сведения о явлении «красных приливов» в дальневосточных морях, и у берегов Камчатки в частности, достаточно широко представлены в научной литературе (Коновалова, 1992; Лепская и др., 2017; Могильникова и др., 2007; Konovalova, 1999). Токсичные виды фитопланктона, в том числе рода *Karenia*, содержат пигмент хлорофилл *a* (Gabrielsen et al., 2011).

Анализ вариаций концентрации хлорофилла *a* представляет существенный научный интерес с точки зрения оценки первичной продукции и имеет значимый прикладной аспект, учитывая большое рыбопромысловое значение дальневосточных морей. При этом он может быть полезен и для определения условий, способствующих развитию токсичных водо-

рослей. Особенности пространственно-временной изменчивости содержания пигмента в поверхностном слое Охотского моря по спутниковым данным подробно изучены в работе Ж. Р. Цхай (2017), однако юго-восточный шельф п-ова Камчатка в указанной работе не рассматривался. Ещё одним стимулом к проведению настоящего исследования был тот факт, что в недавних публикациях (Бондур и др., 2021; Пичугин и др., 2020) были выявлены аномально высокие показатели данного параметра в конце сентября 2020 г., когда и сформировалась экстремальная ситуация в Авачинском заливе.

В Сахалинском филиале Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО) накоплен ряд данных о концентрации хлорофилла *a* в Охотском море и прилегающих акваториях (включая шельф и материковый склон у юго-восточного побережья Камчатки). На основе доступных спутниковых данных были построены декадные пространственные распределения данного параметра (представлены на сайте филиала www.sakhniro.ru). Как правило, осеннее массовое развитие микроводорослей в Охотском море и прилегающих акваториях начинается в конце сентября – начале октября (Цхай, 2017), что объясняется сезонным разрушением термоклина, препятствующего летом поступлению биогенов в поверхностный фотический слой с глубины (Матвеев, 2006). Аналогичную картину можно было ожидать и в этом районе. Для прибрежных акваторий важную роль играет также речной сток, усиливающийся в результате осеннего паводка. Прежде всего это относится к р. Камчатке — крупнейшей водной артерии полуострова.

Целью настоящей работы было определить особенности распределения концентрации хлорофилла *a* осенью 2020 г. в сравнении с условиями предшествующих лет и в целом исследовать пространственно-временную изменчивость содержания пигмента на акватории юго-восточного шельфа п-ова Камчатка, используя при этом дистанционные наблюдения.

Материалы и методы

В настоящей работе рассматривались данные концентрации хлорофилла *a* со спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за период с июля 2002 г. по декабрь 2020 г., обработанные на сервере Ocean Color Processing Group (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) в районе с координатами 152–163° в.д., 48–60° с.ш. Спутниковые данные сканера MODIS показали для различных районов Охотского моря и прилегающих акваторий достаточно близкие оценки концентрации хлорофилла *a* в сравнении с измерениями *in situ*, в том числе и у юго-восточного побережья п-ова Камчатка в осенний период (Цхай, Хен, 2016). В *таблице* показаны результаты сравнения средних концентраций хлорофилла *a*, полученных по спутниковым и судовым данным, в районах Охотского моря и прилегающих акваторий севернее 50° с.ш. в осенний период. В качестве данных *in situ* были использованы результаты измерений в экспедициях Тихоокеанского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО) на научно-исследовательском судне (НИС) «Профессор Кагановский» с 2004 по 2009 г. и Сахалинского филиала (СахНИРО) на НИС «Дмитрий Песков» в 2010 г.

Определение содержания пигмента по спутниковым данным при высоких концентрациях требует использования региональной коррекции (Копелевич и др., 2006; Салюк и др., 2013) или разработки специальной модели (Wang et al., 2017), для чего мы не располагали необходимой дополнительной информацией. Однако абсолютные значения концентрации хлорофилла *a* не имели в данном случае принципиального значения, важен был факт качественных изменений рассматриваемого параметра. Для пространственно-временного анализа информации методом естественных ортогональных функций (ЕОФ) (Багров, 1959) была сформирована матрица с декадной дискретностью размером 666×229×397. Численная реализация метода ЕОФ осуществлялась с помощью программного обеспечения системы TeraScan® (<http://www.seaspace.com>).

Для изучения термических условий на акватории юго-восточного шельфа п-ова Камчатка были использованы данные по температуре поверхности океана (ТПО), полученные со

спутников Aqua и серии NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США) приёмной станцией TeraScan®, установленной непосредственно в СахНИРО. В ходе работы были рассчитаны среднемноголетние декадные значения (нормы) и соответствующие температурные аномалии для каждого года.

Результаты сравнения концентрации хлорофилла *a* (мг/м³) по спутниковым и судовым данным в северных районах Охотского моря и прилегающей акватории осенью

Период	Количество точек		Среднее значение		Стандартное отклонение		Значение критерия Стьюдента
	<i>In situ</i>	MODIS	<i>In situ</i>	MODIS	<i>In situ</i>	MODIS	
<i>Северная часть Охотского моря</i>							
4—20 ноября 2006 г.	43	21	0,84	0,86	0,36	0,82	0,11
<i>Северо-западная часть Охотского моря</i>							
13—29 сентября 2004 г.	52	443	1,05	1,1	0,72	0,97	0,45
7—19 ноября 2008 г.	25	36	0,79	0,79	0,4	0,38	0
<i>Западное побережье п-ова Камчатка</i>							
4—11 декабря 2007 г.	30	32	0,74	0,75	0,12	0,67	0,08
<i>Юго-западное побережье Камчатки и Северные Курилы</i>							
13—25 октября 2009 г.	20	49	2,27	1,85	1,46	2,46	0,88
<i>Северо-восточное побережье о. Сахалин</i>							
28 октября—9 ноября 2010 г.	35	57	0,56	0,61	0,14	0,38	0,80

При оценке циклонической активности в регионе были проанализированы карты распределения приземного атмосферного давления в северо-западной части Тихого океана, представленные на сайте <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access> (дата обращения 02.05.2021).

Результаты и обсуждение

Особенности распределения концентрации хлорофилла *a* осенью 2020 г.

Анализ декадных распределений показал, что в первых двух декадах сентября 2020 г. в Авачинском заливе средняя концентрация хлорофилла *a* не превышала 2,7 мг/м³, в Кроноцком заливе — 3,7 мг/м³, а в третьей декаде увеличилась до 9,2 и 5,2 мг/м³ соответственно. За период с 2002 по 2019 г. среднее содержание пигмента в конце сентября в Авачинском заливе составило 3,2 мг/м³ с максимумом в 2013 г. (6,4 мг/м³), а в Кроноцком заливе — 2,9 мг/м³ с максимумом также в 2013 г. (6,3 мг/м³). Высокие концентрации вещества отмечались в зоне шельфа по сравнению с более глубоководными акваториями (рис. 1а, см. с. 229). Отдельный интерес представляет вихревая структура необычно крупных размеров в районе южной оконечности п-ова Камчатка — о. Парамушир, но в данной работе она не рассматривается, антициклонические вихри в этом районе на основе спутниковой информации анализировались в статье Г. В. Шевченко с соавторами (2009).

Ещё более высокое содержание хлорофилла *a* было зафиксировано в первой декаде октября 2020 г. (рис. 2а, см. с. 229). В Авачинском заливе средняя концентрация вещества увеличилась до 12,9 мг/м³, а в Кроноцком заливе — до 8,4 мг/м³. В предыдущие годы она не поднималась выше 7,1 мг/м³ (2016) в Авачинском заливе и 6,7 мг/м³ в Кроноцком заливе. К югу от Авачинского залива зона массового размножения микроводорослей была наиболее широкой и превышала 100 км (см. рис. 2а). Среднее многолетнее распределение вещества в этот период характеризовалось повышенными концентрациями как в прибрежной зоне, особенно

в местах впадения рек, так и на шельфе (рис. 2б). В целом расположение зон «цветения» воды в конце сентября – начале октября 2020 г. было типичным для этого района, но концентрация хлорофилла *a* была в несколько раз выше, чем среднееголетние показатели.

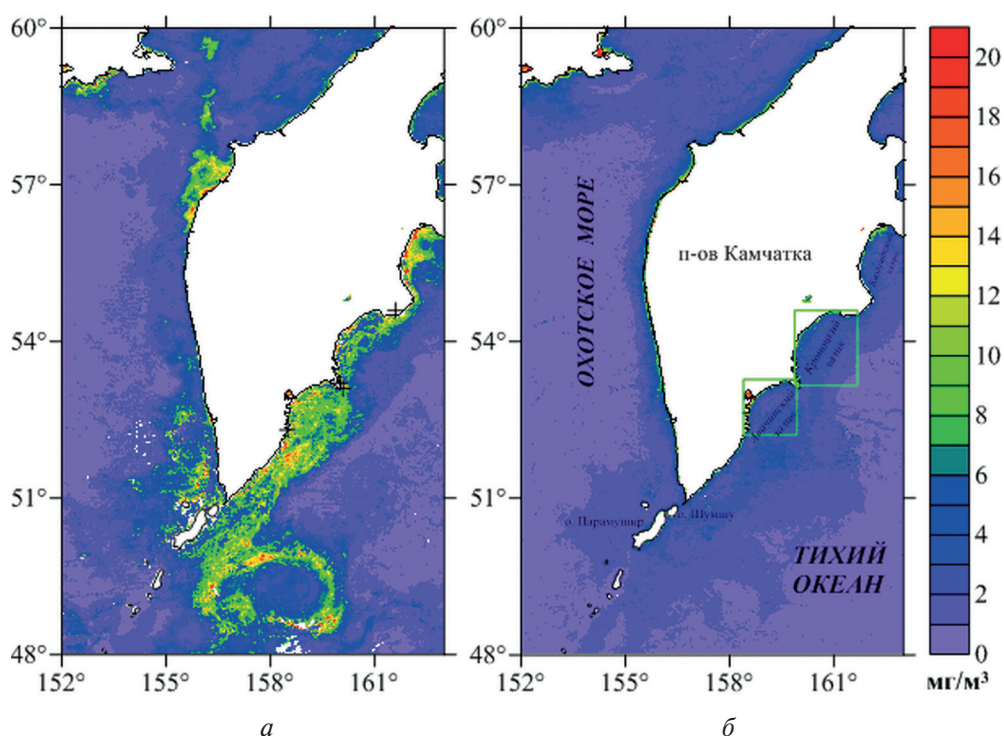


Рис. 1. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* у побережья п-ова Камчатка в третьей декаде сентября 2020 г. (а) и осреднённое за 2002–2019 гг. (б) (с выделенными районами исследований в Авачинском и Кроноцком заливах)

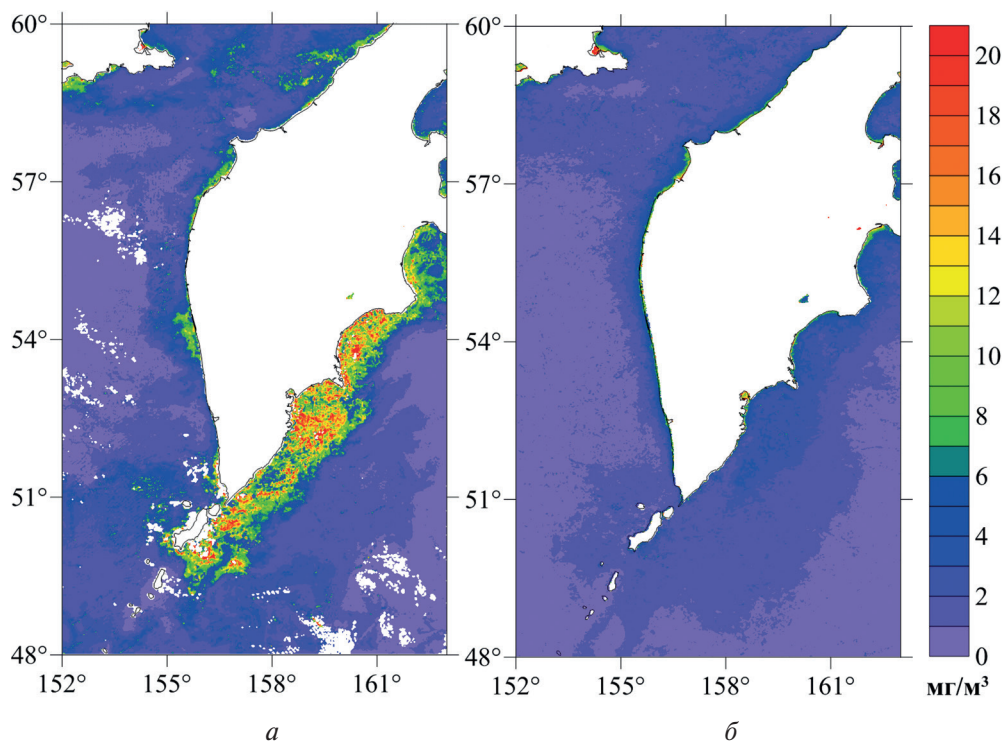


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* у побережья п-ова Камчатка в первой декаде октября 2020 г. (а) и осреднённое за 2002–2019 гг. (б)

В течение двух следующих декад сформировавшаяся зона интенсивного развития фитопланктона медленно смещалась вдоль берега Камчатки в юго-западном направлении (рис. 3). Сначала уменьшилось содержание пигмента в Камчатском, затем в Кроноцком, а к концу октября — и в Авачинском заливе.

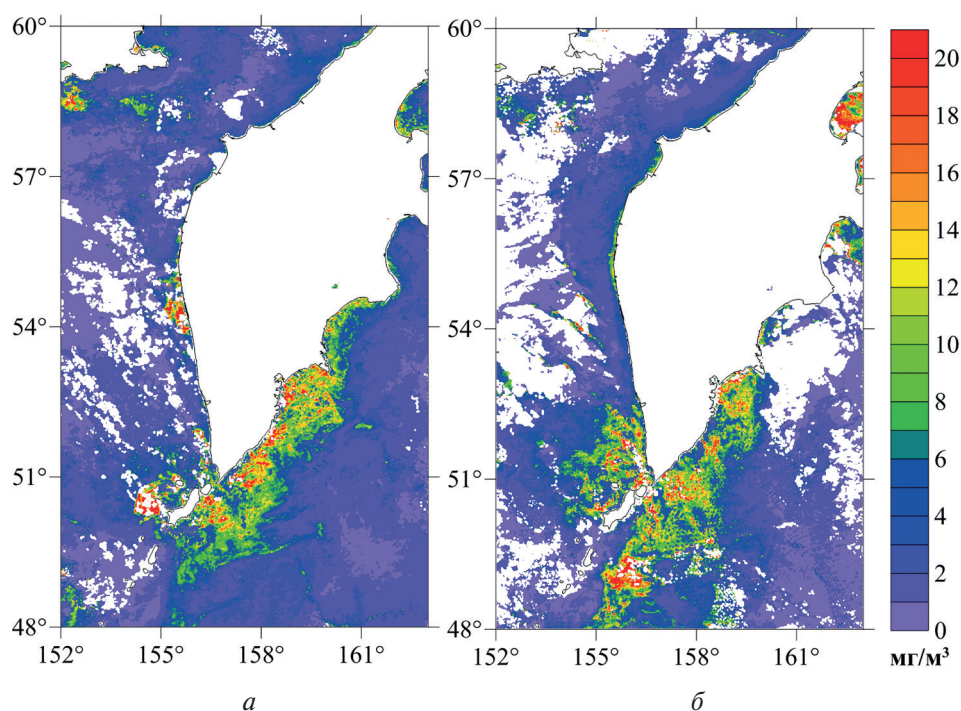


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* у побережья п-ова Камчатка во второй (а) и третьей (б) декадах октября 2020 г.

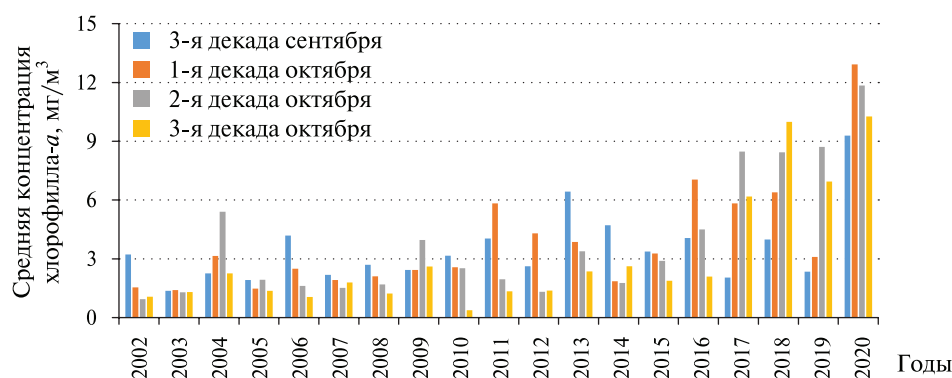


Рис. 4. Средняя концентрация хлорофилла *a* в Авачинском заливе в сентябре — октябре

Средние многолетние распределения концентрации хлорофилла *a* показывают, что такое обильное развитие микроводорослей в осенний период 2020 г. в целом нехарактерно для юго-восточного шельфа п-ова Камчатка. Тем не менее в последние годы подобные ситуации участились: в Авачинском заливе содержание вещества во второй декаде октября 2017–2019 гг. составило более 8 мг/м³ (рис. 4). Вопрос о причинах такой активизации фотосинтетической деятельности в изучаемом районе весьма сложен. Очевидно, что влияния речного стока для этого недостаточно, он локализован в прибрежных участках камчатских заливов и обусловить массовое развитие фитопланктона на обширной акватории шельфа не мог. Возможной причиной могли быть богатые биогенными элементами воды Камчатского течения. Однако характер «цветения» воды указывает на малую вероятность воздействия данного фактора, так

как оно началось прежде всего в Авачинском и Кроноцком заливах, а не вблизи Камчатского пролива.

В работе В. Г. Бондура с соавторами (2021) установлено, что в июле—сентябре 2020 г. в исследуемом районе наблюдались значительные положительные аномалии температуры воды (в сравнении со средними значениями с 1981 по 2020 г.), которые могли стать причиной «существенного изменения биогенного режима и аномального роста концентрации хлорофилла-а». На *рис. 5* видно, что в третьей декаде сентября—первой декаде октября у восточного побережья п-ова Камчатка отмечались преимущественно положительные аномалии ТПО. У юго-восточной оконечности полуострова температура воды была на 2–5 °C выше нормы.

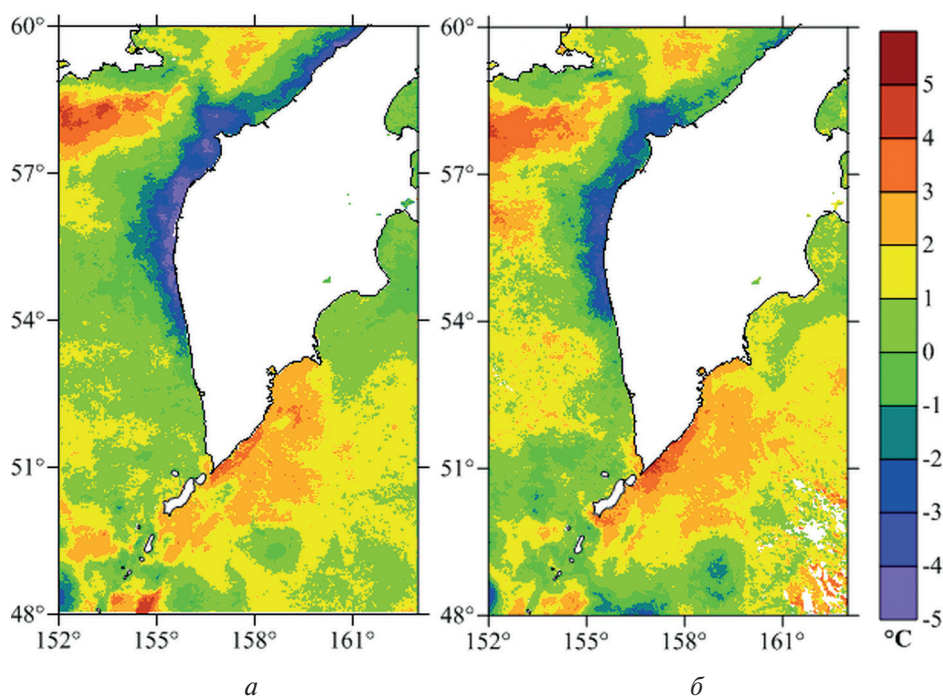


Рис. 5. Распределение аномалии температуры поверхности моря (°C) у побережья п-ова Камчатка в третьей декаде сентября (а) и первой декаде октября (б) 2020 г.

Динамика годового хода температуры воды в Авачинском заливе показала, что практически весь 2020 г. температура воды на изучаемой акватории была выше нормы (*рис. 6*, см. с. 232). Существенные положительные аномалии в пределах двукратной величины среднеквадратичного отклонения σ отмечались в марте—апреле 2020 г., когда σ располагалась в диапазоне 0,6–0,8 °C. В первой декаде апреля аномалия была выше 2 °C, что в три раза превышало величину σ . В летние месяцы положительные аномалии ТПО находились в границах среднеквадратичного отклонения. В течение сентября—октября аномалии колебались в пределах 2 °C, что составляло от 1,5 до 2σ .

Таким образом, осенью 2020 г. у побережья Камчатки действительно наблюдались значительные положительные аномалии ТПО, но они не были экстремально критичными. В последние двадцать лет подобная величина аномалий (~ 2 °C) в Авачинском заливе фиксировалась неоднократно. В сентябре 2018 г. средняя декадная температура воды в Авачинском заливе изменялась в тех же диапазонах, что в 2020 г. (+11...+13 °C), однако средняя концентрация хлорофилла *a* варьировалась в пределах 2–4 мг/м³. Обильное развитие фитопланктона отмечалось во второй—третьей декадах октября 2018 г. (см. *рис. 4*), когда ТПО снизилась до +8...+9 °C. Во второй декаде октября 2019 г. содержание вещества в заливе было выше 8 мг/м³ при температуре воды +6 °C. В целом коэффициенты корреляции между декадными концентрацией пигмента и температурой воды в сентябре—октябре в Авачинском и Кроноцком заливах составили –0,09 и –0,19 соответственно.

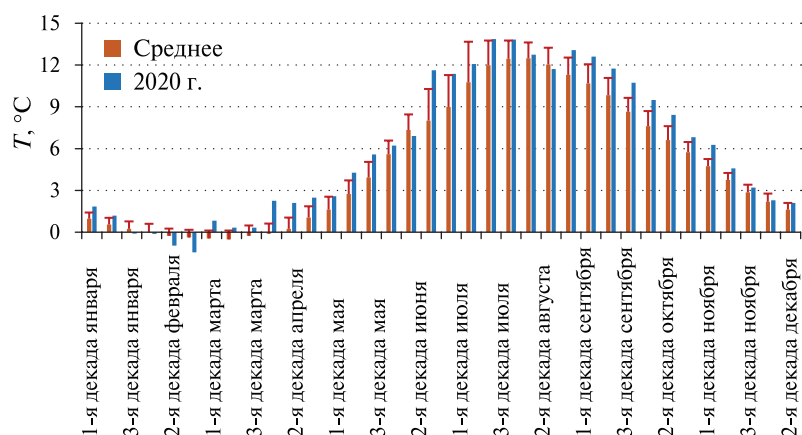


Рис. 6. Динамика декадной температуры воды (°C) в Авачинской заливе в 2020 г. в сравнении со средними многолетними значениями

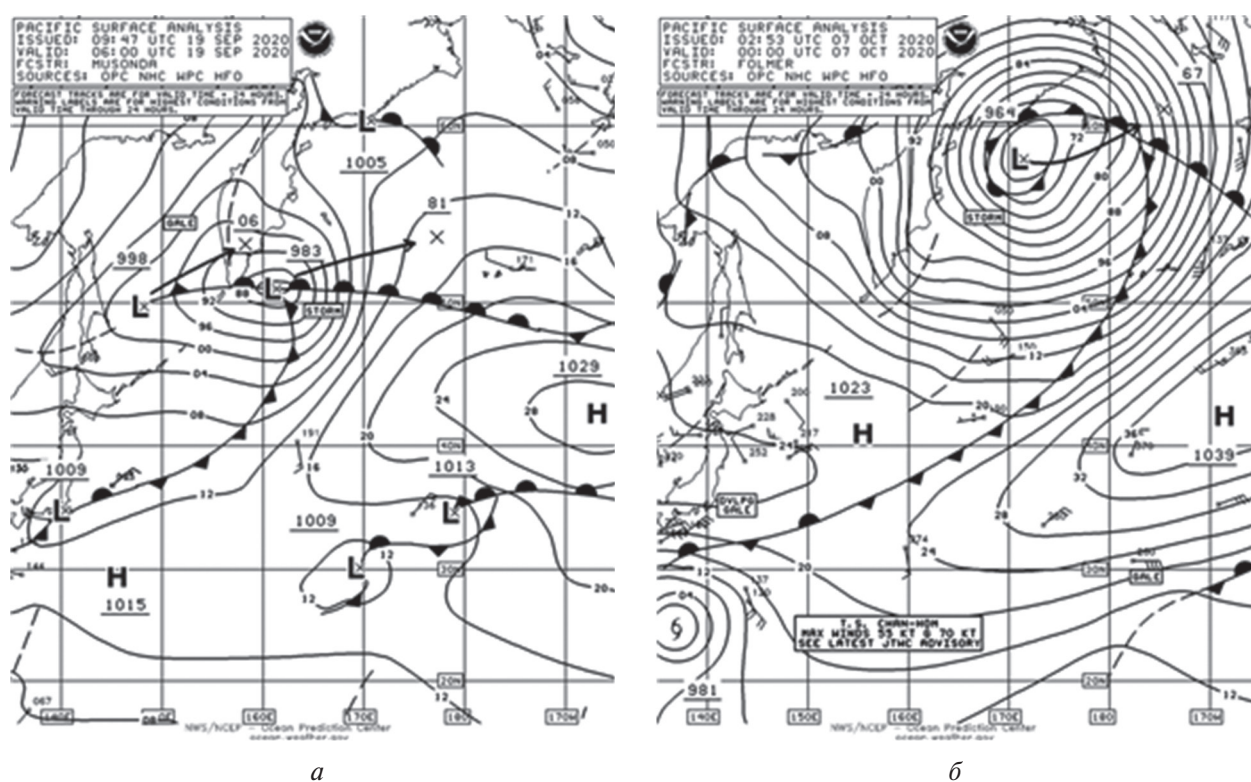


Рис. 7. Карты приземного атмосферного давления за 19 сентября (а) и 7 октября (б) 2020 г. (по данным <https://www.ncdc.noaa.gov>)

Ещё одной вероятной причиной наблюдаемого явления могло быть интенсивное ветроволновое перемешивание вод на восточном шельфе п-ова Камчатка, вызванное прохождением глубоких циклонов. Из проанализированных карт приземного атмосферного давления в северо-западной части Тихого океана следует, что в сентябре – октябре 2020 г. вдоль восточного побережья Камчатки прошло несколько глубоких циклонов, сопровождавшихся штормовыми ветрами (рис. 7, см. с. 232). Первый из них (давление в центре — 983 гПа) вышел к южной оконечности полуострова 19 сентября и проходил над изучаемым районом более суток, второй — 28–29 сентября (986 гПа) и наиболее глубокий — 6–7 октября (964 гПа).

Возрастание концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое в северо-западной части Тихого океана при прохождении масштабных атмосферных возмущений отмечены ранее в ряде работ (Пермяков и др., 2005; Салюк и др., 2014). Авторы связывали видимое со спутни-

ка увеличение концентрации с ростом количества клеток фитопланктона за счёт поступления биогенных веществ в верхние слои океана. Вторая возможная причина — подъём микроводорослей из района термоклина в результате ветроволнового перемешивания — представлялась им менее вероятной из-за того, что повышение содержания пигмента наступало не одновременно с прохождением циклона, а с некоторым запаздыванием. Эта точка зрения хорошо согласуется с процессами, наблюдаемыми на восточном шельфе п-ова Камчатка в октябре 2020 г., когда активные процессы развития планктонных водорослей продолжались в течение определённого времени (около декады) после ухода атмосферного возмущения, смещаясь в юго-восточном направлении под действием Камчатского течения.

Если вернуться к ситуации высоких концентраций пигмента, имевшей место в третьей декаде октября 2018 г., то область «цветения» возникла после выхода 19 октября в этот район глубокого циклона (давление в центре — 985 гПа).

Таким образом, как и в районах Охотского моря, повышение концентрации хлорофилла *a* осенью в большей степени зависит не от температуры воды, а от скорости восстановления запаса биогенных элементов (Матвеев, 2006; Цхай, 2017), в том числе и вследствие интенсивного ветроволнового перемешивания вод после прохождения глубоких циклонов.

Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла *a*

Рассмотрим теперь характеристики первых двух мод разложения пространственно-временных вариаций концентрации хлорофилла *a* по методу ЕОФ (рис. 8, см. с. 234). Временная функция первой моды (рис. 8а) принимает близкие к нулю значения в зимние месяцы и высокие — в тёплый период года с двумя сезонными максимумами: в мае и октябре. С 2003 по 2012 г. включительно интенсивность весеннего «цветения» в несколько раз превышала осеннее. Начиная с 2013 г. величина максимумов выровнялась, а с 2016 г. осенний максимум стал доминирующим.

Пространственный вектор первой моды (на неё приходится 38 % общей дисперсии изучаемого параметра, все значения положительные) характеризует в целом картину среднего многолетнего распределения концентрации пигмента в периоды активного размножения фитопланктона (см. рис. 1 и 8б). Зоны «цветения» воды охватывают шельфовую зону, в мористой части при удалении от берега содержание пигмента падает до уровня фоновых значений (менее 1 мг/м³). Высокие концентрации вещества наблюдаются во всех камчатских заливах, особенно выделяется узкая прибрежная полоса в районах речного стока (например, в устье р. Камчатки в Камчатском заливе), а также в шельфовой зоне напротив Авачинского залива, вытянутой в юго-восточном направлении. В районе Кроноцкого залива аналогичная область выражена слабее.

Временная функция второй моды (см. рис. 8а), на которую приходится около 5 % общей дисперсии, хотя и менее устойчива, чем первая, также имеет явно выраженный сезонный характер. Как правило, она принимает максимальные положительные значения в мае, обеспечивая добавку к первой моде в период весеннего развития микроводорослей. В большинстве случаев этот максимум больше 1 мг/м³ (в 2012 г. он превысил 14 мг/м³), однако весной 2011 и 2014 гг. он был близок к нулю. При сопоставлении в пространственном распределении выделяется зона Камчатского течения на некотором отдалении от Авачинского и Кроноцкого заливов.

В летне-осенний период временная функция второй моды принимает отрицательные значения. Годовой минимум достигался в широком временном диапазоне от июля до октября. В пространственном распределении здесь локализована узкая прибрежная полоса с приустьевыми участками рек, и с большой степенью вероятности надбавка в летне-осенний период связана с величиной, зависящей от интенсивности речного стока. Наиболее сильно это влияние прослеживается в районе устья р. Камчатки — крупнейшего водотока полуострова. Следует обратить внимание, что в последние пять лет годовой минимум сместился на конец

сентября – октябрь. Наибольшие отрицательные значения второй моды за весь период наблюдений отмечались в третьей декаде сентября и первой декаде октября 2020 г., что подтверждает факт экстремальной ситуации в развитии фитопланктона осенью этого года.

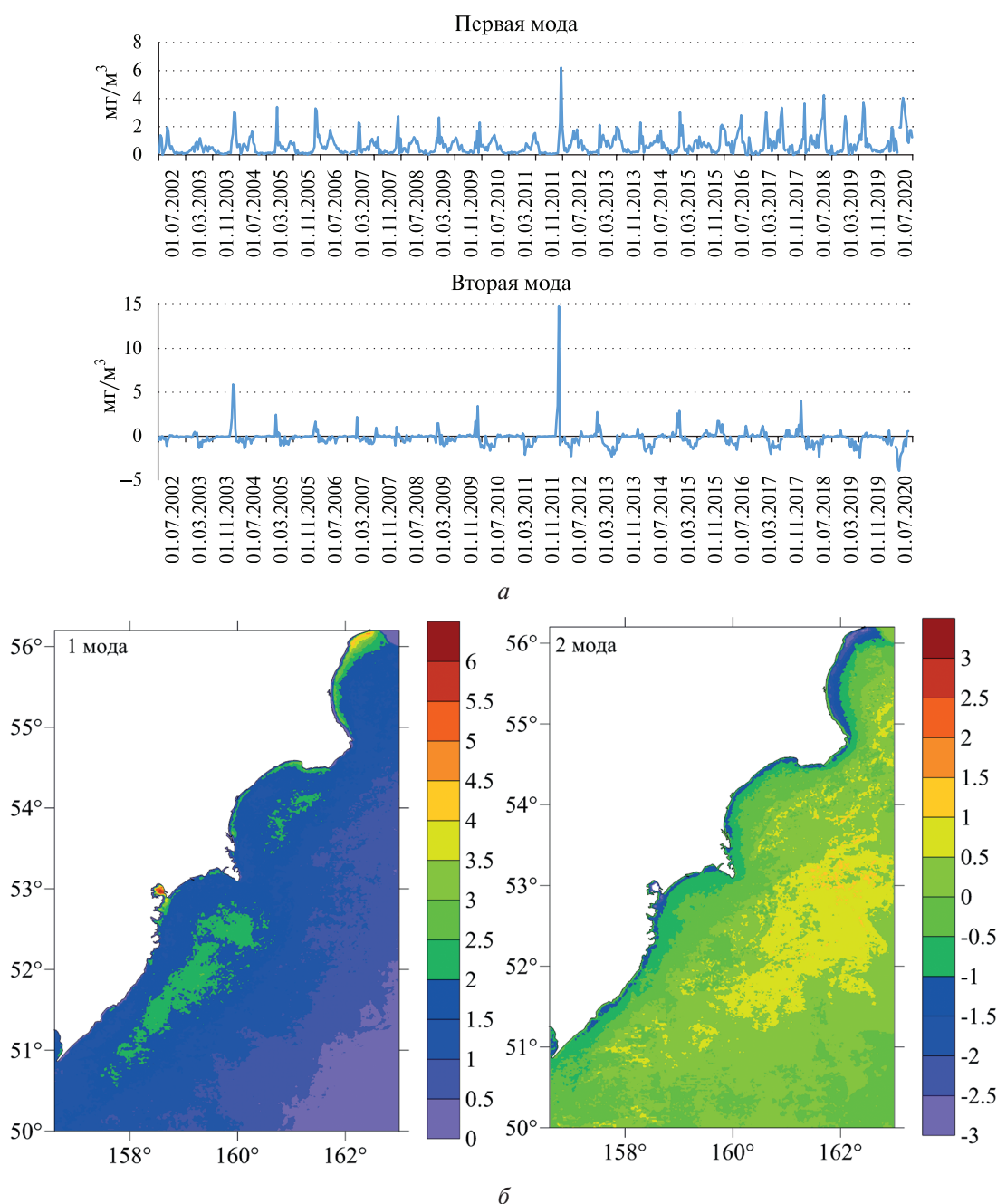


Рис. 8. Результаты разложения полей декадной концентрации хлорофилла *a* по ЕОФ: *a* — временные функции первых двух мод; *б* — соответствующие пространственные распределения

Такого рода смещение ранее отмечалось в некоторых районах Охотского моря (Цхай, 2017). Причина возрастания интенсивности «цветения» воды у восточного побережья Камчатки в конце сентября – октябре в последние годы связана, скорее всего, с изменениями в характере перемещения циклонов в Дальневосточном регионе, отмеченными в работах С. Ю. Глебовой (2017, 2018). В результате анализа траекторий было определено, что вследствие перестройки крупномасштабного поля приземного атмосферного давления глубокие циклоны стали чаще проходить над районом Курильской гряды и реже выходить непосредственно

на акваторию Берингова моря. Косвенно такое изменение характера движения атмосферных возмущений подтверждается выявленным в работе Г. В. Шевченко с соавторами (2017) резким усилением штормовой активности на южных Курильских островах по сравнению с почти полувековым спокойным периодом.

Заключение

В результате проведённого анализа декадных распределений концентрации хлорофилла *a* по спутниковым данным за 2003–2020 гг. выявлено, что развитие фитопланктона у восточного побережья Камчатки в течение месяца (третья декада сентября – вторая декада октября 2020 г.) было весьма активным, значения данного параметра в несколько раз превышали средние многолетние показатели. «Цветением» воды была охвачена не только прибрежная зона, что наблюдается в данном районе достаточно часто и обусловлено речным стоком, но также районы шельфа и материкового склона на удалении от берега до 100 км. Вероятной причиной этого явления было поступление биогенных элементов из более глубоких слоёв в результате ветроволнового перемешивания вследствие прохождения над изучаемым районом трёх глубоких циклонов в период с 19 сентября по 7 октября 2020 г. Выдвинутое В. Г. Бондуром с коллегами (2021) предположение, что повышенный фон температуры привёл к изменению биогенного режима и аномальному росту концентрации хлорофилла *a*, представляется справедливым лишь частично, так как влияние термических условий в осенний период сказывается на развитии фитопланктона только в сочетании с механизмом увеличения содержания биогенов в поверхностном фотическом слое.

По результатам исследования пространственно-временных вариаций содержания пигмента в поверхностном слое отмечено, что после 2012 г. осеннее размножение микроводорослей стало более интенсивным, вероятной причиной чего могло оказаться изменение траекторий глубоких осенних циклонов, которые стали чаще проходить над Курило-Камчатским глубоководным жёлобом (Глебова, 2017, 2018). Высокие концентрации хлорофилла *a* на юго-восточном шельфе Камчатки осенью 2020 г. не выглядят экстраординарным событием, близкие по масштабу явления случались здесь несколько раз в последние годы, например в октябре 2018 и 2019 гг., причём при обычных температурных условиях. В целом корреляции между вариациями ТПО и содержанием пигмента в Авачинском и Кроноцком заливах была выражена слабо.

Во временной функции первой моды разложения по ЕОФ определяются два сезонных пика активной фотосинтетической деятельности — в мае и октябре. С 2016 г. интенсивность осеннего развития фитопланктона выше весеннего. В пространственном распределении первой моды выделяются прибрежные области камчатских заливов и обширная зона вдоль края шельфа в районе Авачинского залива, второй моды — приустьевые участки в Камчатском заливе.

Выполненный анализ не имел прямого отношения к условиям массового развития токсичных водорослей на восточном шельфе п-ова Камчатка, хотя выявленная причина повышения содержания пигмента могла способствовать и их активному развитию. Отметим, что прохождение глубоких циклонов также могло быть одной из причин гибели морских организмов в результате воздействия штормового волнения.

Литература

1. Багров Н. А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Тр. Центрального ин-та прогнозов. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
2. Бондур В. Г., Замшин В. В., Четверкова О. И., Матросова Е. Р., Ходаева В. Н. Анализ причин экологического происшествия на Камчатке осенью 2020 г., связанного с красным приливом, на основании космических данных // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 3. С. 3–18. DOI: 10.31857/S020596142103009X.

3. Глебова С. Ю. Осенне-зимний циклогенез над Тихим океаном и Дальневосточными морями и его влияние на развитие ледовитости // Изв. Тихоокеанского научно-исслед. рыбохозяйств. центра. 2017. Т. 191. С. 147–159. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-191-147-159.
4. Глебова С. Ю. Циклоны над Тихим океаном и дальневосточными морями в холодные и теплые сезоны и их влияние на ветровой и термический режим в последний двадцатилетний период // Изв. Тихоокеанского научно-исслед. рыбохозяйств. центра. 2018. Т. 193. С. 153–166. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-153-166.
5. Коновалова Г. В. «Красные приливы» в морях (некоторые итоги изучения проблемы) // Альгология. 1992. Т. 2. № 3. С. 18–25.
6. Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 99–105.
7. Лепская Е. В., Могильникова Т. А., Шубкин С. В., Тепнин О. Б. Первые риски промысла во время «красных приливов» у восточной Камчатки // Бюл. изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. 2017. № 12. С. 106–112.
8. Матвеев В. И. Гидрохимические условия биологической продуктивности Охотского моря: дис. ... канд. геогр. наук. Владивосток: ТИНРО, 2006. 14 с.
9. Могильникова Т. А., Мотылькова И. В., Коновалова Н. В. О развитии массовых токсичных видов фитопланктона и содержании фикотоксинов в тканях гребешка *Mizuhopecten yessoensis* (Jay) в прибрежных водах о. Сахалин // Тр. СахНИРО. 2007. Т. 9. С. 207–222.
10. Пермяков М. С., Акмайкин Д. А., Салюк П. А., Букин О. А., Тархова Т. И., Смолин П. В. Влияние тайфунов на поля концентрации хлорофилла «а» по данным сканера цветности морской воды SeaWiFS // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 56–62.
11. Пичугин М. К., Гуревич И. А., Хазанова Е. С., Салюк П. А. Некоторые особенности океанологических условий осеннего цветения микроводорослей у юго-восточного побережья Камчатки // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4(34). С. 70–73. DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.010.
12. Салюк П. А., Степочкин И. Е., Голик И. А., Букин О. А., Павлов А. Н., Алексанин А. И. Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла-*a* и окрашенных растворенных органических веществ для дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету водной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 3. С. 45–57. DOI: 10.21046/2070-7401-2013-18-6-200-213.
13. Салюк П. А., Стёпочкин И. Е., Алексанин А. И., Голик И. А. Анализ воздействия тропических циклонов на поля концентрации хлорофилла-«а» в Северо-Западной части Тихого океана в 1979–1986 и 1996–2010 гг. с использованием данных пассивного спутникового зондирования цвета океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 219–227.
14. Цхай Ж. Р. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-*a* в поверхностном слое Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным: дис. ... канд. геогр. наук. Южно-Сахалинск, 2017. 125 с.
15. Цхай Ж. Р., Хен Г. В. Сравнение спутниковых и судовых данных о концентрации хлорофилла-*a* в Охотском море и прилегающей акватории // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 187–198. DOI: 10.7868/S0205961415060093.
16. Gabrielsen T. M., Minge M. A., Espelund M., Tooming-Klunderud A., Patil V., Nederbragt A. J., Otis C., Turmel M., Shalchian-Tabrizi K., Lemieux C., Jakobsen K. S. Genome Evolution of a Tertiary Dinoflagellate Plastid // PLoS ONE. 2011. V. 6. Iss. 4. e19132. DOI: 10.1371/journal.pone.0019132.
17. Kononova G. V. Red tides and blooms of water in the Far Eastern seas of Russia and adjacent areas of the Pacific Ocean // Russian J. Marine Biology. 1999. V. 25. No. 4. P. 295–304.
18. Wang Y., Liu D., Tang D. L. Application of a generalized additive model (GAM) for estimating chlorophyll-*a* concentration from MODIS data in the Bohai and Yellow Seas // China Intern. J. Remote Sensing. 2017. V. 3. P. 639–661. DOI: 10.1080/01431161.2016.1268733.

Distribution features of chlorophyll *a* concentration off the east coast of Kamchatka in autumn 2020 from satellite data

Zh. R. Tskhay¹, G. V. Shevchenko^{1,2}

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Sakhalin Branch
Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia
E-mail: tshay@yandex.ru

² Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS
Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

Analysis of long-term data (from 2002 to 2020) obtained from the MODIS spectroradiometer showed that a seasonal increase of chlorophyll *a* concentration near the southeastern coast of Kamchatka Peninsula in September–October is typical for this area. However, the development of phytoplankton in this water area in late September–early October 2020 was very active, the pigment content was several times higher than the long-term average, including in the Avacha and Kronotsky bays. High concentrations of the substance were marked not only in coastal areas with intense river runoff, but also in areas of the shelf and continental slope at a distance of up to 100 km. The probable cause of this phenomenon was the influx of nutrients from deeper layers as a result of wind-wave mixing caused by the passage of three deep cyclones over the study area in the period from September 19 to October 7, 2020. When assessing thermal conditions, it was found that in the autumn period of 2020, significant positive water temperature anomalies were observed off the coast of Kamchatka. However, high concentrations of chlorophyll *a* in this area have been observed repeatedly, for example, in October 2018 and 2019 under normal temperature conditions. Thus, in autumn, the correlation between water temperature variations and pigment content in the Avacha and Kronotsky bays is weakly expressed. In the time function of the first decomposition mode according to EOF, two seasonal peaks of active photosynthetic activity were determined: in May and October. Since 2016, autumn phytoplankton breeding has been more abundant than spring. In the spatial distribution of the first mode, coastal areas and a vast zone along the edge of the shelf in the area of Avacha Bay are highlighted, while the second mode shows the estuarine areas of the Kamchatka Bay.

Keywords: phytoplankton, red tides, ocean surface temperature, natural orthogonal function method, Northwest Pacific Ocean

Accepted: 11.02.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-226-238

References

1. Bagrov N. A., Analytical representation of the sequence of meteorological fields by means of natural orthogonal components, *Trudy Tsentral'nogo instituta prognozov*, 1959, No. 74, pp. 3–24 (in Russian).
2. Bondur V. G., Zamshin V. V., Chvertkova O. I., Matrosova E. R., Khodaeva V. N., Analysis of the causes of the Kamchatka environmental disaster in autumn 2020 related with a red tide, based on satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, No. 3, pp. 3–18 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596142103009X.
3. Glebova S. Yu., Fall-winter cyclogenesis over the Pacific Ocean and far-eastern seas and its influence on development of the sea ice, *Izvestiya Tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybokhozyaistvennogo tsentra*, 2017, Vol. 191, pp. 147–159 (in Russian), DOI: 10.26428/1606-9919-2017-191-147-159.
4. Glebova S. Yu., Cyclones over the Pacific Ocean and Far-Eastern seas in cold and warm seasons and their influence on wind and thermal regime in the last two decade period, *Izvestiya Tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybokhozyaistvennogo tsentra*, 2018, Vol. 193, pp. 153–166 (in Russian), DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-153-166.
5. Kononova G. V., “Red tides” in the seas (some results of the study of the problem), *Algologia*, 1992, Vol. 2, No. 3, pp. 18–25 (in Russian).
6. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Sheberstov S. V., Development and use of regional algorithms for calculating the biooptical characteristics of the Russian seas according to satellite color scanners, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vyp. 3, Vol. 2, pp. 99–105 (in Russian).
7. Lepskaya E. V., Mogilnikova T. A., Shubkin S. V., Tepnin O. B., The first risks of fishing during the “red tides” near eastern Kamchatka, *Byulleten' izucheniya tikhookeanskikh lososei na Dal'nem Vostoke*, 2017, No. 12, pp. 106–112 (in Russian).

8. Matveev V. I., *Gidrokhimicheskie usloviya biologicheskoi produktivnosti Okhotskogo morya: Diss. ... kand. geogr. nauk* (Hydrochemical conditions of biological productivity of the Sea of Okhotsk, Cand. geogr. sci. thesis), Vladivostok: TINRO, 2006, 141 p. (in Russian).
9. Mogilnikova T. A., Motylkova I. V., Konovalova N. V., Development of common toxic phytoplankton species and contents of phycotoxins in tissues of scallop *Mizuhopecten yessoensis* (Jay) in the coastal waters of Sakhalin Islands, *Trudy SakhNIRO*, 2007, Vol. 9, pp. 207–222 (in Russian).
10. Permyakov M. S., Akmaykin D. A., Salyuk P. A., Bukin O. A., Tarkhova T. I., Smolin P. V., Investigation of typhoon's impact on the chlorophyll "a" concentration fields by SeaWiFS ocean color data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 5, pp. 56–62 (in Russian).
11. Pichugin M. K., Gurevich I. A., Khazanova E. S., Salyuk P. A., Some features of oceanological conditions of the microalgae autumn-flowering near the southeast shore of Kamchatka, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2020, No. 4(34), pp. 70–73, DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.010 (in Russian).
12. Salyuk P. A., Steepochkin I. E., Golik I. A., Bukin O. A., Pavlov A. N., Aleksanin A. I., Development of Empirical Algorithms for Chlorophyll-a and Colored Dissolved Organic Matter Concentrations Estimation from Water Remote Sensed Data in the Far Eastern Seas, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 3, pp. 45–57 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213.
13. Salyuk P. A., Steepochkin I. E., Aleksanin A. I., Golik I. A., Analysis of tropical cyclones influence on the chlorophyll-a concentration fields in North-Western Pacific during 1979–1986 and 1996–2010 using satellite passive remote ocean color data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 219–227 (in Russian).
14. Tskhay Zh. R., *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' kontsentratsii khlorofilla-a v poverkhnostnom sloe Okhotskogo morya i prilegayushchikh akvatorii po sputnikovym dannym: Diss. ... kand. geogr. nauk* (Spatio-temporal variability of chlorophyll-a concentration in the surface layer of the Sea of Okhotsk and adjacent water areas according to satellite data, Cand. geogr. sci. thesis), Yuzhno-Sakhalinsk, 2017, 125 p. (in Russian).
15. Tskhay Zh. R., Khen G. V., The comparison of satellite and in situ chlorophyll-a concentration of the Okhotsk Sea and adjacent waters, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 187–198 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961415060093.
16. Gabrielsen T. M., Minge M. A., Espelund M., Tooming-Klunderud A., Patil V., Nederbragt A. J., Otis C., Turmel M., Shalchian-Tabrizi K., Lemieux C., Jakobsen K. S., Genome Evolution of a Tertiary Dinoflagellate Plastid., *PLoS ONE*, 2011, Vol. 6, Issue 4, e19132, DOI: 10.1371/journal.pone.0019132.
17. Konovalova G. V., Red tides and blooms of water in the Far Eastern seas of Russia and adjacent areas of the Pacific Ocean, *Russian J. Marine Biology*, 1999, Vol. 25, No. 4, pp. 295–304.
18. Wang Y., Liu D., Tang D. L., Application of a generalized additive model (GAM) for estimating chlorophyll-a concentration from MODIS data in the Bohai and Yellow Seas, China, *Intern. J. Remote Sensing*, 2017, Vol. 3, pp. 639–661, DOI: 10.1080/01431161.2016.1268733.