Особенности температурных условий и распределения концентрации хлорофилла *a* в Охотском море в период нереста минтая по спутниковым данным

Д. М. Ложкин¹, Ж. Р. Цхай¹, Г. В. Шевченко^{1,2}

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

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

На основе материалов многолетних спутниковых наблюдений поверхности Охотского моря в весенний период проанализирована динамика температуры воды и концентрации хлорофилла *a* в трёх биостатистических районах нереста минтая: Юго-Западной, Западной Камчатке и Северо-Восточном Сахалине. Показано, что для данного периода характерна тенденция к снижению температуры морской воды, наиболее выраженная в мае в акваториях, прилегающих к о. Сахалин. Вероятно, данные процессы обусловлены повышением температуры атмосферного воздуха в зимний период в Арктике и, как следствие, наблюдаемым с 1995 г. снижением ледовитости Охотского моря, так как уменьшение площади ледяного покрова приводит к увеличению глубины зимней конвекции. Снижение теплосодержания поверхностного слоя зафиксировано во всех районах, особенно резким оно было в 2013 г. после аномально тёплой весны 2012 г. Отмечено, что, несмотря на уменьшение площади льда, районы нереста минтая характеризуются активной фотосинтетической деятельностью и отличаются высокой биопродуктивностью, что указывает на устойчивое состояние кормовой базы этого важного промыслового объекта. У берегов Западной Камчатки в апреле и мае зоны высокой концентрации хлорофилла *a* локализованы на шельфе, а в июне отмечено их смещение к свалу глубин. На Северо-Восточном Сахалине в мае интенсивные процессы фотосинтеза происходят в центральной и южной частях побережья в районах таяния льда, а в июне — в северной части в зоне проникновения модифицированных амурских вод.

Ключевые слова: температура поверхности моря, ледовитость, фитопланктон, биопродуктивность, MODIS

Одобрена к печати: 25.02.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-230-240

Введение

Глобальное потепление наиболее ярко выражено в повышении температуры атмосферного воздуха в северных районах, в частности в Сибири, на Аляске, Северо-Западной Канаде (State..., 2018). Этот процесс оказывает значимое влияние на условия обитания и, что, вероятно, более существенно, воспроизводства ряда важных видов промысловых рыб. Одним из подобных примеров является снижение выживаемости личинок минтая, обусловленное повышением температуры морской воды в Японском море, в частности в зал. Петра Великого и у западного берега о. Хоккайдо, что привело к снижению численности популяции и, как следствие, уменьшению вылова этого ценного вида рыб как российскими, так и японскими рыбаками (Зуенко, Нуждин, 2018; Funamoto, 2011; Funamoto et al., 2014). В Охотском море указанные климатические изменения привели к устойчивому снижению его ледовитости в последние 20–25 лет (Пищальник и др., 2016), что многими авторами связывается с повышением температуры его вод (Зуенко и др., 2019; Ростов и др., 2017). Это вызывает некоторые опасения в отношении условий воспроизводства не только япономорского, но и охотоморского минтая.

В последние годы популяция охотоморского минтая, обеспечивающая 65–70 % от общероссийского ежегодного вылова этого важнейшего промыслового вида рыб, характеризуется достаточно стабильным состоянием. Вследствие важного экономического значения еже-

годному мониторингу его запасов и изучению различных влияющих факторов, в частности климатических, уделяется значительное внимание (Охотоморский..., 2019). Некоторый пробел в этом отношении — сравнительно слабое привлечение к решению указанных задач спутниковых методов, в частности данных о температуре поверхности моря и концентрации хлорофилла *a*.

Снижение ледовитости Охотского моря обусловлено тем же процессом повышения зимней температуры в Арктике, так как именно влияние холодных воздушных масс, приносимых на его акваторию характерными для зимнего муссона ветрами северного и северо-западного румбов, определяет условия льдообразования в данном бассейне. Ранее было высказано предположение, что во втором десятилетии XXI в. процесс льдообразования усилится (Хен и др., 2004), однако, по данным Японского метеорологического агентства (<http://www.data.jma.go.jp>), тенденция на снижение ледовитости сохраняется до сих пор.

Изменение площади акватории, покрытой льдом, может повлечь весьма сложные последствия и оказать существенное влияние на условия обитания промысловых рыб, в частности охотоморского минтая. Следствием углубления зимней конвекции при уменьшении площади ледяного покрова может стать падение зимней и весенней температуры морской воды (Ложкин, Шевченко, 2019; Хен и др., 2008). Уменьшение количества льда может снизить интенсивность развития фитопланктона и в итоге привести к снижению биопродуктивности вод (Матвеев, 2006; Шунтов, 2001). Поскольку нерест минтая осуществляется главным образом в весенний период, изучение этих факторов имеет большое значение для данного промыслового объекта. Исследованию этих вопросов применительно к условиям нереста охотоморского минтая на основе спутниковых данных и посвящена настоящая работа.

Материалы и методы

В Сахалинском филиале Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО) накоплен 22-летний ряд спутниковых наблюдений за температурой поверхности Охотского моря (1998–2019), что позволяет исследовать изменение термического режима во времени (в том числе температурные тренды на отдельных участках его акватории) как в целом по всему году, так и в отдельные сезоны, в частности в период промысла и нереста минтая.

Уверенный приём спутниковой информации по температуре поверхности моря (ТПМ), получаемой с помощью приёмной спутниковой станции TeraScan (<http://www.seaspace.com>), обеспечен для района с 42 по 60° с. ш. и с 135 по 160° в. д. В базе спутниковых данных института накапливаются средние месячные значения температуры поверхности моря в квадратах с пространственным разрешением около 2 км. Для каждого квадрата строился ряд средних месячных значений, для существенной части акватории имелись пропуски в зимний период из-за влияния ледяного покрова. Данные усреднялись по отдельным участкам, представляющим интерес с точки зрения изучения условий нереста минтая — так называемым биостатистическим районам, показанным на *рис. 1* (см. с. 232) (Авдеев и др., 2005). По 21-летнему ряду данных для каждого месяца интересующего сезона (апрель—июнь) методом наименьших квадратов рассчитывались параметры линейного тренда аналогично (Ложкин, Шевченко, 2019).

Материалом для исследования состояния кормовой базы в период нереста и созревания личинок минтая является информация о концентрации хлорофилла *a* 2-го уровня, предоставляемая Ocean Color Processing Group (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) по данным со сканера цвета MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) искусственного спутника Земли Aqua (Цхай, Хен, 2016). В настоящий момент в базе данных СахНИРО хранится ежесуточная информация о концентрации в районе, ограниченном координатами 135–163° в. д., 42–60° с. ш. и с пространственным разрешением около 2 км, с 2003 по 2019 г. Проецирование на координатную сетку осуществлялось при помощи программы SeaDAS (<https://seadas.gsfc.nasa.gov>). Суточные данные также осреднялись помесечно и по пространству для выбранных участков акватории Охотского моря.

Рис. 1. Биостатистические районы по оценке запаса минтая: 1, 2 — Юго-Западная, Западная Камчатка; 8 — Северо-Восточный Сахалин (из работы (Авдеев и др., 2005))

Вариации ТПМ в весенний период

Тенденции изменения температуры поверхностного слоя вод Охотского моря и прилегающих акваторий (коэффициенты линейного тренда) оценивались для различных сезонов года на основе спутниковых данных в работе (Ложкин, Шевченко, 2019). Было показано, что весной с апреля по июнь (март традиционно в Охотском море относится к зимним месяцам (Гидрометеорология..., 1998)) практически на всей изучаемой акватории в последние 20 лет преобладало снижение температуры, что объяснялось устойчивым уменьшением ледовитости в этом бассейне. Наиболее значимое снижение было отмечено в мае вблизи восточного берега о. Сахалин, в меньшей степени эта тенденция проявлялась у западного побережья Камчатки. Именно эти акватории играют наиболее важную роль в воспроизводстве охотоморского минтая (Авдеев и др., 2005).

Рассмотрим вариации температуры поверхности моря в некоторых биостатистических районах (см. рис. 1), определённых при оценке запаса минтая в Охотском море. В настоящей работе мы рассматривали районы 1 (Юго-Западная Камчатка), 2 (Западная Камчатка) и 8 (Северо-Восточный Сахалин), в пределах которых данные по температуре поверхности моря были усреднены по пространству с апреля по июнь за период 1998–2019 гг. Выбор был продиктован тем обстоятельством, что в расположенных в северной части Охотского моря районах 3–7 оказалось больше пропусков данных из-за влияния ледяного покрова, в особенности в апреле. Полученные графики приведены на рис. 2 (см. с. 233).

В апреле у западного берега Камчатки (для района 1 данные отсутствовали из-за влияния остатков ледяного покрова и облачности) и на северо-восточном шельфе Сахалина значимо выделялся более тёплыми условиями 1999 г. Особенно удивительно это для последней аква-

тории, где значение $+2^{\circ}\text{C}$ в апреле выглядит экстраординарным на фоне преимущественно отрицательных значений температуры в другие годы (единственное положительное значение в 2003 г. было лишь немногим больше $0,1^{\circ}\text{C}$).

Рис. 2. Межгодовые вариации температуры поверхности моря в биостатистических районах 1, 2 и 8 в весенний период 1998–2019 гг.

После тёплого 1999 г. термический режим во всех районах характеризовался устойчивым снижением вплоть до 2019 г., коэффициенты линейного тренда составили: $0,051$, $-0,068$ и $-0,1^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в районах 1, 2 и 8 соответственно. Отклонения от линии тренда были сравнительно невелики, вблизи Камчатки выделялся относительно тёплый 2004 г., у побережья о. Сахалин отметился резкий скачок вниз в 2013 г.

В 2019 г. было зафиксировано существенное отклонение от тенденции на снижение, особенно выраженное в восточной части Охотского моря, при этом в западной части, несмотря на относительный подъём, значение температуры воды не превысило нулевую отметку. Таким образом, впервые с 1999 г. была отмечена ледовитость на уровне максимальных значений. Это косвенно подтверждает высказанное в работе (Ложкин, Шевченко, 2019) предположение, что снижение температуры в рассматриваемом бассейне обусловлено уменьшением площади ледяного покрова.

В мае характер вариаций ТПМ в данных районах близок к рассмотренному выше, но имеются и определённые отличия (коэффициенты корреляции между рядами в апреле и в мае составили $0,59$, $0,75$ и $0,77$ для районов 1, 2 и 8 соответственно). У берегов Камчатки

наиболее тёплые условия отмечены в 2001, 2009 и 2019 гг., а самые низкие значения ТПМ — в 1998, 2000, 2013 гг. (район 1) и 2018 г. (район 2). На северо-восточном шельфе Сахалина наиболее тёплые условия зафиксированы в 1999, 2001 и 2019 гг., самые холодные отмечены в 2013–2014 гг. Тенденция к снижению температуры воды в поверхностном слое на Западной Камчатке и у берегов Сахалина осталась примерно на таком же уровне, что и в апреле: коэффициенты линейного тренда составили $-0,049$ и $-0,096$ °C/год, в то время как у юго-западного берега полуострова скорость снижения заметно уменьшилась ($-0,022$ °C/год).

После периода 2013–2018 гг., характеризовавшегося устойчиво низкими значениями ТПМ во всех районах, резко выделяется скачок, имевший место в 2019 г. Знак коэффициентов линейного тренда не изменился, но их величина заметно уменьшилась. Сложно предугадать, какие изменения термического режима могут быть в рассматриваемых районах в будущем, однако очевидно, что значительного повышения температурного фона ожидать не приходится.

Характер межгодовых вариаций ТПМ в июне имеет мало общего с наблюдавшимся в мае: максимальная величина коэффициента корреляции отмечена во 2-м районе ($r = 0,36$), что указывает на достаточно слабую статистическую связь. На Юго-Западной Камчатке самые тёплые условия отмечены в 2003 г., наиболее холодные — в 2013 г., но в целом вариация изучаемого параметра в этом районе была наименьшей ($1,8$ °C). К западу от полуострова размах колебаний ТПМ был заметно больше ($3,2$ °C), самые тёплые условия отмечены в 2008 и 2009 гг. (несколько в меньшей степени — в 2001 и 2015 гг.), а холодный температурный фон наблюдался в 2004 и 2006 гг. На северо-восточном шельфе Сахалина колебания температуры ещё более значительны ($4,4$ °C), резко выделяются как тёплый 2012 г., так и аномально холодный 2018 г. В отличие от апреля и мая 2019 г. более высокими значениями ТПМ в июне не характеризовался.

В этом месяце тенденция к снижению температуры воды в поверхностном слое сохраняется во всех районах, но значения коэффициента линейного тренда существенно уменьшаются по сравнению с маем, их величина при расчёте без учёта 2019 г. составляет $-0,007$, $-0,011$ и $-0,063$ °C/год соответственно, при его учёте скорости незначительно уменьшаются.

Выполненный анализ показал, что в районах нереста охотоморского минтая тенденция к повышению температуры морской воды отсутствует. Термические условия можно характеризовать как достаточно стабильные, с некоторым понижением, которое имеет очевидные естественные ограничения и опасности для воспроизводства популяции не представляет.

Характерные распределения концентрации хлорофилла *a*

В поверхностном слое Охотского моря внутригодовые вариации концентрации хлорофилла *a* имеют достаточно устойчивый сезонный ход (Цхай, 2017). В то же время наблюдаются значительные межгодовые колебания содержания пигмента, особенно в периоды активизации процессов фотосинтеза (таблица).

Статистические показатели средней месячной концентрации хлорофилла *a* (мг/м³) в период промысла и нереста минтая за 2003–2019 гг.

Период	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
<i>Западно-Камчатский шельф</i>						
Среднее	0,6	0,4	0,5	1,3	3,8	3,0
Стандартное отклонение	0,3	0,2	0,1	0,6	1,0	1,3
Минимум	0,3	0,2	0,2	0,3	0,8	1,0
Максимум	1,3	0,9	0,7	2,8	5,2	5,9
<i>Северная часть Охотского моря</i>						
Среднее	0,8	0,4	0,5	1,0	3,8	2,7

Окончание таблицы

Период	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Стандартное отклонение	0,4	0,2	0,1	0,6	1,3	0,9
Минимум	0,3	0,2	0,2	0,2	0,6	1,1
Максимум	1,5	0,8	0,7	2,4	6,4	4,8
<i>Северо-восточный шельф о. Сахалин</i>						
Среднее	0,5	0,4	0,4	0,6	2,9	3,9
Стандартное отклонение	0,4	0,2	0,1	0,4	1,5	1,2
Минимум	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	1,7
Максимум	2,0	0,8	0,6	1,9	5,5	5,8

Северная часть Охотского моря и северо-восточный шельф о. Сахалин в зимний период покрыты льдом. На свободной ото льда поверхности, в том числе у западного побережья Камчатки, отмечается слабая фотосинтетическая деятельность, обычно концентрация хлорофилла *a* не превышает фоновых значений (менее $0,5 \text{ мг/м}^3$). Интенсивное развитие фитопланктона начинается в апреле и совпадает с началом массового нереста минтая. Максимальный годовой пик концентрации хлорофилла *a* наблюдается в период весеннего «цветения» фитопланктона (Вентцель и др., 2000; Шунтов, 2001). В частности, в рассматриваемых биостатистических районах нереста минтая активное развитие микроводорослей происходит в мае – июне (Цхай, 2017).

У западного побережья Камчатки весеннее развитие фитопланктона разделяется на два этапа: первый — в апреле – начале мая, когда «цветением» охвачена преимущественно шельфовая зона; второй — в конце мая – июне, когда зоны повышенного продуцирования смещаются в район материкового склона. Следовательно, повышение концентрации хлорофилла *a* весной у берегов Западной Камчатки происходит от прибрежных участков к мористым, от центральной части побережья к периферии (рис. 3).

В северной части Охотского моря интенсивность весеннего «цветения» микроводорослей в большей степени связана с площадью сформировавшегося в зимний период ледяного поля, поскольку основным источником биогенных элементов в этот период является тающий лёд (Матвеев, 2006; Цхай, 2017). Низкая ледовитость в северной части Охотского моря может стать причиной слабого развития фитопланктона весной.

Рис. 3. Среднее многолетнее распределение концентрации хлорофилла *a* (мг/м^3) в весенний период 2003–2019 гг.

У северо-восточного побережья Сахалина малоледная зима также может стать причиной слабо выраженных процессов фотосинтеза в мае. Кроме того, активная фотосинтетическая деятельность в этом районе наблюдается в течение длительного периода с мая по ноябрь за счёт поступления питательных веществ из нескольких источников, прежде всего посредством речного стока.

В отличие от температуры поверхности моря средние значения концентрации хлорофилла *a* в изучаемых биостатистических районах 1, 2 и 8 не имели характерных однонаправленных тенденций (на *рис. 4* представлены соответствующие графики для периода с апреля по июнь) и в целом отмечались существенной межгодовой изменчивостью. Разница между минимальной и максимальной среднемесячной концентрацией вещества могла различаться на порядок (см. *таблицу*).

Рис. 4. Межгодовые вариации концентрации хлорофилла *a* (мг/м^3) в биостатистических районах 1, 2 и 8 в весенний период 2003–2019 гг.

Низкими концентрациями пигмента во всех биостатистических районах характеризовался 2011 г., минимум за весь анализируемый период зафиксирован и в северной части Охотского моря. Вероятно, это было обусловлено рядом сложившихся гидрологических условий: меньшей по сравнению с предыдущими годами ледовитостью Охотского моря и значительными отрицательными аномалиями температуры поверхности моря в период активной фазы развития фитопланктона весной (Цхай, 2017). В то же время при анализе вертикальных распределений хлорофилла *a* по данным *in situ* было показано, что в 2011 г. при малых кон-

центрациях на поверхности в ряде районов Охотского моря, в частности в его северной части, высокое содержание вещества наблюдалось на глубине 10–30 м (Цхай, Хен, 2020).

Таким образом, анализ распределения концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое Охотского моря показал, что зоны интенсивного нереста минтая являются в то же время районами повышенного продуцирования фитопланктона. Регулярный спутниковый мониторинг акватории позволяет выделять участки активной фотосинтетической деятельности в оперативном режиме.

Заключение

Температурные условия в Охотском море в целом и в трёх выделенных согласно работе (Авдеев и др., 2005) по показателям распределения молоди минтая биостатистических районах (Юго-Западная, Западная Камчатка, Северо-Восточный Сахалин) характеризовались как стабильные, с некоторой тенденцией к снижению в период нереста минтая (апрель – июнь). Особенно проявляется снижение теплосодержания поверхностного слоя вод в мае у восточных берегов о. Сахалин, и самый существенный скачок температуры в сторону понижения отмечен в 2013 г. Наиболее вероятная причина снижения температуры воды в данном бассейне — глобальное потепление, выраженное в повышении температуры атмосферного воздуха в зимний период в Арктике, в результате чего в последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция к снижению ледовитости Охотского моря (что, в свою очередь, приводит к увеличению глубины зимней конвекции). Последствия этих климатических изменений для популяции охотоморского минтая ещё предстоит изучить, но очевидно, что для её воспроизводства они угрозы не представляют.

У берегов Западной Камчатки в период весенней фазы развития фитопланктона зона высоких значений концентрации хлорофилла *a* распространяется от побережья в мористую часть. В апреле она локализуется преимущественно в районе шельфа, а в мае и июне смещается в сторону свала глубин. На северо-восточном шельфе Сахалина в мае наиболее активная фотосинтетическая деятельность происходит в районах интенсивного таяния льда. В июне максимумы хлорофилла *a* наблюдаются в северной части, куда поступают богатые биогенными веществами воды стока р. Амур.

Показанные в работе межгодовые вариации температуры поверхности моря не стали причиной существенных однонаправленных изменений концентрации хлорофилла *a* в биостатистических районах Охотского моря. В целом районы промысла и нереста минтая характеризуются активной фотосинтетической деятельностью в весенний период и отличаются высокой биопродуктивностью, что указывает на устойчивое состояние кормовой базы этого важного промыслового объекта.

Вероятно, выводы об устойчивом температурном режиме и состоянии кормовой базы относятся и к другим районам нереста минтая, не охваченным в данной работе. Регулярный спутниковый мониторинг позволяет в оперативном режиме проанализировать изменения гидрологических и биотических условий поверхности Охотского моря.

Литература

1. Авдеев Г. В., Овсянникова С. Л., Овсянников Е. Е. Результаты оценки запаса минтая в северной части Охотского моря по ихтиопланктонной съемке в 2004 г. // Вопросы рыболовства. 2005. Т. 6. № 2(22). С. 298–325.
2. Вентцель М. В., Крылов В. В., Левашова С. С. Закономерности распределения фитопланктона по акватории Северно-Западной Пацифики // Морские гидробиолог. исслед.: сб. науч. тр. М.: ВНИРО, 2000. С. 11–21.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9: Охотское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 342 с.
4. Зуенко Ю. И., Нурждин В. А. Влияние современных изменений океанологических условий в Японском море на состояние запасов приморской популяции минтая // Вопросы рыболовства. 2018. Т. 19. № 3. С. 377–386.

5. Зуенко Ю. И., Асеева Н. Л., Глебова С. Ю., Гостренко Л. М., Дубинина А. Ю., Дулепова Е. П., Золотов А. О., Лобода С. В., Лысенко А. В., Матвеев В. И., Муктепавел Л. С., Овсянников Е. Е., Фигуркин А. Л., Шатилина Т. А. Современные изменения в экосистеме Охотского моря (2008–2018 гг.) // Изв. Тихоокеанского научно-исслед. рыбохозяйств. центра. 2019. Т. 197. С. 35–61.
6. Ложкин Д. М., Шевченко Г. В. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным 1998–2017 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 55–61.
7. Матвеев В. И. Гидрохимические условия биологической продуктивности Охотского моря: дис. ... канд. геогр. наук. Владивосток: ТИНРО, 2006. 141 с.
8. Охотоморский минтай (Путинный прогноз). Владивосток: ТИНРО-Центр, 2019. 69 с.
9. Пищальник В. М., Романюк В. А., Минервин И. Г., Батухтина А. С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1988 по 2015 гг. // Изв. Тихоокеанского научно-исслед. рыбохозяйств. центра. 2016. Т. 185. С. 1–12.
10. Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Воронцов А. А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов Охотского моря за последние десятилетия // Изв. Тихоокеанского научно-исслед. рыбохозяйств. центра. 2017. Т. 191. С. 176–195.
11. Хен Г. В., Устинова Е. И., Фигуркин А. Л., Зуенко Ю. И., Новиков Ю. В., Сорокин Ю. Д., Гаманюк М. В. Гидрологические условия северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей в начале XXI века и ожидаемые тенденции // Вопросы промысловой океанологии. 2004. Вып. 1. С. 40–58.
12. Хен Г. В., Басюк Е. О., Сорокин Ю. Д., Устинова Е. И., Фигуркин А. Л. Термические условия на поверхности Берингова и Охотского морей в начале 21-го века на фоне полувековой изменчивости // Изв. Тихоокеанского научно-исслед. рыбохозяйств. центра. 2008. Т. 153. С. 254–263.
13. Цхай Ж. Р. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-*a* в поверхностном слое Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Южно-Сахалинск, 2017. 24 с.
14. 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.
15. Цхай Ж. Р., Хен Г. В. Оценка общего содержания хлорофилла-*a* в Охотском море с использованием спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 6. С. 34–46.
16. Шунтов В. П. Биология дальневосточных морей России. Т. 1. Владивосток: ТИНРО-центр, 2001. 580 с.
17. Funamoto T. Causes of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) recruitment decline in the northern Sea of Japan: implications for stock management // Fisheries Oceanography. 2011. V. 20. Iss. 2. P. 95–103.
18. Funamoto T., Yamamura O., Shida O., Itaya K., Mori K., Hiyama Y., Sakurai Y. Comparison of factors affecting recruitment variability of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the Pacific Ocean and the Sea of Japan off northern Japan // Fish Science. 2014. V. 80. P. 117–126. DOI: 10.1007/s12562-014-0716-z.
19. State of the Climate in 2017 // Bull. American Meteorological Society / eds. Blunden J., Arndt D. S., Hartfield G. 2018. V. 99. No. 8. P. Si–S332. DOI: 10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1.

Features of temperature conditions and distribution of chlorophyll *a* concentration in the Sea of Okhotsk during pollock spawning from satellite data

D. M. Lozhkin¹, Zh. R. Tskhay¹, G. V. Shevchenko^{1,2}

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Sakhalin Branch
Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia

E-mails: dima-lm@rambler.ru, tshay@yandex.ru, shevchenko_zhora@mail.ru

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

Based on long-term satellite observations of the surface of the Sea of Okhotsk in the spring period, the dynamics of water temperature and chlorophyll *a* concentration in three biostatistical pollock spawning areas, southwestern and western Kamchatka and northeastern Sakhalin, are analyzed. It is shown that

this period is characterized by a downward trend in sea surface temperature, most pronounced in May in waters adjacent to Sakhalin Island. These processes are probably caused by an increase in atmospheric temperature during the winter in the Arctic and, as a result, a decrease in the Sea of Okhotsk ice cover, because a decrease in ice cover area leads to an increase in the depth of winter convection. The decrease in the heat content of the surface layer was observed in all regions, especially sharp in 2013 after the abnormally warm spring of 2012. Despite the decrease in the ice area, pollock spawning areas are characterized by active photosynthetic activity and high bio-productivity, which indicates a stable state of the food supply of this important fishing object. Off the coast of western Kamchatka in April and May, zones of high concentrations of chlorophyll *a* are localized on the shelf, and in June, their displacement to the continental slope is noted. In northeastern Sakhalin, intensive photosynthesis processes occur in the central and southern part of the coast in the areas of ice melting in May, and in June — in the northern part in the zone of penetration of modified Amur waters.

Keywords: sea surface temperature, ice coverage, phytoplankton, bio-productivity, MODIS

Accepted: 25.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-230-240

References

1. Avdeev G. V., Ovsyannikova S. L., Ovsyannikov E. E., Estimation of walleye pollock stock in the northern Okhotsk Sea by results of ichthyoplankton survey 2004, *Voprosy rybolovstva*, 2005, Vol. 6, No. 2(22), pp. 298–325 (in Russian).
2. Venttsel M. V., Krylov V. V., Levashova S. S., Regularities in the distribution of phytoplankton in the water area of the North-West Pacific, In: *Morskie gidrobiologicheskie issledovaniya*, Moscow: VNIRO, 2000, pp. 11–21 (in Russian).
3. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei*, T. 9: *Okhotskoe more*, Vyp. 1: *Gidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, Vol. 9, Okhotskoe more, Issue 1, *Gidrometeorologicheskie usloviya*), Saint Petersburg: *Gidrometeoizdat*, 1998, 342 p. (in Russian).
4. Zuenko Yu. I., Nuzhdin V. A., Impact of modern changes of oceanographic conditions in the Japan Sea on state of the Primorye pollock population, *Voprosy rybolovstva*, 2018, Vol. 19, No. 3, pp. 377–386 (in Russian).
5. Zuenko Yu. I., Aseeva N. L., Glebova S. Yu., Gostrenko L. M., Dubinina A. Yu., Dulepova E. P., Zolotov A. O., Loboda S. V., Lysenko A. V., Matveev V. I., Muktepavel L. S., Ovsyannikov E. E., Figurkin A. L., Shatilina T. A., Recent changes in the Okhotsk Sea ecosystem (2008–2018), *Izvestiya Tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybokhozyaistvennogo tsentra*, 2019, Vol. 197, pp. 35–61 (in Russian).
6. Lozhkin D. M., Shevchenko G. V., Trends in sea surface temperature of the Sea of Okhotsk and adjacent water areas by satellite data in 1998–2017, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 1, pp. 55–61 (in Russian).
7. Matveev V. I., *Gidrokhimicheskie usloviya biologicheskoi produktivnosti Okhotskogo morya: Diss. kand. geogr. nauk* (Hydrochemical conditions of the Okhotsk Sea biological productivity: Cand. geogr. sci. thesis), Vladivostok: TINRO, 2006, 141 p. (in Russian).
8. *Sea of Okhotsk pollock (Fishing season forecast)*, Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2019, 69 p. (in Russian).
9. Pishchalnik V. M., Romanyuk V. A., Minervin I. G., Batukhtina A. S., Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015, *Izvestiya Tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybokhozyaistvennogo tsentra*, 2016, Vol. 185, pp. 1–12 (in Russian).
10. Rostov I. D., Dmitrieva E. V., Vorontsov A. A., Trends in climatic changes in the thermal conditions of the coastal areas of the Sea of Okhotsk over the last decades, *Izvestiya Tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybokhozyaistvennogo tsentra*, 2017, Vol. 191, pp. 176–195 (in Russian).
11. Khen G. V., Ustinova E. I., Figurkin A. L., Zuenko Yu. I., Novikov Yu. V., Sorokin Yu. D., Gamanyuk M. V., Hydrological conditions of the northwestern Pacific and the Far Eastern seas at the beginning of the 21st century and expected trends, *Voprosy promyslovoi okeanologii*, 2004, Issue 1, pp. 40–58 (in Russian).
12. Khen G. V., Basyuk E. O., Sorokin Yu. D., Ustinova E. I., Figurkin A. L., Surface thermal conditions in the Bering and Okhotsk Seas in the early 21 Century against previous semi-centennial changes, *Izvestiya Tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybokhozyaistvennogo tsentra*, 2008, Vol. 153, pp. 254–263 (in Russian).
13. Tskhai Zh. R., *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' kontsentratsii khlorofilla-a v poverkhnostnom sloe Okhotskogo morya i prilgayushchikh akvatorii po sputnikovym dannym: Avtoref. diss. kand. geogr. nauk* (Spatio-temporal variability of chlorophyll-a concentrations in the surface layer of the Sea of Okhotsk

- and adjacent waters according to satellite data: Ext. abstract Cand. geogr. sci. thesis), Yuzhno-Sakhalinsk, 2017, 24 p.
14. Tskhai 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).
 15. Tskhai Zh. R., Khen G. V., Estimation of the total chlorophyll-*a* content in the Sea of Okhotsk using satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 6, pp. 34–46 (in Russian).
 16. Shuntov V. P., *Biologiya dal'nevostochnykh morei Rossii* (Biology of Far Eastern Seas of Russia), Vol. 1, Vladivostok: TINRO-tsentr, 2001, 580 p. (in Russian).
 17. Funamoto T., Causes of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) recruitment decline in the northern Sea of Japan: implications for stock management, *Fisheries Oceanography*, 2011, Vol. 20, Issue 2, pp. 95–103.
 18. Funamoto T., Yamamura O., Shida O., Itaya K., Mori K., Hiyama Y., Sakurai Y., Comparison of factors affecting recruitment variability of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the Pacific Ocean and the Sea of Japan off northern Japan, *Fish Science*, 2014, Vol. 80, pp. 117–126, DOI: 10.1007/s12562-014-0716-z.
 19. State of the Climate in 2017, In: *Bull. American Meteorological Society*, Blunden J., Arndt D. S., Hartfield G. (eds.), 2018, Vol. 99, No. 8, pp. Si–S332, DOI: 10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1.