

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ОЦЕНКА ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА-*a* В ОХОТСКОМ МОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2020 г. Ж. Р. Цхай<sup>a, \*</sup>, Г. В. Хен<sup>b, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Сахалинский филиал ФГБНУ “ВНИРО” (“СахНИРО”), Южно-Сахалинск, Россия

<sup>b</sup>Тихоокеанский филиал ФГБНУ “ВНИРО” (“ТИНРО”), Владивосток, Россия

\*E-mail: tshay@yandex.ru

\*\*E-mail: gennady.khen@tinro-center.ru

Поступила в редакцию 10.06.2019 г.

Эта работа является продолжением исследований, посвященных анализу возможности применения данных дистанционного зондирования о концентрации хлорофилла-*a* для оценки биопродуктивности акватории Сахалино-Курильского региона. В работе использованы спутниковая информация со спектрорадиометра MODIS и материалы *in situ*, полученные в экспедициях на НИС “Профессор Кагановский” в Охотском море за период с 2004 по 2011 г. Для различных районов Охотского моря построены вертикальные профили концентрации пигмента, определены толщина слоя, в которой происходят активные процессы фотосинтеза, и глубина залегания максимума хлорофилла-*a*. Проанализированы сезонные и межгодовые вариации содержания вещества в толще воды, рассчитаны коэффициенты соотношения между средней концентрацией на поверхности и в 100-метровом слое, с помощью которых становится осуществимым использование спутниковой информации как для восстановления типичных для сезонов и районов Охотского моря вертикальных распределений концентрации хлорофилла-*a*, так и оценки его общего содержания в слое активного фотосинтеза.

**Ключевые слова:** фитопланктон, биопродуктивность, биогенные элементы, фотосинтез, спутниковые наблюдения

**DOI:** 10.31857/S0205961420060056

Многочисленные исследования показали, что Охотское море, где в настоящее время ведется интенсивный рыбный промысел и на шельфе которого ведутся активные разработки углеводородных месторождений, является зоной высокой биопродуктивности (Чернявский и др., 1993; Мордасова и Метревели, 1997; Шунтов, 2001; Матвеев, 2006). В последние годы оценка сезонных и межгодовых вариаций концентрации хлорофилла-*a*, полученная в результате дистанционного мониторинга водной поверхности, применялась как при определении продукционных характеристик в отдельных частях Охотского моря (Лабай и др., 2018), так и при анализе изменений пространственного распределения гидробионтов в трофической цепи (Ким Сен Ток и др., 2017).

Первые обобщающие сведения о вертикальной структуре хлорофилла-*a* в Охотском море были получены в комплексных экспедициях ВНИРО с участием ТИНРО и ИО РАН в 1990–1994 гг. (Мордасова, 1997, 2014; Мордасова и Метревели, 1997). Большая часть наблюдений проводилась в летний период с использованием зондирующей аппаратуры. Анализ полученных данных показал значительные различия состояния сообществ фи-

топланктона в зависимости от района Охотского моря (Мордасова и Метревели, 1997).

Ранее авторами проводилось сравнение спутниковых и судовых данных концентрации пигмента на поверхности в различных районах Охотского моря и прилегающей акватории (Цхай, Хен, 2016; Цхай, 2017). Результаты, полученные при оценке достоверности различий спутниковых и судовых данных с помощью критерия Стьюдента, показали, что существенных отличий между спутниковыми и судовыми данными при уровне значимости 0.01 не наблюдалось в 74% случаев, а в прибрежных районах о. Сахалин – в 100%. В целом, за период с 2004 до 2012 г. удалось получить сравнительные ряды спутниковых и судовых значений из 67 наблюдений. Коэффициент корреляции между ними равнялся 0.88, что означает однонаправленную динамику изменчивости концентрации вещества в зависимости от сезона, года и района исследований. В подавляющем большинстве случаев средние значения изучаемого параметра находились в пределах среднеквадратичного отклонения сравниваемых рядов. В весенний период, отвечающий максимальной интенсивности “цветения” микроводорослей,

спутниковые данные дали практически точную либо несколько заниженную оценку концентрации хлорофилла-*a* вне зависимости от гидрологических особенностей отдельных акваторий. Летом в сезонный минимум “цветения” оценки концентрации пигмента по спутниковым наблюдениям были завышены в отдельные годы у северного и восточного побережий Охотского моря. Таким образом, было определено, что систематических различий между спутниковыми и судовыми данными на поверхности Охотского моря нет (Цхай, Хен, 2016).

Тем не менее активное продуцирование фитопланктона происходит во всем фотическом слое, и распределение концентрации хлорофилла-*a* в нем имеет далеко не однородную структуру (Мордасова, 1997; Цхай, Дудков, 2007). Интенсивность процессов фотосинтеза зависит от целого комплекса гидрологических и гидрохимических условий, включающих температуру воды, наличие динамически активных зон, объем и скорость поступления биогенных элементов и др. (Матвеев, Жигалов, 2008; Матвеев и др., 2015). Знания о вертикальной структуре концентрации пигмента, его сезонной и годовой изменчивости могут существенно дополнить информацию, полученную в результате дистанционных наблюдений за поверхностью Охотского моря. Большой объем данных, полученных в экспедициях на НИС “Профессор Кагановский”, позволяет достигнуть поставленной цели. При этом основная задача заключается в исследовании сезонных особенностей вертикального распределения концентрации хлорофилла-*a* в Охотском море на основе многолетних судовых данных. В результате такого анализа становится возможным определение толщины слоя активного фотосинтеза, вычисление средней концентрации хлорофилла-*a* в нем и сравнение полученных средних оценок с концентрацией вещества на поверхности, что в конечном итоге ведет к использованию спутниковых данных для оценки общего содержания вещества в фотическом слое Охотского моря.

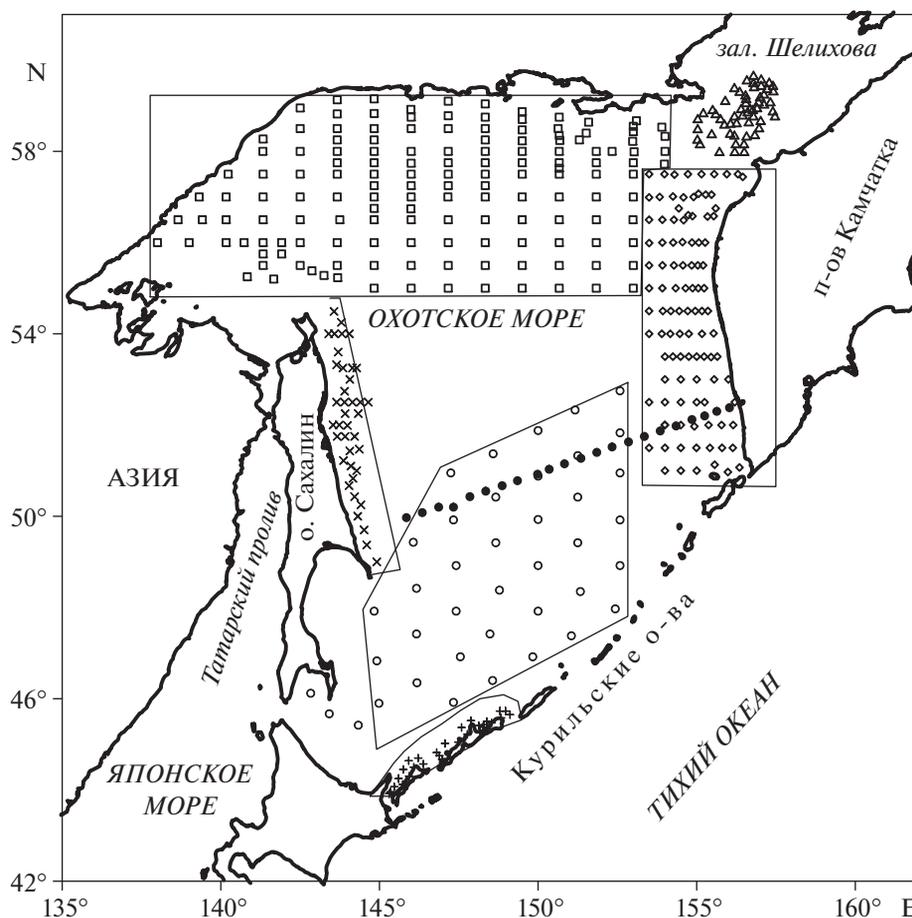
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информационной базой для настоящей работы являлись спутниковые и судовые данные за период 2004–2011 гг. Материалы дистанционного зондирования были получены спектрорадиометром MODIS искусственного спутника Земли Aqua в районе, ограниченном координатами 135–163° с.ш. и 42–60° в.д., и предоставлены Ocean Color Processing Group (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Проецирование данных на координатную сетку с разрешением 1000 × 1022 точки (ок. 2 км) осуществлялось при помощи программы HDFLook (<http://www-loa.univ-lille1.fr/Hdflook>). Данные *in situ* были собраны в экспедициях на

НИС “Профессор Кагановский” (рис. 1) при помощи флуориметра Seapoint (<http://www.seapoint.com/scf.htm>; Левашов, 2003), установленного на океанологическом зонде SBE-25 (<http://seabird.com>). Калибровка флуориметра проводилась в лабораторных условиях. Для этого использовались отобранные во время экспедиций батометром Нискина пробы воды, которые были отфильтрованы на мембранных фильтрах ФМАЦ-0.65 с диаметром пор 0.65 мкм и диаметром фильтра 35 мм. Их хранение осуществлялось при температуре –18°С. Измерения на концентрацию хлорофилла-*a* выполнялись на спектрофотометре Shimadzu UV-1650.

Анализ вертикального распределения проводился отдельно по участкам, где ранее сравнивались спутниковые и судовые данные на поверхности Охотского моря (Цхай, Хен, 2016). В табл. 1 и 2 указаны районы и периоды исследований по сезонам. В заданных районах были рассчитаны средние значения концентрации хлорофилла-*a* по глубинам. На основании полученных вертикальных распределений была определена толщина слоя интенсивного фотосинтеза, ниже которой концентрация вещества становится меньше 0.3–0.5 мг/м<sup>3</sup> в зависимости от района (можно принять ее значения за фоновые) и при этом с глубиной практически не изменяется. Кроме этого, были рассчитаны коэффициенты отношения средней концентрации хлорофилла-*a* в слое 0–100 м к величине на поверхности, т.е. слое 0–2 м (ближайшем к поверхности слое с репрезентативным набором данных, для которого проводилось сравнение со спутниковыми измерениями (Цхай, Хен, 2016), и была показана их хорошая сопоставимость). Для летнего периода у северо-восточного побережья Сахалина коэффициент был рассчитан по одной съемке 2004 г. На основе этих коэффициентов, используя результаты дистанционного зондирования, были получены оценки общего содержания вещества в верхнем 100-метровом слое. Для этого осредненные по спутниковым данным за 2004–2011 гг. концентрации хлорофилла-*a* в каждой точке выделенного района за период сбора данных *in situ* были пересчитаны с применением коэффициентов на средние концентрации пигмента в 100-метровом слое. Затем с помощью численного интегрирования полученной сетки значений методом трапеций и последующим пересчетом на 100-метровый слой была получена величина общего содержания хлорофилла-*a*. При этом 100 метров принималось за максимальную глубину слоя активного фотосинтеза в целом по Охотскому морю, полученную при анализе судовых данных, о чем будет сказано ниже.

Помимо указанных в табл. 1 и 2 районов, рассматривались также значения по трансохотоморскому разрезу (обозначен на карте черными



**Рис. 1.** Примерная ежегодная схема станций, выполненных НИС “Профессор Кагановский” в 2004–2011 гг. в следующих районах Охотского моря: + – побережье Южных Курил; ◇ – Западное побережье Камчатки; △ – залив Шелихова; □ – северная часть Охотского моря; × – северо-востоке побережье Сахалина; ○ – южная часть Охотского моря; ● – трансохотоморский разрез. Линиями обозначены границы соответствующих районов по спутниковым данным.

точками). Съемка на разрезе проводилась в самом конце марта–начале апреля в течение двух-четырех суток на небольшом количестве станций (от 6 до 22). Этот разрез проходил через центральную часть Охотского моря, где интенсивность

фотосинтетической деятельности слабее, чем в других районах (Цхай, 2007), но, тем не менее, в силу ограниченности информации по этому району, ее межгодовые вариации в весенний сезон также представляют интерес.

**Таблица 1.** Сроки сбора данных в различных районах Охотского моря в весенний период

Год	Южные Курилы	Западно-камчатский шельф	Залив Шелихова	Северная часть	Северо-восточный шельф Сахалина
2005		2–20 апр.	22 апр.–3 мая	4 мая–6 июн.	7–9 июн.
2006	23 мар.–3 апр.	7–26 апр.	27 апр.–3 мая	4 мая–2 июн.	2–6 июн.
2007	13–20 мар.	31 мар.–19 апр.	22 апр.–1 мая	2–21 мая	
2008		4–23 апр.	23 апр.–3 мая	3–30 мая	31 мая–7 июн.
2009	19–24 мар.	1–22 апр.	24–29 апр.	30 апр.–22 мая	23–29 мая
2010	15–20 мар.	31 мар.–29 апр.	1–7 мая	8–22 мая	23–30 мая
2011	20–25 мар.	5–25 апр.	1–7 мая	8–25 мая	25–29 мая

**Таблица 2.** Сроки сбора данных в различных районах Охотского моря в летне-осенний период

Год	Южная часть	Западно-камчатский шельф	Залив Шелихова	Северная часть
2004	14 окт.—4 нояб.	27 июл.—14 авг.	14 авг.—8 сен.	19 сен.—9 окт.
2005	24 окт.—14 нояб.	14 июн.—16 июл.	16—22 июл.	
2007	6 окт.—4 нояб.	7—31 июл. 3—10 дек.	29 нояб.—2 дек.	10—28 нояб.
2008	13 окт.—5 нояб.	3—9 дек.	30 нояб.—2 дек.	7—30 нояб.
2009	30 окт.—19 нояб.	20—24 окт.		
2010	26 окт.—20 нояб.			
2011	12 окт.—1 нояб.			

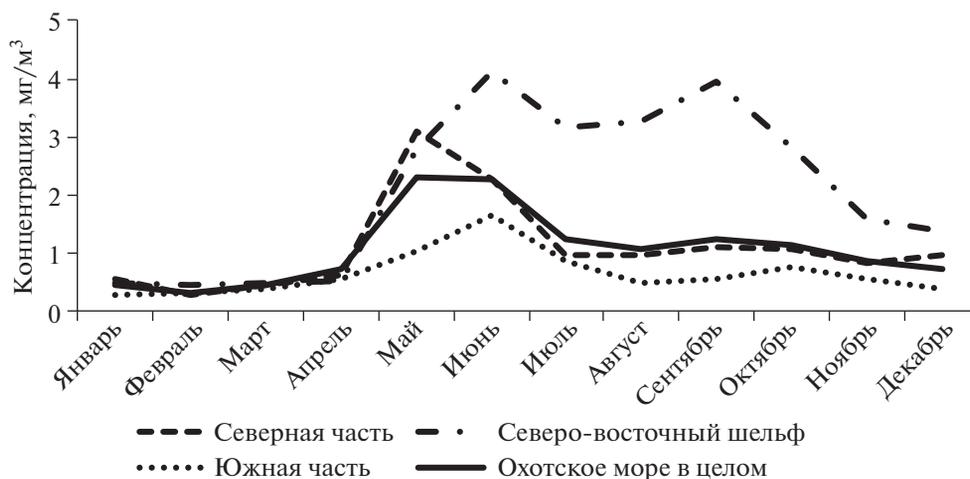
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим среднюю многолетнюю динамику распределения концентрации хлорофилла-а в Охотском море, полученную по спутниковым данным за 2004–2011 гг. (рис. 2). В целом для районов Охотского моря характерно наличие двух фаз интенсивного развития фитопланктона – весной и осенью. (Вентцель и др., 2000; Шунтов, 2001; Цхай, 2017). Как видно из графика, повышенное содержание пигмента (более 0.5 мг/м<sup>3</sup>) наблюдалось в течение всего безледного периода – с апреля по ноябрь. Фаза активного “цветения” фитопланктона начиналась в апреле, прежде всего в зонах таяния льда, и в зависимости от района продолжалась до конца мая–первой половины июня. В летние месяцы происходило снижение концентрации вещества из-за убыли биогенных элементов, а в сентябре–октябре наступал второй сезонный пик развития микроводорослей за счет возобновления поступлений питательных веществ (Матвеев, 2006). В целом, в южных районах Охотского моря, включая южные Курильские

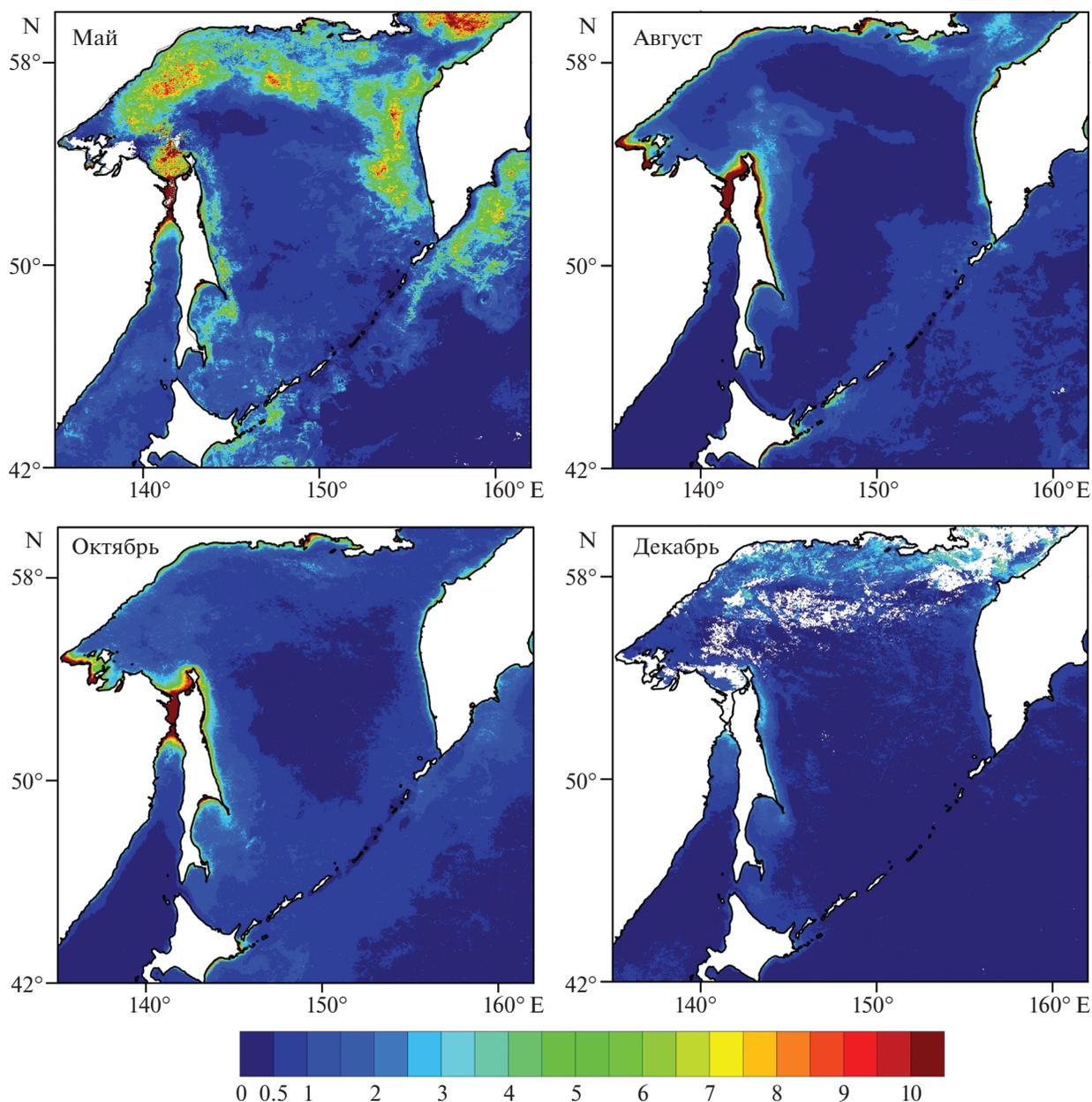
острова, концентрация хлорофилла-а была ниже, чем на севере.

На большей части Охотского моря максимальные концентрации пигмента отмечались в весенний период, что типично для морей субарктического типа [Киселев, 1980]. Однако в некоторых районах со значительным речным стоком, например в Амурском лимане или у северо-восточного побережья Сахалина, осеннее “цветение” фитопланктона по силе практически не уступало весеннему (Цхай, 2017).

На рис. 3 изображены пространственные распределения средней многолетней концентрации хлорофилла-а в различные сезоны, построенные по спутниковым данным за период с 2004 по 2011 гг. В весенний период средняя концентрация пигмента в целом по Охотскому морю составляла 2.3 мг/м<sup>3</sup>. При этом у западного побережья п-ова Камчатка она достигала 3.6 мг/м<sup>3</sup>, в северной части Охотского моря и у северо-восточного побережья Сахалина – около 3 мг/м<sup>3</sup>, у охотоморского



**Рис. 2.** Сезонная динамика средней концентрации хлорофилла-а в районах Охотского моря по спутниковым данным за 2004–2011 гг.



**Рис. 3.** Пространственное распределение средней концентрации хлорофилла-*a* ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в Охотском море по спутниковым данным за 2004–2011 гг.

побережья Южных Курил – более  $1.5 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Минимальные концентрации пигмента фиксировались в центральной части Охотского моря, но и здесь они превышали  $0.5 \text{ мг}/\text{м}^3$ , тогда как в другие сезоны варьировались в пределах  $0.2\text{--}0.5 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

В летние месяцы зоны обильного цветения фитопланктона в основном локализовались в районах интенсивного речного стока (рис. 3). В августе выделялись, прежде всего, приустьевые заливы северного и северо-западного побережья Охотского моря, в частности Тауйская и Удская

губы, заливы Тугурский, Забияка и др. Максимальное по региону содержание вещества наблюдалось в районе стока крупнейшей дальневосточной реки Амур. В летний период модифицированные амурские воды достигали северо-восточного побережья Сахалина, где под воздействием ветров южных румбов проникали далее в северную часть Охотского моря по направлению к о. Ионы и банке Кашеварова (Цхай и др., 2016).

Осенью повышение концентрации хлорофилла-*a* происходит у восточного побережья Сахалина в зоне интенсификации Восточно-Сахалинского

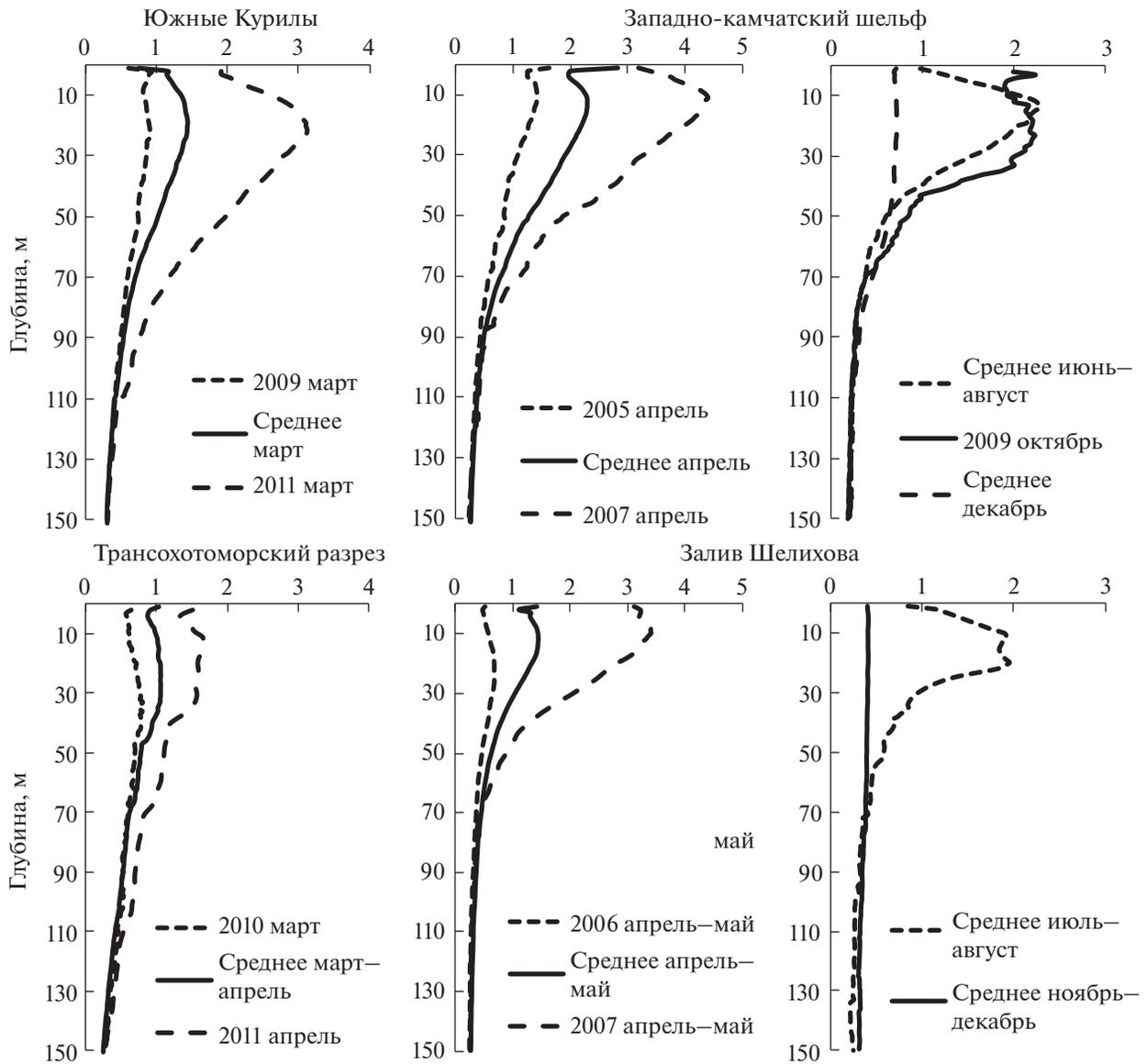


Рис. 4. Вертикальные распределения концентрации хлорофилла-а ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в южной и восточной частях Охотского моря.

течения (Власова и др., 2008). Помимо этого, в некоторых районах Охотского моря, например в его северо-западной части, происходит увеличение содержания пигмента в сравнении с летними месяцами за счет возобновления запаса биогенных элементов (Матвеев, 2006).

Отметим также, что в ряде районов активные процессы фотосинтеза продолжают в ноябре–декабре, что указывает на продолжительное существование благоприятных для развития микроводорослей термических условий и постоянного поступления питательных веществ с глубины за счет отсутствия вертикальной стратификации вод (Матвеев, 2006; Цхай, 2017).

Далее более детально проанализируем вертикальные распределения концентрации хлоро-

филла-а до глубины 150 м в районах Охотского моря (рис. 4 и 5). Кроме кривой со средними многолетними значениями, показаны графики как с интенсивным, так и слабым “цветением” фитопланктона за ряд наблюдаемых лет, что дает возможность оценить размах межгодовых вариаций.

Следует учесть, что на акватории Охотского моря сезонные периоды сдвинуты как минимум на две недели. Поэтому данные, полученные в первой декаде июня, характеризуют весенний сезон, а в первой декаде декабря – позднюю осень.

Как видно из представленных рисунков, интенсивность развития микроводорослей в весенний период существенно отличается в зависимости от района. В целом весенние съемки выполнялись в период максимального продуцирования

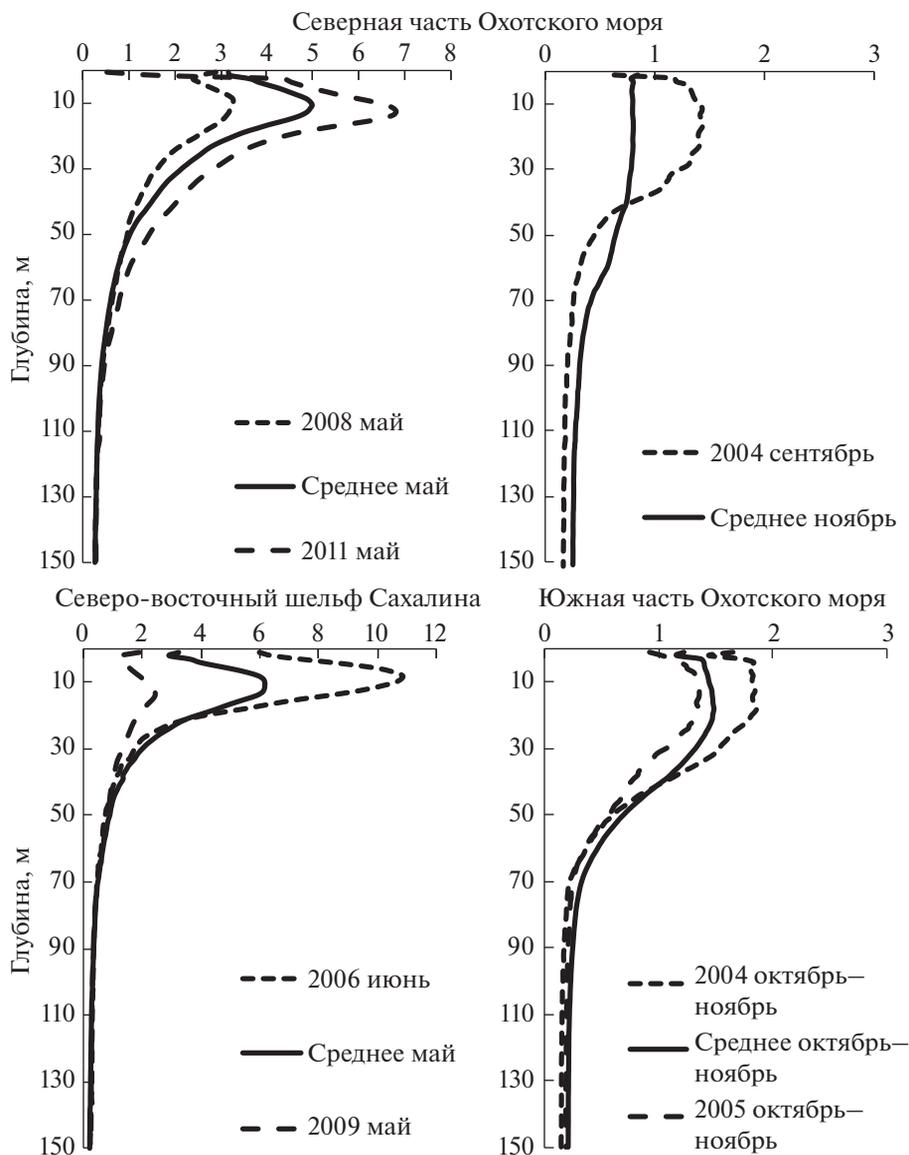


Рис. 5. Вертикальные распределения концентрации хлорофилла-*a* ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в южной и северной частях Охотского моря.

фитопланктона. На станциях, расположенных на Южных Курилах и в центральной части Охотского моря, отмечались низкие концентрации хлорофилла-*a*. В то же время в северной части Охотского моря и у северо-восточного Сахалина наблюдалось очень высокое содержание вещества. Рассмотрим более подробно структуру вертикального распределения в каждом районе.

**Южные Курилы.** По многолетним данным, в конце марта—начале апреля средняя концентрация хлорофилла-*a* до глубины 70 м составила около  $1 \text{ мг}/\text{м}^3$ . При этом на поверхности она несколько ниже (приблизительно на  $0.5 \text{ мг}/\text{м}^3$ ), чем в слое 10–30 м. В этом районе процессы фотосинтеза выражены слабее в сравнении с другими районами Охотского моря. В 2009 г. концентрация пиг-

мента не превышала  $1 \text{ мг}/\text{м}^3$  и была равномерно распределена до глубины 90 м. Однако в 2011 году в этом районе интенсивное цветение фитопланктона наблюдалось до глубины 110 м. Высокие концентрации вещества отмечались на поверхности (около  $2 \text{ мг}/\text{м}^3$ ), а на глубине 20–25 м они были максимальными и превышали  $3 \text{ мг}/\text{м}^3$ . В целом толщина слоя активного фотосинтеза в этом районе можно оценить в 100–110 м.

**Трансохотоморский разрез.** Как отмечалось выше, в центральной части Охотского моря фиксировались незначительные концентрации хлорофилла-*a*. Структура вертикального распределения во все годы примерно одинаковая: до 30–40 м содержание вещества находится приблизительно на одном уровне (некоторое снижение наблюда-

ется на глубине 5 м), затем идет постепенное уменьшение концентрации до фоновых значений на глубине 110 м. Межгодовые значения в приповерхностном слое колебались незначительно — от 0.5 до 1.5 мг/м<sup>3</sup>.

**Западно-камчатский шельф.** У западного побережья Камчатки съемка проходила в апреле. Средняя концентрация хлорофилла-*a* в этом районе выше, чем у Южных Курил. На поверхности отмечаются максимальные концентрации, затем идет снижение и незначительное увеличение в слое 10–30 м. Активность развития фитопланктона падает на глубине 90 м. В 2007 г. вертикальная структура имела отличия, и максимум “цветения” наблюдался не на поверхности, а на глубине 20 м, где концентрация пигмента составила более 3 мг/м<sup>3</sup>.

В летний период концентрация хлорофилла-*a* на поверхности ниже, чем весной (около 1 мг/м<sup>3</sup>), она возрастает с глубиной и достигает максимума в слое 10–20 м (более 2 мг/м<sup>3</sup>), а затем уменьшается до 0.5 мг/м<sup>3</sup> на глубине 60 м. Иная картина вертикального распределения наблюдается в октябре. Содержание пигмента больше, чем летом, так как в это время пополняется запас биогенов за счет рециклинга (Матвеев, 2006). При этом в слое от 0 до 35 м концентрация вещества находится приблизительно на одном уровне (ок. 2 мг/м<sup>3</sup>), а затем падает до фоновых значений на глубине 70 м. В первой декаде декабря отмечается равномерное распределение пигмента в слое, при этом концентрация хлорофилла-*a* ниже 1 мг/м<sup>3</sup>. Таким образом, на западно-камчатском шельфе разрушение вертикальной стратификации происходит поздней осенью.

**Залив Шелихова.** Концентрация пигмента в заливе ниже, чем у западного побережья Камчатки. По большей части ее значения равномерно распределены в верхнем 30-метровом слое. В годы слабого “цветения” микроводорослей отмечается практически равномерное распределение, а в годы интенсивного развития высокое содержание хлорофилла-*a* наблюдается до глубины 40 м с максимумом на 10–15 м. Толщина слоя активного фотосинтеза меньше, чем у западного побережья Камчатки, на глубине 70 м концентрация хлорофилла-*a* становится ниже 0.5 мг/м<sup>3</sup>. Летом максимальные концентрации пигмента сосредоточены в узком приповерхностном слое 5–25 м. В конце ноября вследствие разрушения вертикальной стратификации хлорофилл-*a* равномерно распределяется во всем фотическом слое.

**Северная часть Охотского моря.** В этом районе экспедиционные исследования весной совпали с периодом сезонного пика развития фитопланктона на поверхности (Цхай, 2007). Концентрация хлорофилла-*a* в приповерхностном слое 5–30 м была значительно выше, чем на поверхности. Мак-

симальные значения фиксировались на глубине 10–15 м. Следует отметить особенности 2011 г. В этот год отмечалась самая низкая интенсивность весеннего “цветения” на поверхности за период наблюдений с 2003 г., что было обусловлено рядом сложившихся гидрологических и синоптических факторов, в частности низкой ледовитостью акватории Охотского моря зимой и слабым прогревом поверхности вследствие аномального распределения поля давления весной (Цхай, 2017; Ложкин и др., 2018). Как видно по представленному графику, в это же время было самое обильное “цветение” в приповерхностном слое, где, вероятно, сформировались более благоприятные для развития условия, чем на поверхности. При этом наблюдалась существенная разница концентрации вещества на глубинах 1 и 3 м (0.5 и 4.3 мг/м<sup>3</sup> соответственно). В сентябре–октябре содержание вещества было значительно ниже, чем весной. Однако слой интенсивного фотосинтеза в этот период залегал глубже, чем в заливе Шелихова, концентрация хлорофилла-*a* более 1 мг/м<sup>3</sup> отмечалась до глубины 40 м. В конце ноября–начале декабря, как и в других рассмотренных выше районах, содержание пигмента упало ниже 1 мг/м<sup>3</sup> и стало равномерным во всем приповерхностном слое.

**Северо-Восточный шельф Сахалина.** Как правило, этот район характеризуется наименьшим по глубине слоем активного фотосинтеза, связанным с минимальным заглублением компенсационной поверхности (Матвеев и др., 2015). Весной основная зона высокого продуцирования фитопланктона находится в слое 0–30 м с максимумом на глубине около 10 м. На глубине 50 м концентрация хлорофилла-*a* падает до 1 мг/м<sup>3</sup>, а на 70 м становится на уровне фоновых показателей (менее 0.5 мг/м<sup>3</sup>). В зависимости от времени сбора материала существенно меняется его вертикальное распределение. Если съемки проходили в последней декаде мая, то вертикальная изменчивость концентрации хлорофилла-*a* незначительна, как мы это видим на примере 2009 г. (рис. 2), и аналогичная ситуация наблюдалась в 2010 и 2011 гг. Если исследования проводились на декаду позже, когда северо-восточное побережье Сахалина освобождается ото льда и в этот район начинают поступать богатые биогенами опресненные амурские воды (Шевченко, Тамбовский, 2018), то мы наблюдаем вспышку фотосинтетической деятельности, как это было в 2005, 2006 и 2008 гг. При этом в приповерхностном слое достигаются максимальные по региону концентрации вещества.

**Южная часть Охотского моря.** В этом районе съемка выполнялась только в октябре–ноябре, в период осеннего “цветения” фитопланктона. Интенсивность продуцирования фитопланктона

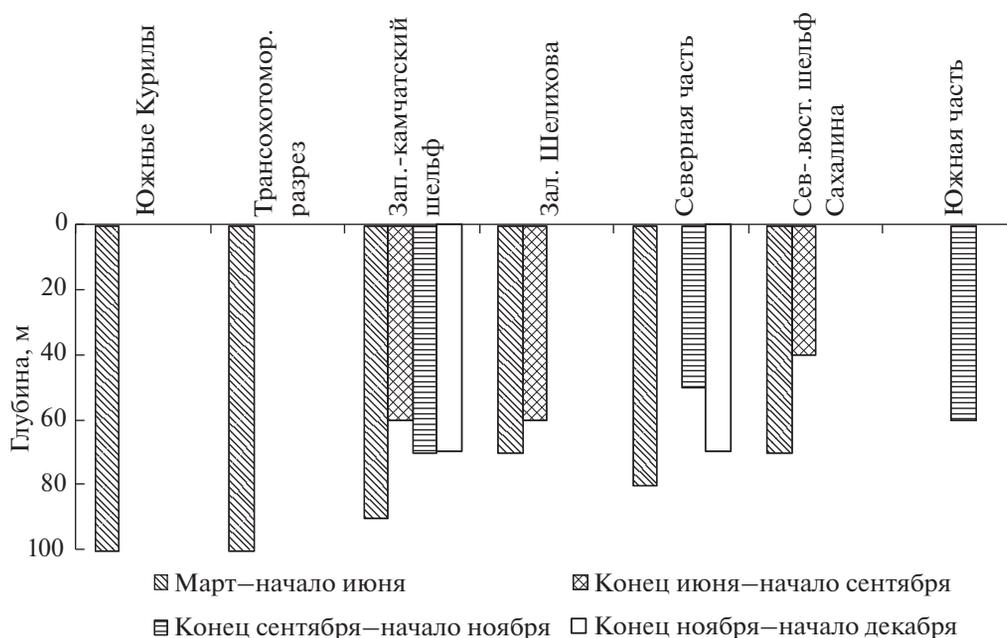


Рис. 6. Глубина слоя с концентрацией хлорофилла-*a* выше  $0.5 \text{ мг/м}^3$  в районах Охотского моря в зависимости от периода года.

в южной части Охотского моря в течение года ниже, чем в северной. На поверхности средняя концентрация хлорофилла-*a* в разные годы колебалась от 1 до  $1.5 \text{ мг/м}^3$ . В приповерхностном слое процессы фотосинтеза идут более активно. Максимальное содержание вещества наблюдается в слое 5–20 м. На глубине больше 60 м концентрация вещества падает ниже  $0.5 \text{ мг/м}^3$ .

Поздней осенью хлорофилл-*a* равномерно распределяется во всем поверхностном слое. Ниже на рис. 6 приведены значения глубины активного фотосинтеза для каждого района в зависимости от сезона.

В весенний период слой, в котором идут активные процессы фотосинтеза, наиболее глубокий и составляет 70–100 м. Летом и осенью он уменьшается до 40–70 м. Наименьшая глубина 40 м отмечалась в сентябре у северо-восточного побережья Сахалина. Также следует отметить, что в конце ноября–начале декабря в заливе Шелихова четко выраженной нижней границы фотосинтеза нет, средняя концентрация хлорофилла-*a* в 100-метровом слое составляет  $0.4 \text{ мг/м}^3$ .

В табл. 3 показаны коэффициенты отношения концентрации хлорофилла-*a* на поверхности (в слое 0–2 м) к ее среднему значению в 100-метровом слое. На Южных Курилах в весенний период концентрация вещества на поверхности практически равна ее среднему значению в 100-метровом слое. В северной части и шельфовых районах Охотского моря коэффициент превышает 1.5, что означает высокую интенсивность процессов фотосинтеза в

приповерхностных водах и ее значительное уменьшение с глубиной. В таблице указаны минимальные и максимальные значения коэффициентов за многолетний период наблюдений. Обращают на себя внимание минимумы от 0.5 и ниже в северной части Охотского моря от залива Шелихова до северо-восточного побережья Сахалина. Во всех случаях это относилось к 2011 г., когда на поверхности концентрация хлорофилла-*a* была значительно меньше, чем на глубине 10–30 м, о чем уже отмечалось выше. В летний и осенний сезоны коэффициенты соотношения были ниже, чем весной. Наименьшая межгодовая изменчивость показателя фиксировалась в позднеосенний период.

Расчитанные коэффициенты позволили использовать спутниковые данные о концентрации хлорофилла-*a* на поверхности для получения интегральных оценок содержания вещества в верхнем 100-метровом слое в целом по району и в пересчете на основание  $1 \text{ м}^2$  (табл. 4). Как и следовало ожидать, в течение года максимальное содержание пигмента отмечалось в весенний сезон, а самое низкое – поздней осенью (разница в полтора-два раза). Обращает на себя внимание сезонная динамика у западного побережья Камчатки. В июле общее содержание хлорофилла-*a* выше, чем в апреле, что объясняется рядом причин. Во-первых, в апреле в этом районе пик весеннего развития фитопланктона еще не наступил, во-вторых, как отмечалось выше, весной максимальные показатели фиксируются на поверхности, а в июле – в приповерхностном слое. В других районах Охот-

**Таблица 3.** Соотношение средних концентраций хлорофилла-*a* на поверхности (0–2 м) и в слое (0–100 м) в районах Охотского моря (в скобках указан разброс значений в различные годы)

Район Охотского моря	Март–начало июня	Конец июня–начало сентября	Конец сентября–начало ноября	Конец ноября–декабрь
Южные Курилы	0.99 (0.54–1.44)			
Трансохотоморский разрез	1.23 (0.91–1.38)			
Западно-камчатский шельф	1.81 (1.14–2.30)	1.13 (0.54–1.50)	1.82	1.25 (1.25–1.26)
Залив Шелихова	1.64 (0.50–2.28)	1.23 (0.77–1.58)		1.04 (1.02–1.06)
Северная часть	1.88 (0.51–2.93)		1.31	1.37 (1.27–1.47)
Северо-восточный шельф Сахалина	1.73 (0.29–2.67)	1.61		
Южная часть			1.49 (0.80–1.79)	

**Таблица 4.** Оценка общего содержания хлорофилла-*a* (тыс. т) в верхнем 100-метровом слое в некоторых районах Охотского моря, в скобках указано содержание хлорофилла-*a* (мг) в 100-метровом столбе воды с основанием 1 м<sup>2</sup>

Район Охотского моря	Март–начало июня	Конец июня–начало сентября	Конец сентября–начало ноября	Конец ноября–декабрь
Южные Курилы	1.67 (68.2)			
Западно-камчатский шельф	13.07 (89.7)	13.76 (97.4)	12.34 (84.7)	9.63 (70.7)
Залив Шелихова	8.08 (156.4)	5.95 (115.2)		3.72 (96.6)
Северная часть	72.54 (174.4)		46.35 (111.4)	34.41 (82.7)
Северо-восточный шельф Сахалина	17.50 (314.4)	16.65 (299.0)		
Южная часть			20.05 (55.0)	

ского моря содержание хлорофилла-*a* осенью немногим меньше, чем весной, что говорит об активно идущих процессах фотосинтеза в течение всего вегетационного периода.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в период весеннего “цветения” фитопланктона на акватории Охотского моря формируются два типа вертикальной структуры хлорофилла-*a*. В первом случае максимум концентрации вещества отмечается на поверхности, во втором – в приповерхностном слое 10–30 м. При этом глубина слоя активного фотосинтеза оценивается от 70 до 100 м в зависимости от района и степени становления вертикальной стратификации вод. Минимальная глубина (10 м) залегания максимума концентрации хлорофилла-*a* наблюдается на северо-восточном шельфе Сахалина.

В летний и осенний периоды глубина слоя активной фотосинтетической деятельности уменьшается до 40–70 м. Летом минимальная глубина этого слоя располагается у северо-восточного побережья Сахалина, осенью – в северной части Охотского моря. В большинстве районов ярко выраженный максимум летом в вертикальном профиле не выделяется, высокое содержание вещества фиксируется в верхнем 30-метровом слое. Поздней осенью, вследствие разрушения вертикальной стратификации вод, хлорофилл-*a* равномерно распределяется в поверхностном слое, его концентрация значительно уменьшается по сравнению с другими сезонами.

Несмотря на то, что в работе использовались средние многолетние данные, которые в полной мере не учитывают особенности того или иного года, полученные оценки концентрации хлорофилла-*a* выявили сезонные и межгодовые особенности распределения вещества в фотическом слое для районов Охотского моря, что делает воз-

возможным восстановление его осредненного вертикального профиля по спутниковым данным. Рассчитанные параметры соотношения средней концентрацией хлорофилла-*a* на поверхности к слою 0–100 м позволяют использовать результаты дистанционного зондирования для расчета общего содержания хлорофилла-*a* при решении практических задач оценки параметров биопродуктивности как в отдельных районах, так и в целом по акватории Охотского моря.

Таким образом, акватория Охотского моря является зоной интенсивной фотосинтетической деятельности с высокими концентрациями хлорофилла-*a* на поверхности. Биопродукционный потенциал акватории находится на стабильно высоком уровне.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность старшему специалисту Тихоокеанского филиала ФГБНУ “ВНИРО” (“ТИНРО”) Любови Михайловне Гостренко за неоценимую помощь в отборе проб на судах и определении концентрации хлорофилла-*a* в лабораторных условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Власова Г.А., Васильев А.С., Шевченко Г.В.* Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 2008. 356 с.
- Вентцель М.В., Крылов В.В., Левашова С.С.* Закономерности распределения фитопланктона по акватории Северно-Западной Пацифики // Морские гидробиологические исследования: Сб. науч. тр. М.: ВНИРО, 2000. С. 11–21.
- Ким Сен Ток, Мухаметов И.Н., Заварзин Д.С., Частиков В.Н., Латковская Е.М., Цхай Ж.Р., Корнеев Е.С., Корнева Т.Г.* Условия воспроизводства мятная *Theagra chalogramma* (Gadidae) у северо-восточного побережья Сахалина, Охотское море // Вопросы ихтиологии. 2017. Т. 57. № 6. С. 892–906.
- Киселев И.А.* Планктон морей и континентальных водоемов: распределение, сезонная динамика, питание и значение. Л.: Наука, 1980. 440 с.
- Лабай В.С., Ким С.Т., Смирнов А.В., Частиков В.Н., Шевченко Г.В., Цхай Ж.Р.* Оценка экологической емкости среды для серых китов (*Eschrichtius robustus*) в известных районах нагула у северо-восточного побережья о-ва Сахалин // X международная конференция “Морские млекопитающие Голарктики”, посвященная памяти А.В. Яблокова. Сборник тезисов. Архангельск, 2018. С. 63–64 с.
- Левашов Д.Е.* Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 400 с.
- Ложкин Д.М., Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В.* Спутниковый мониторинг температурных условий в районах устьев нерестовых рек южной части о. Сахалин // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 5. С. 15–22.
- Матвеев В.И.* Гидрохимические условия биологической продуктивности Охотского моря // Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Владивосток: ТИНРО, 2006. 141 с.
- Матвеев В.И., Жигалов И.А.* Оценка величины первичной продукции динамически активных зон Охотского моря // Вопросы промысловой океанографии. М.: ВНИРО, 2008. Вып. 5. № 2. С. 208–215.
- Матвеев В.И., Тихомирова Е.А., Лучин В.А.* Первичная продукция Охотского моря в годы с различными термическими условиями // Биология моря. 2015. Т. 41. № 3 С. 179–187.
- Мордасова Н.В.* Некоторые особенности распределения хлорофилла в Охотском море // Океанология. 1997. Т. 37. № 4. С. 538–546.
- Мордасова Н.В.* Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 41–56.
- Мордасова Н.В., Метревели М.П.* Фитопигменты в Охотском море // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. М.: ВНИРО, 1997. С. 199–205.
- Цхай Ж.Р., Дудков С.П.* Результаты сравнения судовых и спутниковых данных о распределении температуры поверхности океана и хлорофилла-*a* в Охотском море // Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового океана. Тезисы докл. (1–3 октября 2007 г., Владивосток). 2007. С. 74–76.
- Цхай Ж.Р.* Анализ сезонных вариаций концентрации хлорофилла-*a* методом естественных ортогональных функций в Охотском море по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 37–45.
- Цхай Ж.Р.* Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-*a* в поверхностном слое Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. СахНИРО; ИМГиГ ДВО РАН. Южно-Сахалинск, 2017. 24 с.
- 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.
- Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В., Частиков В.Н.* Аномальное распространение стока реки Амур в Охотском море в 2013 г. // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 84–88.
- Чернявский В.И., Жигалов И.А., Матвеев В.И.* Океанологические основы формирования зон высокой биологической продуктивности Охотского моря // Охотское море. Гидрометеорология и гидрохимия. Проект “Моря”. Л.: Гидрометеоиздат, 1993. Т. 9. Вып. 2. С. 157–160.
- Шевченко Г.В., Тамбовский В.С.* Динамика дрейфа льда на северо-восточном шельфе острова Сахалин по данным измерений радиолокационными станциями. РФФИ; ИМГиГ ДВО РАН. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2018. 136 с.
- Шунтов В.П.* Биология дальневосточных морей России. Том 1. Владивосток: ТИНРО-центр, 2001. 580 с.

## Estimation of the Total Chlorophyll-*a* Concentration in the Sea of Okhotsk Using Satellite Data

Zh. R. Tskhay<sup>1</sup> and G. V. Khen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Sakhalin Branch (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup> Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Pacific Branch (TINRO), Vladivostok, Russia

This work is a continuation of studies devoted to the analysis of the possibility of using remote sensing data of chlorophyll-*a* concentration to assess the bioproductivity of the water area of the Sakhalin-Kuril region. We used chlorophyll-*a* concentration data obtained on expeditions on the ship Professor Kaganovsky in the Sea of Okhotsk for the period from 2004 to 2011. Vertical pigment concentration distributions were drawn for different regions of the Sea of Okhotsk, the layer thickness of active photosynthetic processes and the depth of the maximum chlorophyll-*a* were determined. The seasonal and interannual variations of the chlorophyll-*a* concentration in the water layer were analyzed, the coefficients of the ratio between the average concentration on the surface and in the upper 100-meter layer were determined. This makes it possible to use satellite information to reconstruct the typical vertical distributions of pigment concentration for the seasons and regions of the Sea of Okhotsk and estimate its total content in the layer of active photosynthesis.

**Keywords:** phytoplankton, bioproductivity, biogenic elements, photosynthesis, remote sensing observations

### REFERENCES

- Chernyavskiy V.I., Zhigalov I.A., Matveev V.* Okeanologicheskie osnovy formirovaniya zon vysokoy biologicheskoy produktivnosti Okhotskogo morya [Oceanological foundations of the formation of zones of high biological productivity of the Sea of Okhotsk] // Okhotskoe more. Gidrometeorologiya i gidrokhomiya. Proekt "Morya". L.: Gidrometeorizdat, 1993. V. 9. Is. 2. P. 157–160 (In Russian).
- Kim S.T., Mukhametov I.N., Zavarzin D.S., Chastikov V.N., Latkovskaya E.M., Tskhai Zh.R., Korneev E.S., Koreneva T.G.* Reproductive conditions of walleye pollock *Theragra chalcogramma* (Gadidae) off the northeastern coast of Sakhalin Island, Sea of Okhotsk // J. Ichthyology. 2017. T. 57. № 6. P. 893–907.
- Kiselev I.A.* Plankton morey i kontinental'nykh vodoemov: raspredelenie, sezonnaya dinamika, pitanie i znachenie [Plankton of seas and continental water bodies: distribution, seasonal dynamics, nutrition and significance]. L.: Nauka, 1980. 440 p. (In Russian).
- Labay V.S., Kim S.T., Smirnov A.V., Chastikov V.N., Shevchenko G.V., Tskhay Zh.R.* Otsenka ekologicheskoy emkosti sredy dlya serykh kitov (*Eschrichtius robustus*) v izvestnykh rayonakh nagula u severo-vostochnogo poberezh'ya o-va Sakhalin [Assessment of carrying capacity of the gray whales (*Eschrichtius robustus*) in their feeding areas off the northeastern Sakhalin Island] // X mezhdunarodnaya konferentsiya "Morskije mlekoopitayuschie Golarktiki", posvyashchennaya pamyati A.V. Yablokova. Sbornik tezisev. Arkhangel'sk, 2018. P. 63–64 (In Russian).
- Levashov D.E.* Tekhnika ekspeditsionnykh issledovaniy: Instrumental'nye metody i tekhnicheskie sredstva otsenki promyslovo-znachimyykh faktorov sredy [Facilities and technique for marine surveys: Instrumental methods and components for estimating the fishing-significant characteristics of water medium]. M.: VNIRO, 2003. 400 p. (In Russian).
- Lozhkin D.M., Tskhay Zh.R., Shevchenko G.V.* Satellite monitoring of temperature conditions near the mouths of spawning rivers in the southern part of Sakhalin Island // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2019. V. 55. № 9. P. 1166–1171.
- Matveev V.I.* Gidrokhimicheskie usloviya biologicheskoy produktivnosti Okhotskogo morya [Hydrochemical conditions of biological productivity of the Sea of Okhotsk] // Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata geograficheskikh nauk. Vladivostok: TINRO, 2006. 141 p. (In Russian).
- Matveev V.I., Zhigalov I.A.* Otsenka velichiny pervichnoy produktsii dinamicheski aktivnykh zon Okhotskogo morya [Estimation of primary production value for dynamically active zones of the Sea of Okhotsk] // Voprosy promyslovy okeanografii. M.: VNIRO, 2008. Is. 5. № 2. P. 208–215 (In Russian).
- Matveev V.I., Tikhomirova E.A., Luchin V.A.* Pervichnaya produktsiya Okhotskogo morya v gody s razlichnymi termicheskimi usloviyami [Primary production of the Sea of Okhotsk in years with different temperature conditions] // Biologiya morya. 2015. V. 41. № 3. P. 179–187 (In Russian).
- Mordasova N.V.* Some peculiarities of chlorophyll distribution in the Sea of Okhotsk // Oceanology. 1997. V. 37. № 4. P. 484–491.
- Mordasova N.V.* Kosvennaya otsenka produktivnosti vod po sodержaniyu khlorofilla [Indirect assessment of water productivity by chlorophyll content] // Trudy VNIRO. 2014. V. 152. P. 41–56 (In Russian).
- Mordasova N.V., Metreveli M.P.* Fitopigmenty v Okhotskom more. [Phytopigments in the Sea of Okhotsk] // Kompleksnye issledovaniya ekosistemy Okhotskogo morya. M.: VNIRO, 1997. P. 199–205 (In Russian).
- Tskhay Zh.R., Dudkov S.P.* Rezul'taty sravneniya sudovykh i sputnikovyykh dannykh o raspredelenii temperatury poverkhnosti okeana i khlorofilla-*a* v Okhotskom more [Results of comparison of ship and satellite data on the distribution of ocean surface temperature and chlorophyll-*a* in the Sea of Okhotsk] // Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v issledovaniyakh bioresursov

Mirovogo okeana. Tezisy dokl. Vladivostok, 2007. P. 74–76 (In Russian).

*Tskhay Zh.R.* Analiz sezonnykh variatsiy kontsentratsii khlorofilla-*a* metodom estestvennykh ortogonal'nykh funktsiy v Okhotskom more po sputnikovym dannym [Description of seasonal variability of chlorophyll-*a* concentration by an empirical orthogonal function method in the Okhotsk Sea from SeaWiFS satellite data] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2007. № 6. P. 37–45 (In Russian).

*Tskhay Zh.R.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' kontsentratsii khlorofilla-*a* v poverkhnostnom sloe Okhotskogo morya i prilgayuschikh akvatoriy po sputnikovym dannym: [Spatial and temporal variability of the chlorophyll-*a* concentration on the surface of the Sea of Okhotsk and adjacent waters according to satellite data]. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchonoy stepeni kandidata geograficheskikh nauk. SakhNIRO; IMGiG DVO RAN. Yuzhno-Sakhalinsk, 2017. 24 p. (In Russian).

*Tskhay Zh.R., Khen G.V.* Sravnenie sputnikovyykh i sudovykh dannyykh o kontsentratsii khlorofilla-*a* v Okhotskom more i prilgayuschey akvatorii [The Comparison of Satellite and In Situ Chlorophyll-*a* Concentration of the Okhotsk Sea and Adjacent Waters] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2016. № 1–2. P. 187–198 (In Russian).

*Tskhay Zh.R., Shevchenko G.V., Chastikov V.N.* Anomal'noe rasprostraneniye stoka reki Amur v Okhotskom more v 2013 g. [Abnormal distribution of the Amur river runoff in the Okhotsk Sea in 2013] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2016. № 3. P. 84–88 (In Russian).

*Shevchenko G.V., Tambovskiy V.S.* Dinamika dreyfa l'da na severo-vostochnom shel'fe ostrova Sakhalin po dannym izmereniy radiolokatsionnymi stantsiyami [The ice drift dynamics on the northeastern Sakhalin Island from the measurements by radar stations]. RFFI; IMGiG DVO RAN. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 2018. 136 p. (In Russian).

*Shuntov V.P.* Biologiya dal'nevostochnyykh morey Rossii. Tom 1 [Biology of the Far Eastern seas of Russia. Volume 1]. Vladivostok: TINRO-tsentr, 2001. 580 p. (In Russian).

*Ventzel M.V., Krylov V.V., Levashova S.S.* Zakonomernosti raspredeleniya fitoplanktona po akvatorii Severno-Zapadnoy Patsifiki [Regularities in the distribution of phytoplankton in the water area of the North-West Pacific] // Morskije gidrobiologicheskie issledovaniya. M.: VNIRO, 2000. P. 11–21 (In Russian).

*Vlasova G.A., Vasilev A.S., Shevchenko G.V.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' struktury i dinamiki vod Okhotskogo morya [Spatial and-temporal variability of the structure and dynamics of the Sea of Okhotsk]. M.: Nauka, 2008. 356 p. (In Russian).