УДК 551.46.06 УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ГИДРОБИОНТОВ

ВЛИЯНИЕ СТОКА РЕКИ АМУР НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *А* В АМУРСКОМ ЛИМАНЕ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ

Ж. Р. Цхай¹ (tshaijr@sakhniro.vniro.ru), Г. В. Шевченко^{1, 2}

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (ФГБНУ «ВНИРО»)

¹ Сахалинский филиал («СахНИРО») Россия, г. Южно-Сахалинск, 693023, ул. Комсомольская, 196

² Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) Россия, г. Южно-Сахалинск, 693022, ул. Науки, 1 б

Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В. Влияние стока реки Амур на пространственные распределения температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла *а* в Амурском лимане и прилегающих акваториях // Результаты Второй Амурской экспедиции. Т. 2 : Труды «СахНИРО». – Южно-Сахалинск : «СахНИРО», **2023.** – Т. 19, ч. II. – С. 117–133.

На основе данных спутниковых наблюдений изучена пространственно-временная изменчивость температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла *а* в зоне влияния стока реки Амур (Амурский лиман, Сахалинский залив, северная часть Татарского пролива). Описаны общие закономерности и сезонные особенности распределения модифицированных вод, характеризующихся более высокими значениями температуры и содержания хлорофилла *а* по сравнению с морскими акваториями. Разложение полей изучаемых параметров по естественным ортогональным функциям выявило климатический сдвиг, выраженный во временных функциях второй и третьей мод и показывающий изменения с 2010 г. термических условий и, как следствие, существенное повышение температуры и снижение концентрации хлорофилла *а* в зоне распресненных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температура поверхности моря, концентрация хлорофилла *a*, спутниковые данные, речной сток, модифицированная вода, метод естественных ортогональных функций.

Табл. – 1, ил. – 11, библиогр. – 23.

Tskhay Zh. R., Shevchenko G. V. Influence of the Amur River runoff on the spatial distributions of sea surface temperature and chlorophyll *a* concentrations in the Amur Liman and adjacent areas // Results of the Second Amur expedition. Vol. 2 : Transactions of the "SakhNIRO". – Yuzhno-Sakhalinsk : "SakhNIRO", **2023.** – Vol. 19, part II. – P. 117–133.

Based on satellite observations, the spatial and temporal variability of sea surface temperature and chlorophyll *a* concentration in the Amur River runoff zone (Amur Liman, Sakhalin Bay, northern part of the Tatar Strait) was studied. The general patterns and seasonal features of the distribution of modified water characterized by higher values of temperature and chlorophyll *a* content compared to sea water are described. Decomposition of the fields of the studied parameters by empirical orthogonal functions revealed a climatic shift expressed in the time functions of the second and third modes and showing changes in thermal conditions since 2010 and, as a consequence, a significant increase in temperature and a decrease in the chlorophyll *a* concentration in the desalinated water.

KEYWORDS: sea surface temperature, chlorophyll *a* concentration, satellite data, river runoff, modified water, method of empirical orthogonal functions.

Tabl. – 1, fig. – 11, ref. – 23.

введение

Река Амур является крупнейшей рекой Дальнего Востока России (годовой объем стока – около 400 км³), она оказывает влияние на гидрологические условия не только своего естественного эстуария – Амурского лимана, но и на прилегающие акватории, прежде всего на Сахалинский залив Охотского моря и северную часть Татарского пролива Японского моря. В эстуарии речная вода смешивается с морской, и формируется распресненная модифицированная вода, которая прослеживается благодаря низким значениям солености вдоль восточного берега о. Сахалин до его юго-восточной оконечности (м. Анива), а также в северной части Татарского пролива (Шевченко и др., 2011; Шевченко, Частиков, 2019, 2021). Также эта вода четко идентифицируется по распределениям температуры поверхности моря (ТПМ) из-за более высоких значений указанного параметра. Данное обстоятельство использовалось в ряде работ (Ростов, Жабин, 1991; Жабин и др., 2007, 2010; Андреев, 2019) для изучения распространения стока реки Амур, в том числе в период проведения морских экспедиций ТОИ ДВО РАН в Амурском лимане и Сахалинском заливе.

Исследование пространственной изменчивости сезонных вариаций содержания хлорофилла *a* в поверхностном слое Амурского лимана было выполнено по ряду наблюдений со спектрорадиометров SeaWiFS за 2001–2004 гг. и MODIS за 2002–2013 гг. (Цхай, 2005, 2017). Кроме того, на основе анализа спутниковых данных о концентрации пигмента и материалов гидрологических съемок было определено аномальное опресняющее действие стока р. Амур на морские воды шельфовой зоны восточного Сахалина и северной части Татарского пролива в 2013 г. (Цхай и др., 2016).

Таким образом, основное внимание в предыдущих исследованиях было уделено анализу отдельных ситуаций. Систематизация информации и оценка пространственно-временной изменчивости ТПМ и содержания пигмента в районах, подверженных влиянию модифицированной воды, не проводились. Цель работы — описать пространственно-временную изменчивость температурных условий и концентрации хлорофилла *a*, а также особенности распространения модифицированной воды стока реки Амур в прилегающих морских акваториях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для исследования послужили данные по температуре поверхности моря за 1998–2021 гг., полученные установленной в «СахНИРО» приемной станцией TeraScan со спутников серии NOAA в районе с координатами 139°42′–142°42′ в. д., 47°42′–54°42′ с. ш. (рис. 1). Также в работе использована ежесуточная информация о концентрации хлорофилла *а* 2-го уровня со сканера цвета MODIS искусственного спутника Земли Aqua, предоставленная Ocean Color Processing Group (*https://oceancolor.gsfc.nasa.gov*) за период с 2003 по 2021 г. Проецирование значений на координатную сетку осуществлялось при помощи программы SeaDAS (*https://seadas.gsfc.nasa. gov/*). Итоговое пространственное разрешение анализируемых параметров составило около 2 км с временной дискретностью в один месяц.



Puc. 1. Карта-схема района исследований **Fig. 1.** Map-scheme map of the study area

Рассматривались ежемесячные сведения о расходе реки Амур в замыкающем створе близкого к устью уровенного поста Богородское за 1998–2020 гг. (данные за 2003 г. отсутствовали), любезно предоставленные сотрудником ФГБНУ «ВНИРО» С. Л. Гориным.

Для анализа полученных трехмерных пространственно-временных матриц использовались метод разложения по естественным ортогональным функциям (ЕОФ), обычно применяющийся при изучении гидрометеорологических полей (Багров, 1959), и иные стандартные методы статистического анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная и межгодовая динамика стока реки Амур. На рисунке 2 представлена усредненная за 1998–2020 гг. кривая годового хода расхода воды. Внутригодовая динамика характеризовалась низкими значениями с декабря по апрель (менее 5 000 м³/с) и высокими в мае–октябре, а также наличием выраженных максимумов в июне и сентябре. Усиление стока в мае–июне обусловлено таянием снега в бассейне реки (весеннее половодье), а в августе–октябре – обильными осадками в результате активной циклонической деятельности. В ноябре сток Амура уже существенно снижается.



Рис. 2. График усредненной кривой годового хода расхода р. Амур по данным наблюдений на уровенном посту Богородское за 1998–2020 гг.

Fig. 2. Average curve graph of the Amur River annual flow rate according to observation data at the Bogorodskoye level post for 1998–2020

Межгодовая изменчивость расхода воды оценивалась посезонно (**рис. 3**), причем для каждого сезона рассчитывалась сумма значений за два месяца: весной – в мае–июне, летом – в августе–сентябре, осенью – в октябре–ноябре. На графиках видно, что в 2009–2010 гг. в характере стока р. Амур произошли существенные изменения. Если до этого преобладала слабовыраженная тенденция к уменьшению расхода, и его колебания были сравнительно невелики, то потом наблюдался общий рост параметра вне зависимости от сезона и отмечались интенсивные короткопериодные вариации. Наиболее существенны эти вариации были в летний период, при этом значимо выделялись годы экстремально высокого стока – в 2009, 2013, 2019 гг.



Рис. 3. Межгодовые вариации расхода р. Амур весной (май–июнь), летом (август–сентябрь) и осенью (октябрь–ноябрь) на уровенном посту Богородское за 1998–2020 гг. **Fig. 3.** Interannual variations in Amur River flow rate in spring (May–June), summer (August– September) and autumn (October–November) at the Bogorodskoye level post for 1998–2020

Усредненные распределения ТПМ. На рисунке 4 показаны средние многолетние распределения температуры поверхности моря в изучаемом районе в различные сезоны. Зимние условия не представляют большого интереса, так как длительное время с января по апрель значительная часть акватории покрыта льдом. В зимний период расход Амура минимален и практически не проявляется в распределении температуры поверхности моря.





Fig. 4. Spatial distributions of average long-term values of sea surface temperature (°C) in the study area

Влияние стока начинает сказываться в мае, когда происходит взлом ледяного покрова в устье реки и значительный объем воды, обусловленный весенним половодьем, начинает поступать в Амурский лиман (*см.* рис. 4). В его северозападной части формируется область, в которой значения температуры поверхности моря (6–7°С) существенно выше, чем на остальной акватории (1,2–2,0°С). Близкие значения ТПМ характерны и для Сахалинского залива, где они изменяются от 0,6°С на северо-западе до 2,3°С в центральной его части.

В июне вода речного половодья заполняет практически весь Амурский лиман (*см.* рис. 4). Образуется зона, примыкающая к берегу между мысами Пронге и Джаоре, вытянутая в направлении Сахалинского залива, в которой температура воды превышает 15°С. Удивительно, что непосредственно на участке устьевого взморья значения ТПМ меньше – около 13°С. Самые низкие температуры отмечаются в юго-восточной части лимана вблизи берега о. Сахалин (11–12°С), а в проливе Невельского они падают до 10°С.

Значительные различия в значениях ТПМ наблюдаются в этот период и в Сахалинском заливе. Модифицированная вода образует стоковую линзу с температурой воды $11-12^{\circ}$ С на верхней границе Амурского лимана и распространяется вдоль побережья о. Сахалин к его северной оконечности ($10-11^{\circ}$ С). Отклонение речного стока в северо-восточном направлении под влиянием силы Кориолиса характерно в морских акваториях Северного полушария (**Боуден**, **1998**). В то же время в противоположной части Сахалинского залива западнее м. Литке обнаруживается более холодная вода с температурой 2,7–3,2°С. В Татарском проливе значения ТПМ относительно высокие – $8-9^{\circ}$ С, они возрастают до $10-11^{\circ}$ С у западного побережья острова и до $11-12^{\circ}$ С в районе пролива Невельского.

Летом при значительном росте термических показателей практически сохраняется весенняя структура пространственного распределения ТПМ. В северо-западной части Амурского лимана они увеличиваются до 20°С, а в юго-восточной части – до 17°С. В Сахалинском заливе четко прослеживается зона движения модифицированной воды стока Амура вдоль п-ова Шмидта. При этом в западной части залива температура ниже 12°С. В южной части Татарского пролива вплоть до 50° с. ш. явно выделяется зона влияния теплого Цусимского течения, движущегося вдоль западного берега о. Сахалин (*см.* рис. 4).

Осенью, в октябре происходят существенные изменения в пространственном распределении ТПМ, вызванные как общим выхолаживанием поверхностного слоя воды, так и перестройкой поля ветра от летнего муссона к зимнему, сопровождаемой сильными и устойчивыми ветрами северного и северо-западного румбов (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1998). Под их действием теплая вода оттесняется от побережья Сахалина как в Амурском лимане, так и в Татарском проливе. Более сильный прогрев, в отличие от весны и лета, отмечается на приустьевом участке реки Амур с температурой около 8°C. На остальной части акватории значения ТПМ несколько ниже – от 6 до 7°C. В Сахалинском заливе распределение температуры становится однородным (7–8°C). В ноябре в Амурском лимане значения температуры ниже, чем в прилегающих акваториях, они изменяются от 0,8 до 1,5°C. Вероятно, быстрому выхолаживанию способствует мелководность данной акватории. В декабре значительная ее часть уже покрыта льдом. На **рисунке 5** представлен график вариаций ТПМ в изучаемом районе. В этих колебаниях явно доминирует годовой ход, также просматривается и межгодовая изменчивость, выраженная главным образом в низкочастотной модуляции летних максимумов. Наиболее ярко эта особенность выражена на начальном интервале наблюдений до 2012 г. с периодом огибающей около 6 лет. Следует отметить, что коэффициент корреляции между среднемесячными расходами (пост Богородское) и ТПМ в рассматриваемом районе равен 0,74, что указывает на существенное влияние опресненных вод на термический режим значительной морской акватории в течение всего года.





Fig. 5. Variations of average monthly values of sea surface temperature (°C) in the study area from 1998 to 2021

Межгодовые вариации термических условий также существенны. Наиболее значимый максимум отмечался в августе 2006 г. (выше 18°C), тогда как лето 2002 и 2009 гг. характеризовалось наиболее низкими показателями (13–14°C), разница между самым теплым и холодным годами составила 6°C. После 2012 г. экстремумы стали слабовыраженными, в августе 2019 г. среднемесячная температура составила 15°C. Отметим также начавшееся с 2012 г. усиление зимних минимумов, что согласуется с обнаруженной ранее тенденцией к снижению температуры в холодный период года в замерзающих акваториях (**Ложкин**, **Шевченко**, **2019**). Усредненная кривая годового хода ТПМ имеет максимальное значение в августе (16°C) и минимальное в марте ($-0,4^{\circ}$ C), хорошо описывается комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 8 и 2,3°C. Интересно относительно низкое для теплого сезона значение среднеквадратического отклонения в сентябре – 0,9 (в июне–августе – 1,1), что указывает на более стабильные термические условия в этот период по сравнению с летними месяцами.

Разложение поля ТПМ по ЕОФ. На первые три основные моды приходится 96, 1,1 и 0,7% дисперсии параметра соответственно. Их временные функции и пространственные распределения представлены на **рисунке 6.**





Fig. 6. Time functions (°C) and spatial distributions of the first two modes of SST decomposition by EOF

Первая мода определяет структуру вариаций температуры поверхности моря, которые происходят во всей области синфазно. Она не имеет узловых линий, все значения положительные, их величина выражает, главным образом, интенсивность летнего прогрева, рассмотренного выше. Временная функция первой моды идентична ходу осредненных значений ТПМ (коэффициент корреляции между рядами r=0,998).

Остановимся подробнее на второй моде, которая, как правило, включает сезонные и межгодовые особенности распределения изучаемого параметра. Пространственное распределение второй моды характеризуется наличием узловой линии, разделяющей области с положительными и отрицательными значениями. Положительные значения отмечаются на акватории Амурского лимана и Сахалинского залива (за исключением прибрежного участка западнее м. Литке), а также в северной части Татарского пролива вдоль западного побережья о. Сахалин до м. Ламанон. Максимальные значения фиксировались непосредственно в устье р. Амур и в зал. Счастья, а минимальные отрицательные (-1) – в центральной части Татарского пролива вблизи южной границы рассматриваемой области.

Колебания временной функции второй моды с января по апрель изменяются незначительно, ее значения отрицательные и близки к нулю. С мая по ноябрь в динамике временного ряда выделяются два периода: 1998–2009 гг. и 2010–2021 гг. На первом промежутке времени в течение года значения усредненной кривой отрицательные с экстремумами в октябре ($-1,7^{\circ}$ C) и ноябре ($-1,4^{\circ}$ C), за исключением двух близких к нулю величин в июне и июле (**рис.** 7). Во втором случае осредненные показатели в мае–сентябре становятся положительными, а значения в июне–августе увеличиваются на 1,5–2,0°C. Величины октябрьского и ноябрьского отрицательных минимумов также возрастают и близки к -1° C.



Рис. 7. Средние значения временной функции второй и третьей мод разложения ТПМ по ЕОФ за периоды 1998–2009 гг. и 2010–2021 гг.

Fig. 7. Average values of the time function of the second and third modes of SST decomposition by EOF for the periods 1998–2009 and 2010–2021

Такая кардинальная перемена означает существенные изменения термических условий прежде всего на акватории Амурского лимана в целом и на устьевом взморье р. Амур в особенности. Если в начале 2000-х гг. в июле поправка к основному распределению ТПМ составляла 0,1°C на акватории Амурского лимана и 0,3°C непосредственно в районе устья, то после 2010 г. она увеличилась до 2,9 и 5,8°C соответственно. В августе отрицательные поправки (-1,2°C в лимане и -2,4°C в устье) на рубеже 2010-х гг. практически зеркально сменились на положительные (1,3 и 2,5°C).

Пространственное распределение третьей моды принимает величины разных знаков на акватории Амурского лимана: около –1 на основной части его акватории и 2,5–3 на приустьевом участке. В Сахалинском заливе и Татарском проливе значения пространственной функции близки к нулю. Временная функция третьей моды также изменилась на рубеже 2010-х гг., исчезли отрицательные минимумы в летний период. Если в июле на первом интервале наблюдений эта составляющая вносила отрицательную поправку более 4°C вблизи устья реки Амур, то в последние годы она положительная и составляет 1–1,5°C, что указывает на существенные изменения термических условий на этом участке лимана.

Таким образом, отмеченные вариации и изменения внутригодовой структуры второй и третьей мод в начале 2010-х гг. на акватории Амурского лимана значимы и могут рассматриваться как климатический сдвиг. Поскольку он наблюдается главным образом в эстуарии реки и слабо проявляется в прилегающих акваториях, вероятной его причиной могли быть изменения в объеме стока в теплый период года, о которых говорилось выше.

Распределение концентрации хлорофилла *а*. Высокое содержание биогенных веществ в речном стоке приводит к увеличению концентрации хлорофилла *а* в модифицированной воде (Шевченко и др., 2013), хотя идентифицировать ее по этому признаку удается не всегда, так как на количественные показатели пигмента могут влиять различные факторы (Цхай, 2017). В ходе исследования были построены карты средних многолетних концентраций вещества по месяцам. На рисунке 8 представлены наиболее показательные распределения хлорофилла *а* в течение года.





Fig. 8. Spatial distributions of average long-term values of chlorophyll a concentration in the study area

Зимой акватория Амурского лимана, Сахалинского залива и северной части Татарского пролива покрыта льдом. На свободной ото льда поверхности южной части Татарского пролива наблюдается слабая фотосинтетическая деятельность (табл.).

Таблица

Средняя месячная концентрация хлорофилла *a* (мг/м³) в районах проникновения модифицированных вод р. Амур по спутниковым данным за 2003–2021 гг.

Table

Average monthly concentration of chlorophyll *a* (mg/m³) in areas of penetration of Amur River modified waters according to satellite data for 2003–2021

Район	Месяц											
	Ι	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Х	XI	XII
Северная часть Татарского пролива	1,7	2,2	2,7	3,5	4,5	3,8	2,3	2,1	2,9	4,4	5,3	3,3
Амурский лиман	0,6	0,7	1,0	3,6	17,1	17,5	16,8	17,2	17,2	17,4	16,7	2,2
Сахалинский залив	0,4	0,4	0,3	0,9	8,0	10,8	7,6	7,7	9,1	7,2	4,1	1,8

Значимое возрастание содержания пигмента начинается в мае. Концентрация вещества увеличивается в Амурском лимане и Сахалинском заливе (*см.* рис. 8). Очевидно, что интенсификация процессов фотосинтеза в данном случае не связана со стоком Амура, так как по температурным данным его влияние ограничено сравнительно небольшим участком вблизи устья реки (*см.* рис. 4). Наиболее вероятной причиной размножения фитопланктона в этот период являлось появление зон таяния льда (Satoru et al., 2000; Шунтов, 2001; Матвеев, 2006).

В июне продолжается усиление процессов фотосинтеза, прежде всего в прибрежных районах. На развитие микроводорослей в этот период влияет сложный комплекс факторов. Это и прогрев поверхностного слоя до оптимальных температур (Цхай, 2007), и усиливающийся сток обширной сети небольших материковых и сахалинских рек, несущих биогенные элементы, и таяние остатков ледяного покрова, которое в зоне прибрежного мелководья происходит медленнее, чем на более глубоководных участках, из-за торошения льда, формирования наледей, и т. д. В конце мая уже вскрывается «ледяная дамба» на северной границе Амурского лимана, которая в холодный период года препятствует водообмену с Сахалинским заливом, и модифицированная вода начинает двигаться, огибая п-ов Шмидта, на северо-восточный шельф о. Сахалин (Иванов и др., 2011; Шевченко, Тамбовский, 2018; Шевченко, Частиков, 2019).

Высокие концентрации хлорофилла *а* отмечаются в районах стока р. Амур в северном направлении. В Сахалинском заливе значимо выделяется прибрежная полоса вдоль западного побережья о. Сахалин. Здесь сказываются как влияние модифицированной воды стока Амура, так и таяние остатков тяжелых торошенных льдов, которые формируются в результате сильных приливов и прижимных ветров северного и северо-западного румбов. В южном направлении амурского стока концентрация вещества падает. В Татарском проливе по мере удаления от берега содержание пигмента уменьшается до фоновых показателей (менее 1 мг/м³). С июля по сентябрь распределение концентрации хлорофилла *а* имеет идентичный характер. В Амурском лимане высокие значения параметра отмечены в прибрежных мелководных районах, в то время как в области глубоководного фарватера они ниже. В восточной части Сахалинского залива отчетливо выделяется зона высокого содержания пигмента, совпадающая с областью распространения модифицированных вод, которая определяется по температурным данным спутниковых наблюдений. В северной части Татарского пролива область с высоким содержанием вещества сужается и сохраняется только в прибрежной зоне в районе пролива Невельского. В августе площадь массового размножения фитопланктона в этом районе минимальна.

Осенью происходят заметные изменения в характере распределения хлорофилла *а* в поверхностном слое, обусловленные, вероятно, перестройкой поля ветра к зимнему муссону. Оно наиболее выражено в сокращении зоны высоких концентраций в Сахалинском заливе и ее расширении в северной части Татарского пролива. На устьевом взморье Амура и прилегающих акваториях сохраняются высокие значения параметра, в то время как в центральной и восточной частях лимана, включая прибрежную зону о. Сахалин, они снижаются. В ноябре зоны с высокими концентрациями хлорофилла *а* в Сахалинском заливе существенно сокращаются до узкой полосы у побережья о. Сахалин.

На севере Татарского пролива область с концентрацией пигмента выше 3 мг/м³ в октябре достигает 51-й параллели, а в ноябре распространяется равномерно по всей акватории далее на юг до 50° с. ш. В декабре на акватории Амурского лимана формируется ледяное поле. В прилегающих районах температура воды уменьшается до нуля, условия для развития фитопланктона становятся неблагоприятными.

На **рисунке 9** представлен график вариаций концентрации хлорофилла *a*, усредненных по всей площади изучаемого района. В них обращает на себя внимание выраженный сезонный ход, характер которого изменился начиная с 2016 г. На первом промежутке времени (2003–2015 гг.) основной максимум приходился на май либо июнь (4,5 и 5,8 мг/м³), второй наблюдался осенью, в сентябре и октябре (4,6 и 4,4 мг/м³). На следующем интервале времени ситуация заметно изменилась: весенний максимум отмечался только в мае (4,9 мг/м³), а осенний сместился на октябрь и ноябрь (4,6 и 4,8 мг/м³). При этом минимальные значения в зимний период (январь–февраль) возросли примерно вдвое, а в декабре – в три раза. Это может быть обусловлено уменьшением ледовитости в данном районе по причине глобального потепления (**Пищальник и др., 2019**) и, как следствие, более длительным сохранением благоприятных для развития микроводорослей температур (**Цхай, 2013**).

Расчет параметров годовой и полугодовой гармоник показал, что они также заметно изменились в последние годы. Если по первому интервалу наблюдений главной была годовая составляющая с амплитудой 2,1 мг/м³, то по второму ее величина уменьшилась до 0,9 мг/м³ и основной стала полугодовая составляющая. Отметим также, что экстремальный паводок Амура, имевший место летом 2013 г., не отразился в интенсификации процессов фотосинтеза в Амурском лимане и прилегающих акваториях (заметный максимум был в ноябре в северной части Татарского пролива), как, впрочем, и в температуре поверхности моря. Тем не менее коэффициент корреляции между расходом воды в р. Амур и содержанием хлорофилла *а* на обширной морской акватории достаточно высок – 0,66. В то же время коэффициент корреляции между ТПМ и концентрацией пигмента ниже – 0,52, что доказывает зависимость от биогенных веществ, приносимых амурским стоком, и наличие границ оптимальных температур для обильного размножения фитопланктона.



Рис. 9. Динамика среднемесячных значений концентрации хлорофилла а в районе исследований с 2003 по 2021 г.

Fig. 9. Dynamics of average monthly chlorophyll a concentrations in the study area from 2003 to 2021

Разложение данных о концентрации хлорофилла *а* по ЕОФ. Как отмечалось выше, исследование пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла *а* в Амурском лимане уже проводилось ранее (Цхай, 2005, 2017). На рисунке 10 представлены пространственные распределения трех первых мод и соответствующие временные функции (мг/м³), полученные в результате разложения поля концентрации хлорофилла *а* по ЕОФ. На первую моду пришелся 61% дисперсии, на вторую – 6,9%, на третью – 2,8%.

Пространственная функция первой моды описывает основные черты распределения концентрации хлорофилла *а* в теплый период года. Она в целом сходна с полученными результатами в работах (Цхай, 2005, 2017) на более коротком промежутке времени. Максимальные значения отмечены в Амурском лимане на некотором удалении от устьевого взморья, примерно там же, где наблюдались самые высокие значения ТПМ, в зоне, вытянутой от берегового участка между мысами Джаоре и Пронге в северо-восточном направлении. Значительные величины характерны для всей акватории эстуария Амура, в проливе Невельского, а также в узкой прибрежной полосе вдоль побережий Сахалинского залива и северной части Татарского пролива. Очевидно, что пространственная функция этой моды отражает главным образом влияние стока реки Амур, богатого биогенными элементами, на развитие микроводорослей в изучаемом районе.

Временная функция основной моды характеризуется выраженным годовым ходом с высокими значениями в теплый и близкими к нулю в холодный периоды года, с двумя выраженными максимумами в мае–июне и сентябре– октябре (реже в ноябре), при этом не всегда весенний максимум преобладал над осенним, что в большей мере зависит от объема осеннего стока вследствие циклонической деятельности. В отличие от вариаций усредненных по всей площади значений зимние минимумы стабильны, а в летних максимумах отмечены существенные межгодовые вариации с периодом около 6 лет. Из общей картины заметно выпадает характеризовавшийся низкими концентрациями хлорофилла *а* 2011 г., впрочем, как показано в работе (**Цхай**, **Хен**, **2020**), особенностью этого года было не столько слабое размножение фитопланктона, сколько смещение его на глубину.





Fig. 10. Spatial distributions of the first three modes of decomposition of chlorophyll a concentration by EOF and their time functions

Пространственное распределение второй моды имеет узловые линии, разделяющие области с положительными и отрицательными величинами. Зона положительных значений фактически охватывает область распространения модифицированных амурских вод в летний период – Амурский лиман (за исключением приустьевого взморья), северо-восточную часть Сахалинского залива по направлению к п-ову Шмидта. В Татарском проливе значения второй моды отрицательные, при этом они уменьшаются с севера на юг.

Временная функция второй моды характеризуется устойчивым годовым ходом с максимальными положительными значениями в июле–сентябре и минимальными отрицательными минимумами в апреле–мае и ноябре–декабре. Это означает, что в целом вторая мода имеет четко выраженную сезонную структуру и ее величину можно рассматривать как корректировку основной моды в периоды усиления определенного направления стока Амура. Это положительная поправка в летние месяцы в сторону северо-западного побережья о. Сахалин, а весной и осенью – на юг, в Татарский пролив.

Как и в случае с ТПМ, во временной функции второй моды мы также видим признаки изменения характера внутригодовых колебаний вследствие возможного климатического сдвига, датируемого 2010 г. (**рис. 11**). За исключением первых трех месяцев, показатели временной функции после 2010 г. уменьшились в среднем на 0,5-1,1 мг/м³, а в периоды максимального продуцирования микроводорослей в июне и октябре значения функции сменили знак на противоположный. Увеличение температуры воды в модифицированных водах привело к снижению концентрации хлорофилла *a*, что объяснимо приуроченностью доминирующих видов фитопланктона к определенным условиям прогрева и солености.





Fig. 11. Average values of the time function of the second and third modes of decomposition of chlorophyll a concentration by EOF for the periods 2003–2009 and 2010–2021

Пространственное распределение и временная функция третьей моды также показывает изменения во внутригодовом ходе. После 2010 г. в период с июня по октябрь возникает отрицательная поправка к первым двум модам в Амурском лимане. До этого момента отрицательный вклад третьей моды отмечался в центральной части Сахалинского залива вне зоны прохождения модифицированных амурских вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регулярные спутниковые наблюдения позволяют уверенно идентифицировать модифицированные амурские воды в пространственно-временном масштабе по данным температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла *а*. В зоне своего стока река Амур оказывает значительное влияние на термические условия и распределение фитопланктона в окружающих морских водах.

С июня по сентябрь в Амурском лимане модифицированные амурские воды в наибольшей степени поступают в северо-западную часть, в меньшей – на юго-восточный участок. В Сахалинском заливе более теплая вода распределяется вдоль юго-восточного и восточного побережий, самая холодная отмечается в северо-западной части. Активизация стока р. Амур в южном направлении происходит осенью. В ноябре, когда наблюдается наиболее масштабное проникновение распресненной воды в северную часть Татарского пролива, она уже выхоложена и слабо выделяется на пространственных распределениях ТПМ, но в то же время отчетливо проявляется по концентрации хлорофилла *а*.

Разложение поля ТПМ по ЕОФ выявило климатический сдвиг, выраженный во временных функциях второй и третьей мод, показывающий изменения термических условий, начиная с 2010 г., а именно – существенное повышение температуры в зоне модифицированных вод, обусловленное увеличением расхода р. Амур. Одним из возможных последствий этого стало уменьшение содержания хлорофилла *а* в районах распространения амурского стока, что также нашло свое отражение в ходе анализа данных с помощью метода ЕОФ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю признательность ведущему научному сотруднику отдела воспроизводства лососевых рыб ФГБНУ «ВНИРО» С. Л. Горину за предоставленную информацию о величине расхода реки Амур.

ЛИТЕРАТУРА

Андреев А. Г. Распределение распресненных вод Амурского лимана в Охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. – **2019.** – № 2. – С. 89–96.

Багров Н. А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Тр. Центрального института прогнозов. – 1959. – Вып. 74. – С. 3–24.

Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод / Под ред. И. Ф. Шадрина. – М. : Мир, **1988.** – 324 с. – (Пер. с англ. А. Ю. Краснопевцева).

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиева и др. – СПб. : Гидрометеоиздат, **1998.** – 342 с.

Жабин И. А., Дубина В. А., Некрасов Д. А., Дударев О. В. Структурные особенности зоны смешения речных и морских вод вблизи устья реки Амур по данным спутниковых и гидрологических наблюдений // Исслед. Земли из космоса. – **2007.** – № 5. – С. 61–70.

Жабин И. А., Абросимова А. А., Дубина В. А., Некрасов Д. А. Влияние стока реки Амур на гидрологические условия Амурского лимана и Охотского моря // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 4. – С. 93–100.

Иванов В. В., Пищальник В. М., Леонов А. В., Любицкий Ю. В. Прогноз дат разрушения ледяного покрова в устьях крупных рек // Исслед. Земли из космоса. – 2011. – № 5. – С. 42–49. 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.

Матвеев В. И. Гидрохимические условия биологической продуктивности Охотского моря : Дис. ... канд. геогр. наук. – Владивосток, 2006. – 141 с.

Пищальник В. М., Дорофеева Д. В., Минервин И. Г. и др. Межгодовая динамика аномалий ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2018 г. // Изв. ТИНРО. – 2019. – Т. 196. – С. 114–122.

Ростов И. Д., Жабин И. А. Гидрологические особенности приустьевой области р. Амур // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 7. – С. 94–99.

Цхай Ж. Р. Анализ сезонной изменчивости концентрации хлорофилла *а* в Амурском лимане и сопредельных водах методом естественных ортогональных функций по спутниковым данным системы TeraScan за 2001–2004 гг. // Чтения памяти В. Я. Леванидова. – **2005.** – Вып. 3. – С. 183–191.

Цхай Ж. Р. Анализ сезонных вариаций концентрации хлорофилла *а* методом естественных ортогональных функций в Охотском море по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. – **2007.** – № 6. – С. 37–45.

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.

Цхай Ж. Р. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла *а* в поверхностном слое Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным : Дис. ... канд. геогр. наук. – Ю-Сах. : СахНИРО, ИМГиГ, **2017.** – 125 с.

Цхай Ж. Р., Хен Г. В. Оценка общего содержания хлорофилла *а* в Охотском море с использованием спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. – **2020.** – № 6. – С. 34–46.

Шевченко Г. В., Вилянская Е. А., Частиков В. Н. Сезонная изменчивость океанологических условий в северной части Татарского пролива // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 1. – С. 78–91.

Шевченко О. Г., Селина М. С., Орлова Т. Ю. и др. Фитопланктон Амурского лимана (Охотское море) в летние периоды 2005–2007 годов // Биология моря. – 2013. – Т. 39, № 2. – С. 85–97.

Шевченко Г. В., Тамбовский В. С. Динамика дрейфа льда на северо-восточном шельфе острова Сахалин по данным измерений радиолокационными станциями / РФФИ; ИМГиГ ДВО РАН. – Ю-Сах. : ИМГиГ ДВО РАН, **2018.** – 136 с.

Шевченко Г. В., Частиков В. Н. Сезонная изменчивость гидрологических характеристик на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Океанол. исслед. – 2019. – Т. 47, № 3. – С. 246–263.

Шевченко Г. В., Частиков В. Н. Распространение вод Амура в восточной части залива Анива поздней осенью // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 1. – С. 111–116.

Шунтов В. П. Биология дальневосточных морей России. Т. 1. – Владивосток : ТИНРО-Центр, 2001. – 580 с.

Satoru T., Fumio S., Soshi H. et al. Effect of ice algae community on the increase of chlorophyll *a* concentration during spring in coastal water of the Sea of Okhotsk // Polar Biosci. – **2000.** – No. 13. – P. 1–14.