

Особенности океанологических условий как предпосылка формирования кормовой базы серых китов в Морском нагульном районе (северо-восточный шельф острова Сахалин)

Г. В. Шевченко^{1,2}✉, В. Н. Частиков¹, Ж. Р. Цхай¹

¹ Сахалинский филиал ФГБНУ «ВНИРО», Южно-Сахалинск, Россия

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

✉ shevchenko_zhora@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2023;
принята к публикации 05.07.2023.

Аннотация

Цель. На основе материалов специального натурального эксперимента доказана важность вертикального приливного перемешивания, обусловленного суточными шельфовыми волнами, которое определяет специфические условия формирования кормовой базы серых китов в Морском нагульном районе у северо-восточного побережья о. Сахалин.

Методы и результаты. Материалами для исследования послужили данные инструментальных измерений скорости течений, вариаций температуры и солености воды в придонном слое на трех суточных океанологических станциях, полученные осенью 2019 г. в Морском нагульном районе, а также спутниковая информация о концентрации хлорофилла (2003–2017 гг.).

Выводы. На Морском участке нагула серых китов на северо-восточном шельфе Сахалина имеется постоянно работающий механизм (усиливающийся и ослабевающий вместе с суточными приливами с полумесячной цикличностью), что проявляется в суточных вариациях температуры и солености воды вблизи дна, а также в вертикальных распределениях океанологических параметров по результатам выполнения суточных станций. Благодаря существованию суточных шельфовых волн, обеспечивающих локальное приливное перемешивание, на этом участке возникают условия, способствующие устойчивому формированию кормовой базы серых китов.

Ключевые слова: Охотское море, приливное перемешивание, суточные шельфовые волны, спутниковые данные, температура воды, соленость, скорость течений, концентрация хлорофилла *a*

Благодарности: Авторы выражают благодарность ООО «Сахалинская Энергия» и «Газпром-нефть-Сахалин» за организационную и финансовую поддержку исследований.

Для цитирования: Шевченко Г. В., Частиков В. Н., Цхай Ж. Р. Особенности океанологических условий как предпосылка формирования кормовой базы серых китов в Морском нагульном районе (северо-восточный шельф острова Сахалин) // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 708–730. EDN FUDLBB.

Features of the Oceanological Conditions as a Prerequisite for Formation of a Food Base for Gray Whales in the Marine Feeding Area (Northeastern Shelf of the Sakhalin Island)

G. V. Shevchenko^{1, 2} ✉, V. N. Chastikov¹, Z. R. Tskhay¹

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

² Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

✉ shevchenko_zhora@mail.ru

Abstract

Purpose. The paper is purposed at proving (based on the data of a special field experiment) the importance of vertical tidal mixing which is conditioned by the diurnal shelf waves, on the one hand, and determines the specific conditions for forming food supply for gray whales in the Marine feeding area near the Sakhalin northeastern coast, on the other hand.

Methods and Results. The materials for the research were formed of the data resulted from the instrumental measurements of current velocities, water temperature and salinity (and their variations) in the bottom layer carried out at three diurnal oceanological stations in the Marine feeding area in autumn 2019 as well as the satellite data on the chlorophyll *a* concentration (2003–2017).

Conclusions. The results of the diurnal station measurements showed that in the Marine feeding area of gray whales (on the Sakhalin northeastern shelf), there was a constantly working mechanism which intensified and weakened together with the diurnal tides (cycle was a half a month). It is manifested in the diurnal seawater temperature and salinity variations near the bottom, as well as in the vertical distributions of oceanological parameters. Due to the diurnal shelf waves providing local tidal mixing, the conditions contributing to the sustainable formation of food supply for gray whales arise in this area.

Keywords: Sea of Okhotsk, tidal mixing, diurnal shelf waves, satellite data, water temperature, salinity, current velocity, chlorophyll *a* concentration

Acknowledgments: The authors are thankful to the LTD “Sakhalinskaya Energiya” and the LTD “Gazpromneft-Sakhalin” for organizational and financial support of the research.

For citation: Shevchenko, G.V., Chastikov, V.N. and Tskhay, Z.R., 2023. Features of the Oceanological Conditions as a Prerequisite for Formation of a Food Base for Gray Whales in the Marine Feeding Area (Northeastern Shelf of the Sakhalin Island). *Physical Oceanography*, 30(5), pp. 666-687.

Введение

Поведение серых китов (*Eschrichtius robustus*) уникально среди усатых китов: они обитают в прибрежных водах, характеризуются чрезвычайно длинными миграциями, питаются способом прерывистого всасывания, поедая бентос. Серые киты, обитающие в северной части Тихого океана, исторически делились на две популяции. Первая – северо-восточно-тихоокеанская (ENP) (также называемая чукотско-калифорнийской) с численностью приблизительно 20000 экземпляров [1], обитающая в восточной части северной Пацифики и прилегающей части открытого океана между Северной Америкой и Азией. Вторая популяция – из западной части Северной Пацифики (WNP) (ранее называемая азиатской или охотско-корейской) обитает в водах западной части Северной Пацифики, ее численность составляет менее 250 особей, и она

находится под угрозой исчезновения¹ [2]. В настоящее время на основе новых данных Международный союз охраны природы (МСОП) рассматривает серых китов, нагуливающих в прибрежных водах Охотского моря, в качестве западной субпопуляции. В последней редакции Красной книги РФ эти киты отнесены к охотоморской популяции².

Хотя когда-то западно-тихоокеанские серые киты использовали для нагула все северное побережье Охотского моря, сейчас ядро популяции питается с июня по ноябрь преимущественно у северо-восточного побережья о. Сахалин.

В шельфовых водах северо-восточного Сахалина серые киты в последние годы концентрируются в период нагула на двух близлежащих участках моря, условно названных Пильтунским и Морским нагульными районами (рис. 1). В районе Северо-Восточного Сахалина распределение серых китов обладает четко выраженной сезонностью, и при этом из года в год подчиняется одним и тем же временным закономерностям³, в которых выделяется период подхода (июнь – июль) и период нагула (с конца июля по октябрь). При этом часть серых китов остается на данной акватории вплоть до ноября, иногда до начала декабря. К середине декабря почти все киты покидают воды Северо-Восточного Сахалина.

Океанологические условия формирования кормовой базы серых китов лучше изучены на прибрежном Пильтунском нагульном районе, на Морском участке ситуация менее ясная. До сих пор остается нерешенным ряд вопросов в отношении того, почему специфические виды бентоса, активно потребляемые серыми китами, группируются именно в этих районах. Основной вопрос: чем эти районы выделяются по гидродинамическим и гидрологическим условиям среди других акваторий северо-восточного шельфа о. Сахалин, находящихся в сходных физико-географических условиях?

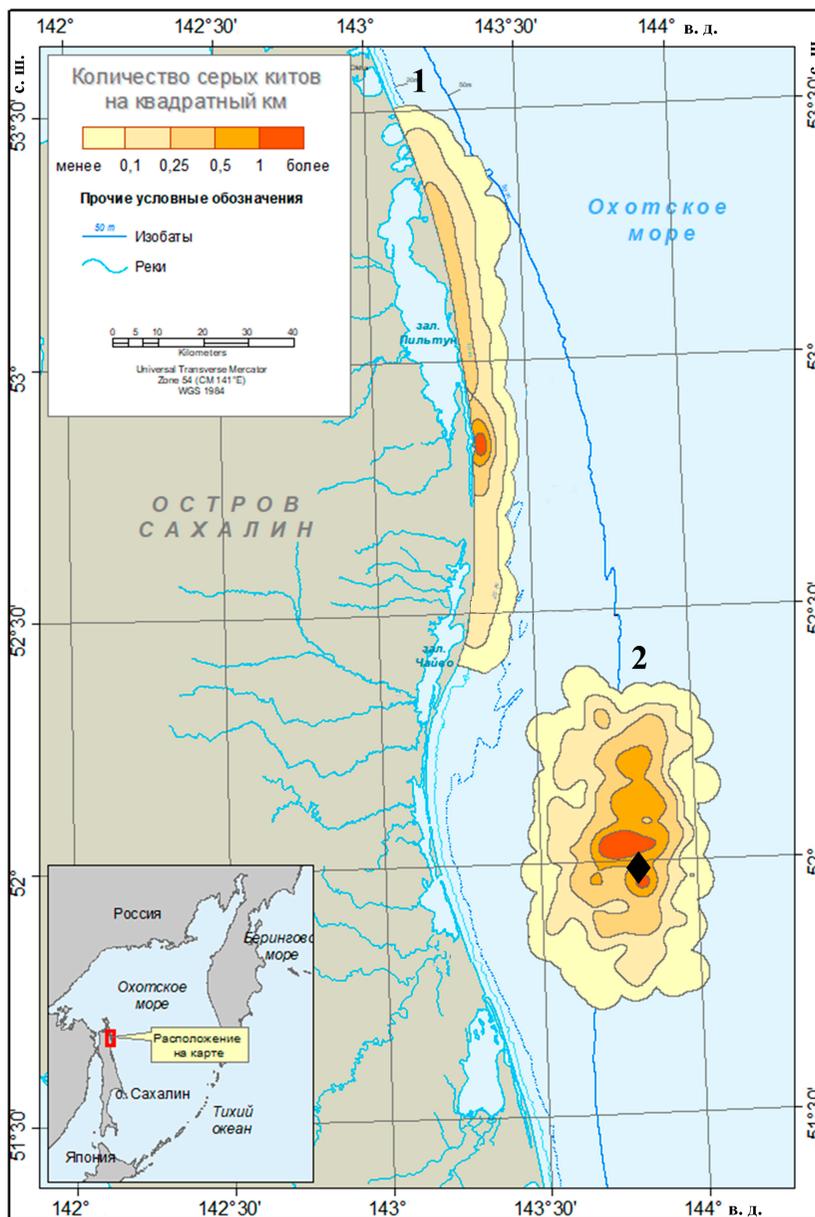
Несмотря на большой объем выполненных исследований, четкого представления по данному вопросу не сформировалось. Например, в работе [3] высказано мнение, что основное развитие потребляемых животными видов бентоса происходит в зимний период, хотя это сложно представить, учитывая отрицательные значения температуры морской воды в изучаемом районе в холодный период года, резко снижающие темпы продуцирования донных ракообразных.

Указанные районы выделяются и по характеру грунтовых условий: в отличие от остальной акватории северо-восточного шельфа, на которой преобладают крупный и средний песок, здесь в большинстве проб донного грунта отмечен мелкозернистый песок с примесью илов [4]. Это различие также не нашло пока объяснений.

¹ Swartz S. L., Jones M. L. Gray Whale *Eschrichtius robustus* // Encyclopedia of Marine Mammals. Third Edition. London : Academic Press, 2018. P. 422–428.

² Красная книга Российской Федерации, том «Животные». 2-е издание. М. : ФГБУ «ВНИИ Экология», 2021. 1128 с.

³ Владимиров А. В. Пространственно-временная характеристика распределения серых китов (*Eschrichtius robustus*) охотско-корейской популяции у побережья северо-восточного Сахалина : автореферат дис. ... канд. биол. наук. М., 2007. 22 с.



Р и с. 1. Усредненная плотность распределения серых китов в Пильтунском (1) и Морском (2) районах их нагула по данным за 2002–2021 гг. Черным ромбом отмечено положение автономной буйковой станции ⁴, выставленной в Морском районе осенью 2019 г. На врезке показано положение исследуемой области (красный прямоугольник)

F i g. 1. Average distribution of the gray whales density in the Piltunsky (1) and Marine (2) feeding areas based on the data for 2002–2021. Black diamond marks the location of autonomous buoy station ⁴ installed in the Marine area in autumn 2019. The inset shows the position of the area under study (red rectangle)

⁴ Отчет по программам мониторинга серых китов у северо-восточного побережья острова Сахалин в 2021 г. Южно-Сахалинск, 2022. 70 с.

Еще один вопрос связан с характерным для изучаемого района в летний период четко выраженным термоклином, залегающим на глубине 10–15 м. Слои скачка препятствуют поступлению в придонный слой продукции фитопланктона, необходимой для развития популяции бентоса, а для активного цветения необходим подъем биогенных веществ в поверхностный слой из более глубоких слоев. Многие специалисты связывают эти процессы с сезонными явлениями апвеллинга и даунвеллинга [5, 6], однако эти явления охватывают всю акваторию северо-восточного шельфа и проявляются на протяжении нескольких месяцев, поэтому не могут объяснить локальные особенности, присущие Пильтунскому и Морскому районам.

Целью данной работы является детальное рассмотрение вопроса об особенностях океанологических условий, способствующих формированию кормовой базы серых китов в Морском районе нагула. В работе основное внимание уделено специальному эксперименту, проведенному в сентябре – октябре 2019 г., направленному на проверку гипотезы, выдвинутой на основе анализа имеющейся информации, о важной роли приливного перемешивания в формировании особых гидрологических условий в рассматриваемом районе [7]. Подобная гипотеза выглядит весьма необычной для акватории ровного протяженного шельфа, удаленной от проливов, мысов, подводных гор, с которыми обычно связывают вертикальные движения морской воды, обусловленные приливами, поэтому результаты этого эксперимента представляют значительный интерес. Особый характер условий в районах нагула подтверждается также результатами анализа пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла *a* по спутниковым данным.

Материалы наблюдений и методы исследования

Для проверки гипотезы о важной роли приливного перемешивания, обусловленного специфическими особенностями шельфовых приливных волн, на Морском участке нагула серых китов по договору с ООО «Газпромнефть-Сахалин» с 16 сентября по 19 октября 2019 г. был проведен специальный эксперимент. Он включал постановку автономной буйковой станции (АБС), в состав которой входили акустический доплеровский профилограф течений *ADP SonTek* и логгер *SBE-37* для измерения температуры и солености морской воды, а также вариаций придонного гидростатического давления (уровня моря). Приборы были закреплены на приборной раме из нержавеющей стали, которая устанавливалась на дно моря. АБС была выставлена с борта судна *Siem Sapphire* в точке с координатами 52°01,9' с. ш. и 143°39,33' в. д., глубина моря в точке постановки около 48 м. Станция была поднята на борт судна *Siem Garnet* 19 октября 2019 г.

Измерения течений осуществлялись ежечасно в 23 слоях толщиной 2 м каждый (нумерация слоев от прибора, находившегося вблизи дна), длина полученных рядов составила 791 часовой отсчет. Измерения температуры и солености морской воды, придонного гидростатического давления также осуществлялись ежечасно, длина полученных рядов составила 792 часовых отсчета. При обработке полученных материалов использовались стандартные методы статистического анализа.

В ходе работы трижды (16–17 и 27–28 сентября, 19–20 октября) были выполнены суточные океанологические станции, вертикальные зондирования водной толщи океанологическим зондом *SBE-19plus V2* производились в одной точке через каждые три часа. Прибор имел датчики температуры, солености, гидростатического давления и концентрации хлорофилла *a*. Зондирования осуществлялись рядом с местом постановки АБС, в точке с координатами 52°02' с. ш. и 143°39,29' в. д. Полученные материалы группировались с шагом по глубине 1 м, вертикальные распределения океанологических элементов строились при помощи специализированного комплекса обработки данных *OceanDataView*.

Материалом для данного исследования послужили также ежесуточные данные о концентрации хлорофилла *a* 2-го уровня со сканера цвета *MODIS* искусственного спутника Земли *Aqua*, предоставленные *Ocean Color Processing Group* (URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) за период с 2003 по 2017 г. Рассматривалась информация в районе, ограниченном координатами 143°–144,5° с. ш. и 51°–54,5° в. д. с пространственным разрешением около 2 км. Проецирование данных на координатную сетку осуществлялось при помощи программы *SeaDAS* (URL: <https://seadas.gsfc.nasa.gov>). Сравнение спутниковых и судовых данных о концентрации хлорофилла *a* показало, что дистанционные измерения хорошо согласуются с результатами экспедиционных исследований у северо-восточного побережья Сахалина, что позволяет с доверием относиться к полученным оценкам сезонной и межгодовой динамики содержания вещества в поверхностном слое⁵.

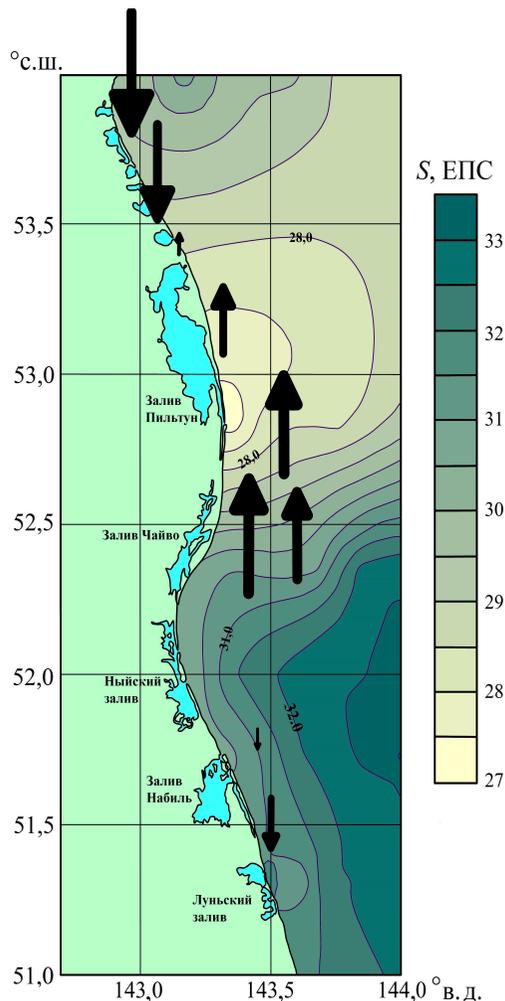
Для количественного описания пространственно-временной изменчивости концентрации пигмента был использован метод естественных ортогональных функций (ЕОФ), эффективно применяемый при анализе вариаций гидрометеорологических и океанологических полей [8]. В методе ЕОФ заданное поле представляется в виде произведения двух функций, одна из которых зависит от координат, а вторая – от времени. Эти временные функции одинаковы для всех точек исследуемого района, а пространственное распределение моды характеризует различие интенсивности вариаций, например, сезонного хода изучаемого параметра. Пространственное распределение моды может иметь области с разными знаками, что указывает на изменения в противофазе в различных районах, и узловую линию между ними, на которой вариации отсутствуют. Одно из преимуществ метода ЕОФ состоит в том, что основной вклад в суммарное разложение, как правило, вносят несколько слагаемых с наибольшим весом и эти слагаемые наилучшим образом описывают природу изучаемого процесса.

Для численной реализации метода ЕОФ применялось программное обеспечение спутниковой системы *TeraScan*, установленной в СахНИРО (URL: <https://www.seaspace.com/>). При анализе факторов, влияющих на распределение концентрации хлорофилла *a*, были использованы данные о температуре поверхности воды и концентрации льда, полученные станцией *TeraScan* СахНИРО со спутников серии *NOAA*.

⁵ Цхай Ж. Р. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-*a* в поверхностном слое Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным : дисс. ... канд. геогр. наук. Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2017. 125 с.

Результаты и обсуждение

Основные сведения о суточных шельфовых волнах. Суточные шельфовые волны на северо-восточном шельфе о. Сахалин были впервые обнаружены при анализе материалов инструментальных измерений течений на морских месторождениях нефти и газа [9] благодаря anomalно высоким скоростям суточных течений. Наиболее детальное их описание приведено в работах [5, 10] на основе анализа данных большого количества АБС, установленных на протяженном участке шельфа, а также измерений скорости дрейфа льда тремя береговыми радиолокационными станциями. Было показано, что приливные шельфовые волны генерируются в изучаемом районе на частотах K_1 и O_1 в результате дифракции крупномасштабных волн Кельвина на северной оконечности Сахалина – резко выдающемся в море мысе Елизаветы.



Р и с. 2. Распределение солёности по результатам океанологической съёмки, выполненной на северо-восточном шельфе Сахалина на момент отлива в августе 1990 г. Поперечные разрезы выполнялись на одной фазе прилива (из работы [5])

Fig. 2. Salinity distribution resulted from the oceanological survey carried out on the Sakhalin north-eastern shelf at low tide in August 1990. Cross sections were performed at one phase of a tide ([5])

Влияние этих волн заканчивается в районе Лунского залива, расположенном около 340 км к югу от указанного мыса для волны K_1 и 380 км для O_1 . Необычно короткие для приливных составляющих длины волн приводят к тому, что на расстоянии около 170 км приливные течения ориентированы в противоположные стороны (это относится и к дрейфу льда, что приводит к формированию локальных зон сжатия и разрежения ледяного покрова). Шельфовые волны никуда не смещаются, что связано с близостью к нулю их групповой скорости. Они представляют собой пару стационарных вихрей разного знака, меняющиеся каждые 12 часов. На рис. 2 приведены результаты океанологической съемки, выполненной Дальневосточной морской геолого-разведочной экспедицией летом 1990 г. Океанологические разрезы выполнялись на одной фазе прилива (по одному в сутки), что позволило получить очень ясную картину влияния шельфовых волн на пространственное распределение солености [5].

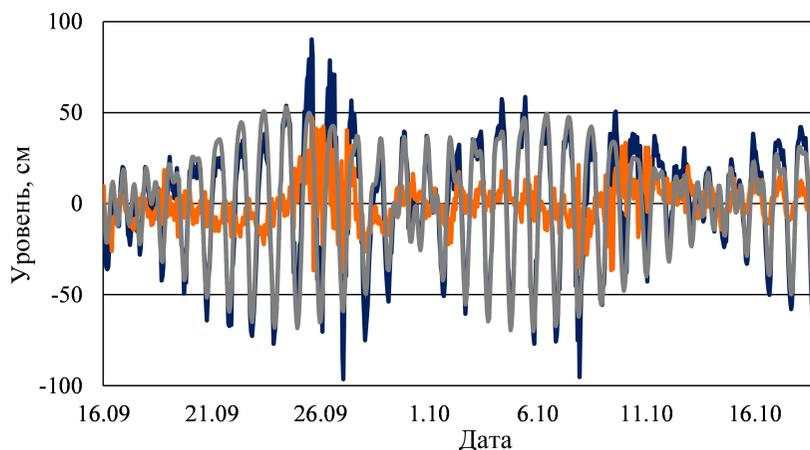
На северном участке северо-восточного шельфа, непосредственно в прибрежном Пильтунском районе нагула, наблюдается зона конвергенции и заглупление воды низкой солености, на южном (в Морском районе) – зона дивергенции и подъем холодной соленой воды. Собственно, именно эта картина и позволила выдвинуть гипотезу о важной роли вертикальных движений, обусловленных влиянием суточных шельфовых волн, в районах нагула. Проверка этой гипотезы и составляла предмет данной работы.

Специальный эксперимент в Морском районе осенью 2019 г. Рассмотрим материалы инструментальных измерений, полученных в ходе специального эксперимента. Он был направлен на определение роли приливного перемешивания в формировании специфических условий, благоприятных для развития кормовой базы серых китов в Морском районе нагула (работы выполнялись по заказу ООО «Газпромнефть-Сахалин»). Как отмечено выше, этот эксперимент включал постановку на дне моря АБС, в состав которой входили измерители температуры и солености морской воды, гидростатического давления (колебаний уровня моря) и скорости морских течений, а также выполнение трех суточных гидрологических станций.

Колебания уровня моря. Характер колебаний уровня моря был важен с точки зрения изучаемого механизма вертикального приливного перемешивания в Морском районе нагула. Графики измеренных ежечасных значений, а также приливной и непериодической составляющих, отсчитанных от нулевого среднего уровня, приведены на рис. 3.

Главную роль в суммарных колебаниях уровня моря в изучаемом районе играют приливы, на их долю приходится 87,7 % общей дисперсии (энергии) вариаций. Колебания уровня в период проведения измерений были значительными, максимальный размах был лишь немногим менее 2 м (экстремальные отклонения от нулевого среднего составили 90,3 см и –96,5 см). Непериодические колебания обычно невелики, но имели место два случая их резкого усиления – 25–28 сентября и 10–11 октября. В первом случае вариации были наиболее значительны – нагон достигал 47,4 см, а сгон – 37,5 см. Последнее

обстоятельство весьма удивительно, так как заметные сгоны обычно наблюдаются непосредственно вблизи берега и гораздо реже на относительно глубоководных участках шельфа. Однако за период наблюдений сгоны величиной 35 см и более были отмечены четыре раза.



Р и с. 3. Вариации суммарного уровня (синяя линия), а также его неперiodической (оранжевая линия) и приливной (серая линия) составляющих в Морском нагульном районе с 16 сентября по 19 октября 2019 г.

F i g. 3. Variations in the total level (blue line), as well as its residual (orange line) and tidal (gray line) components in the Marine feeding area from September, 16 to October 19, 2019

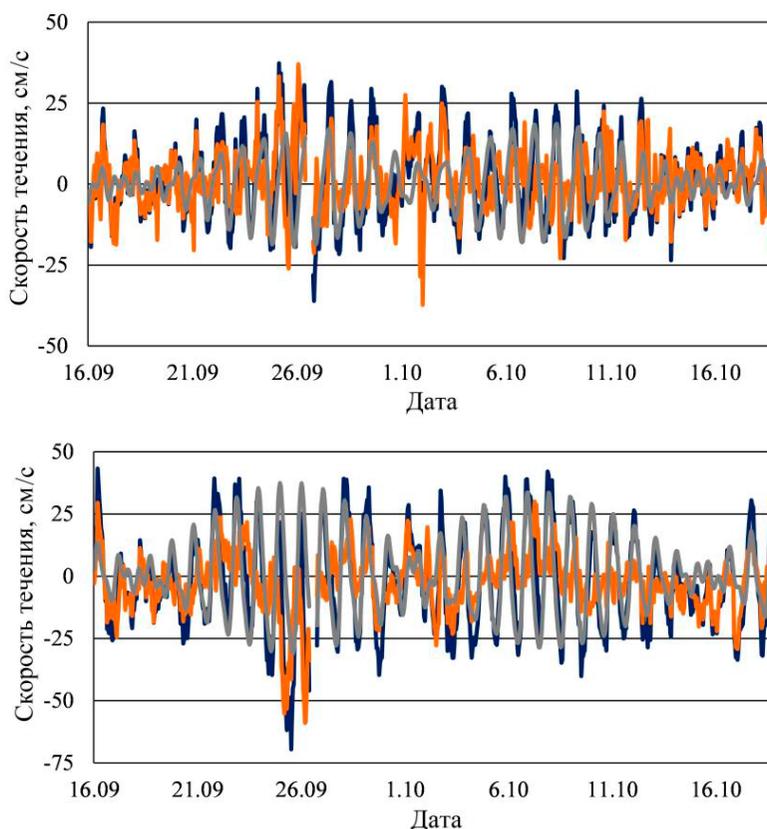
Приливные колебания характеризовались выраженными полумесячными неравенствами, типичными для районов с преобладанием суточных приливов. Метод наименьших квадратов гармонического анализа приливов позволил получить оценки гармонических постоянных амплитуды и фазы главных приливных волн (четыре суточного и четыре полусуточного диапазона). Отношение суммы амплитуд H главных суточных (O_1 и K_1) и полусуточных (M_2 и S_2) волн, определяющее характер прилива:

$$R = \frac{HO_1 + HK_1}{HM_2 + HS_2},$$

равнялось 4,5. То есть прилив в изучаемом районе правильный суточный.

Важно отметить, что интенсивные сгонно-нагонные вариации наблюдались 27–28 сентября – в период выполнения второй суточной станции. Это время также характеризовалось значительными приливными колебаниями, в отличие от первой станции, которая выполнялась как в спокойных метеоусловиях, так и в период ослабления суточных волн (экваториальный прилив). Полусуточные приливы преобладали 16 и 17 сентября, наблюдалось по два случая полных и малых вод в сутки. Когда суточная станция выполнялась третий раз, 19–20 октября, неперiodические колебания были малы, а приливные имели значительную величину и преобладали суточные волны. Ниже при анализе материалов суточных станций характер колебаний уровня моря при их выполнении рассматривается более детально.

Скорость и направление течений. Анализировались проекции векторов скорости суммарных течений, а также предвычисленной приливной и непериодической составляющих (последние получены путем вычитания из исходных значений предвычисленного прилива) для поверхностного, промежуточного и придонного слоев. В качестве поверхностного выбран слой 21 (горизонт около 6 м), так как при постановке акустического доплеровского профилографа на дно данные наблюдений в одном – двух верхних слоях искажаются из-за нарушения условий прохождения акустического сигнала в приповерхностных слоях (отсчет ячейки от прибора, расположенного вблизи дна). В качестве придонного горизонта был выбран первый слой, в качестве промежуточного 11-й. На рис. 4 представлены соответствующие графики для придонного слоя.



Р и с. 4. Проекция измеренных векторов скорости течения (синяя линия) в придонном слое, а также приливной (серая линия) и непериодической (оранжевая линия) составляющих на параллель (*сверху*) и на меридиан (*снизу*) по наблюдениям на АБС с 16 сентября по 19 октября 2019 г.

Fig. 4. Projections of the measured current velocity vectors (blue line) in the bottom layer, as well as the tidal (gray line) and residual (orange line) components onto the parallel (*top*) and the meridian (*bottom*) based on the observations at ABS from September, 16 to October 19, 2019

Из рисунка видно, что суточные приливные течения (как и для колебаний уровня моря, характер течений в изучаемом районе правильный суточный) не играют определяющей роли в формировании суммарных течений, что обычно наблюдается в данном районе [5]. Особенно это относится к поверхностному слою, где для проекции на меридиан доля приливной компоненты составляет всего 21 % в общей дисперсии колебаний. Это может быть обусловлено значительными скоростями непериодической компоненты, которые отмечены во всем водном слое.

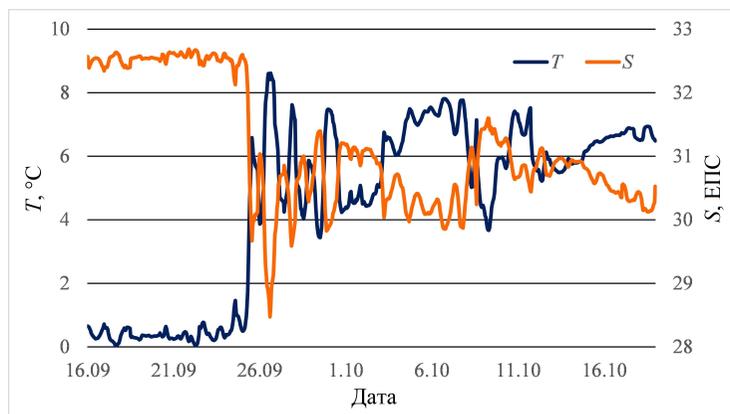
Особый интерес представляет резкое усиление течений, начавшееся вечером 25 сентября (по сахалинскому времени) и продолжавшееся 26 сентября. Максимальное значение на границе суток составило 142 см/с, величина непериодической составляющей 114 см/с (для меридиональной компоненты, ориентация на юг). Это типичная ситуация: как правило, при прохождении циклона на северо-восточном шельфе Сахалина усиливается прежде всего южная компонента течения [5]. В данном случае интенсификация потока Восточно-Сахалинского течения была обусловлена особенностями поля приземного атмосферного давления – при положении центра глубокого циклона (973 гПа) в северной части Охотского моря над изучаемым районом изобары имеют ориентацию на юго-юго-восток.

В промежуточном слое роль приливных течений более значимая, причем они больше, чем вблизи поверхности, что также несколько необычно. С глубиной экстремальные скорости проекции на меридиан немного уменьшаются как для суммарных течений (133 см/с), так и для непериодических (106 см/с) и наблюдаются они на 4 ч раньше, чем на поверхности. Для проекции на параллель экстремальные значения немного ниже, чем в поверхностном слое (48 см/с по сравнению с 55 см/с).

В придонном слое и приливные, и непериодические течения слабее, чем в промежуточном. По крайней мере это справедливо для южной компоненты, на которой усиление при прохождении циклона 25–26 сентября было наиболее значительным. Максимальная скорость суммарного течения составила 70 см/с и наблюдалась на 5 ч позже, чем в вышележащих слоях (непериодическая компонента достигала 55 см/с). Экстремальное значение восточной составляющей суммарного течения (38 см/с) также сместилось на конец суток 25 сентября, максимальное значение непериодической компоненты (37 см/с) было зафиксировано почти сутки спустя. К моменту проведения океанологических зондирований непериодические течения ослабели до обычного уровня (10–20 см/с).

Вариации температуры и солености в придонном слое. На рис. 5 представлены графики вариаций температуры и солености морской воды в точке постановки АВС в придонном слое (логгер *SBE-37* находился на приборной раме на дне). В течение первой декады измерений наблюдалась обычная для изучаемого района в теплый период года холодная вода с низкой соленостью (средние значения 0,4 °С и 32,5 ЕПС). В первые 2,5 суток обнаружались значимые колебания океанологических параметров суточной периодичности с амплитудой около 0,25 °С и 0,1 ЕПС, которые отсутствовали затем в течение примерно 3 суток, после чего возобновились с плавно нарастающей амплитудой.

Максимум температуры (и минимум солености) наблюдались через 2–3 ч после наибольшего значения приливного уровня. Резкое повышение температуры и снижение солености морской воды произошло 25 сентября в придонном слое, до средних значений 6 °С и 30,6 ЕПС.



Р и с. 5. Вариации температуры (синяя линия) и солености (оранжевая линия) морской воды с 16 сентября по 19 октября 2019 г. по измерениям *SBE37* в придонном слое в Морском нагульном районе

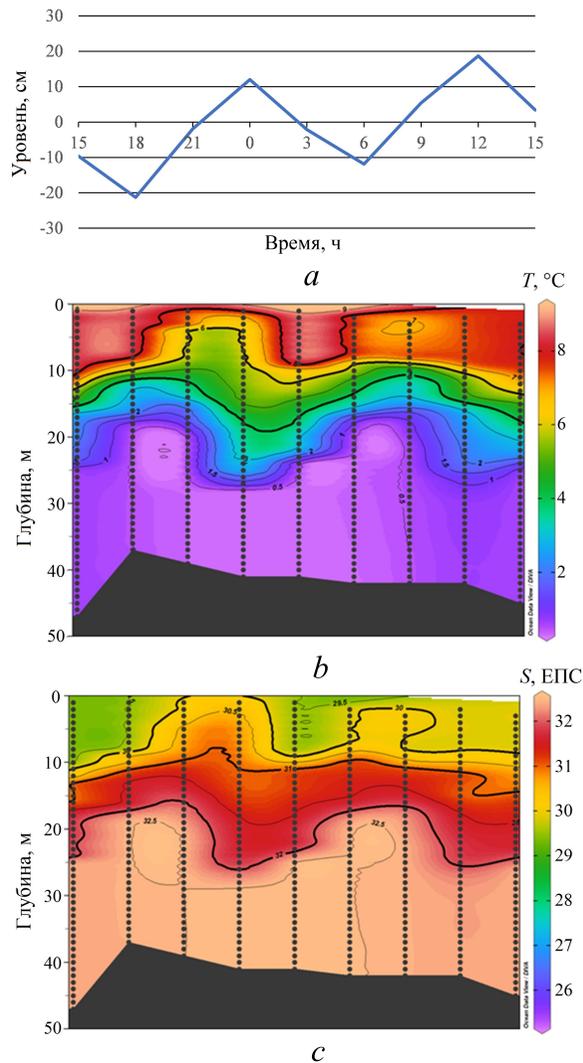
F i g. 5. Variations in seawater temperature (blue line) and salinity (orange line) from September, 16 to October 19, 2019 based on the *SBE37* measurements in the Marine feeding area bottom layer

Это типичная картина для северо-восточного шельфа о. Сахалин [5], связанная с началом заглужения модифицированной воды стока р. Амур в результате перестройки от летнего муссона к зимнему. Как правило, этому предшествует прохождение глубокого циклона, который, как было упомянуто выше, наблюдался именно в это время.

После этого были зафиксированы особенно сильные суточные вариации температуры и солености, размах которых 27 сентября достиг максимальных значений 4,5 °С и 2,5 ЕПС. Вероятно, такие значительные колебания обусловлены тем обстоятельством, что процесс ветрового даунвеллинга, возникающего на северо-восточном шельфе Сахалина при перестройке поля ветра к характерным для холодного периода года ветрам северного – северо-западного румбов, был только в начальной стадии, и вертикальная структура температуры и солености еще не устоялась.

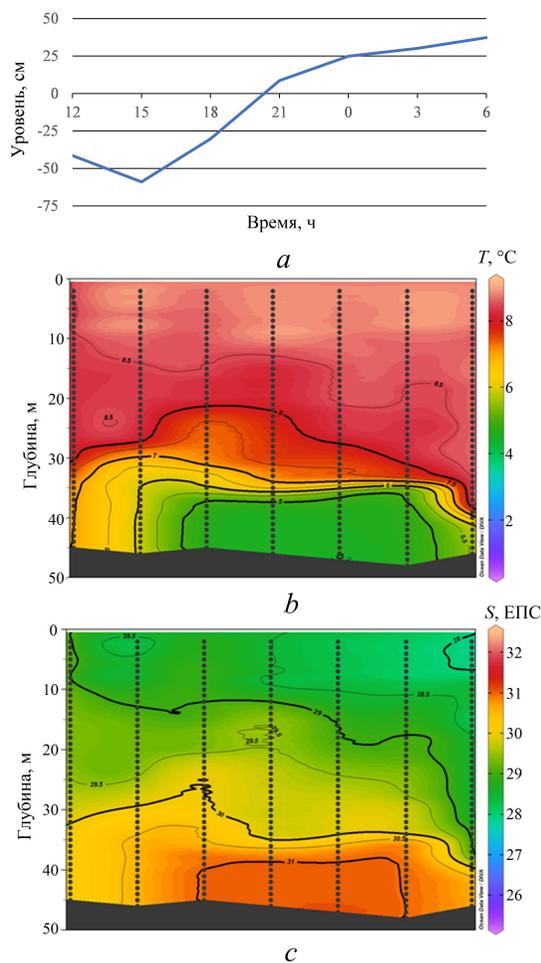
Отметим также, что при ослаблении приливов, наблюдаемых с двухнедельной цикличностью (экваториальные приливы), суточные колебания температуры и солености в придонном слое становятся почти незаметными. Происходит это не сразу, а с некоторым сдвигом по времени (около двух суток). Так, при выполнении первой суточной станции 16–17 сентября, хотя суточные волны проявлялись слабо и наблюдался сравнительно небольшой по величине полусуточный ход уровня, вариации температуры и солености отмечались. Они отсутствовали 19–21 сентября, когда амплитуда прилива начала уже нарастать. Аналогичная картина наблюдалась 1–3 и 15–17 октября. Физическая причина этой задержки весьма интересна и на данный момент еще не выявлена.

Суточные океанологические станции. Рассмотрим результаты вертикальных зондирований водной толщи в районе постановки АБС, выполненных с интервалом 3 ч с 15:00 16 сентября до 15:00 17 сентября. На рис. 6, *a* представлен график хода приливного уровня и вертикальные распределения температуры и солёности морской воды, построенные по девяти последовательным зондированиям (из полученных материалов были отобраны значения с шагом 1 м, отмечены черными точками). При выполнении измерений не было возможности контролировать глубину погружения зонда, поэтому он не во всех случаях опускался до дна. За время выполнения станции два зондирования были выполнены при низких значениях прилива (в 18:00 и в 06:00), два – при высоких (в 00:00 и в 12:00).



Р и с. 6. Ход приливного уровня во время выполнения суточной океанологической станции 16–17 сентября 2019 г. (*a*) и вариации температуры (*b*) и солёности (*c*) морской воды
F i g. 6. Variations of the tidal level (*a*) and the seawater temperature (*b*) and salinity (*c*) during the diurnal oceanological station on September 16–17, 2019

Несмотря на сравнительно небольшие колебания уровня моря, обращают на себя внимание значительные, явно связанные с ними вариации температуры и солёности. При понижении уровня наблюдался подъём более холодных вод из глубоких слоев (с некоторым смещением во времени вблизи поверхности), а при повышении отмечено заглубление поверхностной более теплой воды с более низкой солёностью. Вариации глубины залегания изотерм и изогалин составляли 10–15 м, что указывает на значительный масштаб вертикального приливного перемешивания в Морском районе нагула. Материалы именно этой съемки оказались наиболее удачными с точки зрения изучаемого явления, так как при характерных для летнего сезона океанологических условиях с хорошо выраженным термоклином изучаемый процесс наиболее нагляден, несмотря на относительно небольшие приливные вариации.



Р и с. 7. Ход приливного уровня во время выполнения суточной океанологической станции 27–28 сентября 2019 г. (а) и вариации температуры (b) и солёности (c) морской воды
F i g. 7. Variations of the tidal level (a) and the seawater temperature (b) and salinity (c) during the diurnal oceanological station on September 27–28, 2019

Вторая суточная станция (рис. 7) была выполнена не в полном объеме из-за занятости судна на других работах: семь зондирований с 12:00 27 сентября до 06:00 28-го. Уровень был минимальным в 15:00 и затем возрастал до конца проведения измерений, существенно увеличившись (около 1 м). Работы производились, как отмечено выше, при начавшемся ветровом даунвеллинге, что существенно осложняет интерпретацию полученных данных. Тем не менее по положению изотермы 8 °С и изогалины 29 ЕПС можно судить о плавном заглублении поверхностной воды. Более сложная картина наблюдалась в нижних слоях с 15:00 27 до 3:00 28 сентября. Она указывает на приток более холодной и соленой воды.

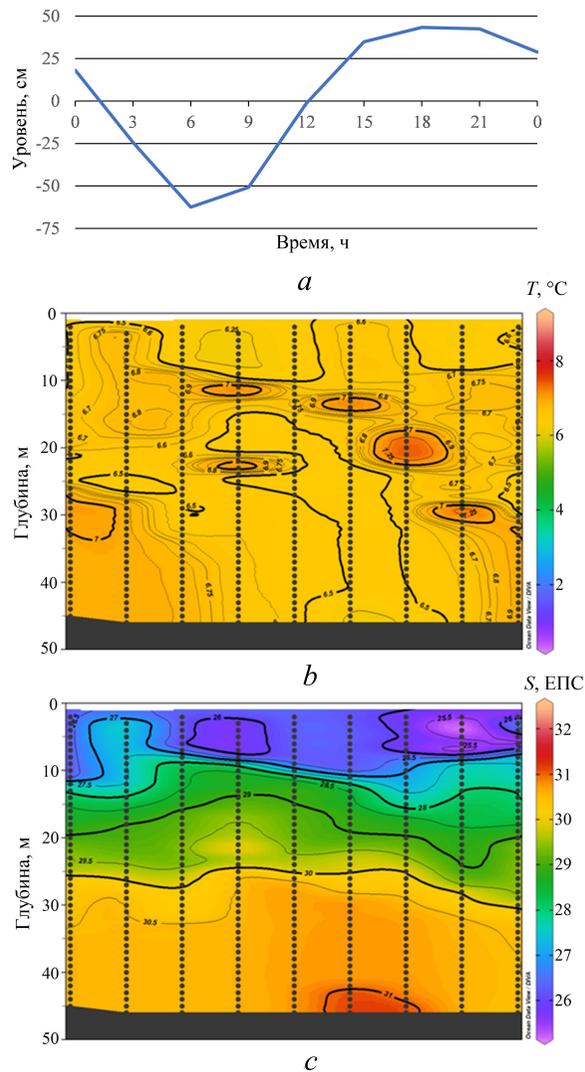


Рис. 8. Ход приливного уровня во время выполнения суточной океанологической станции 19–20 октября 2019 г. (a) и вариации температуры (b) и солёности (c) морской воды
Fig. 8. Variations of the tidal level (a) and the seawater temperature (b) and salinity (c) during the diurnal oceanological station on October 19–20, 2019

Третья суточная океанологическая станция была выполнена в то время, когда температура воды почти выровнялась во всем водном слое в результате обусловленного ветром заглупления модифицированной воды стока р. Амур. Наиболее наглядно процесс заглупления при повышении приливного уровня можно проследить на примере линзы теплой воды (более 7 °С), которая была зафиксирована при нескольких измерениях и плавно опустилась с глубины около 11 м в 09:00 19 октября до 28 м спустя 12 ч (рис. 8).

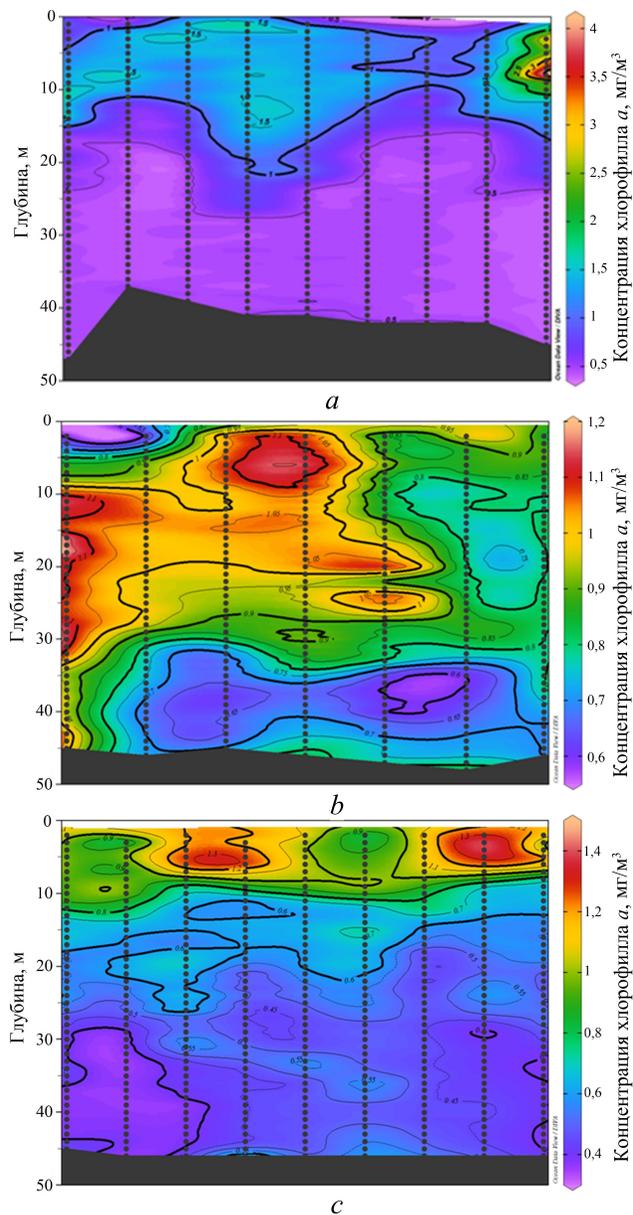
Более отчетливо изучаемый процесс приливного перемешивания прослеживается в распределении солености, в особенности по положению изогалин 28 и 29 ЕПС. Наиболее существенный подъем отмечен в 18:00, когда малая вода прилива была пройдена и только начинался его рост. Наибольшее заглупление – в момент максимального уровня в 21:00 или в начале его снижения в 00:00 20 октября.

Вертикальные распределения концентрации хлорофилла *a* (рис. 9) в морской воде выявили явное заглупление поверхностной воды, отличавшейся более высоким содержанием фитопигмента, в моменты повышения приливного уровня при первой съемке.

На распределениях, построенных по материалам более поздних измерений, концентрация хлорофилла *a* по всем водном слое характеризовалась более низкими значениями, чем в первом случае. Однако процессы вертикального перемешивания прослеживались вполне отчетливо. Так, во время съемки 27–28 сентября при первом зондировании, пришедшемся на снижение приливного уровня, повышенные концентрации хлорофилла *a* были отмечены практически во всей водной толще (от горизонта 10 м до дна), за исключением верхнего 5-метрового слоя. Затем содержание фитопигмента уменьшилось, особенно в нижних слоях, но с ростом приливного уровня снова наблюдалось заглупление воды с повышенной концентрацией хлорофилла *a* до глубины 30–35 м.

При следующей съемке 19–20 октября в поверхностном 8-метровом слое отмечены две линзы с более высокими концентрациями (до 1,3 мг/м³) при более низких значениях температуры и солености. Эти линзы не были связаны с процессами вертикальных движений, скорее с прохождением вблизи поверхности небольших порций воды с различными океанологическими характеристиками. Однако заглупление воды с относительно высоким содержанием фитопигмента на фоне роста приливного уровня прослеживается достаточно явно.

Данное обстоятельство способствует формированию в Морском нагульном районе локальных высокопродуктивных скоплений видов бентоса, которые являются кормовой базой серых китов (бокoplавы, кумовые раки). На соседних участках северо-восточного шельфа о. Сахалин преобладают сообщества макробентоса, которые не используются серыми китами как объекты питания (более подробно этот вопрос обсуждается в работе [7]).



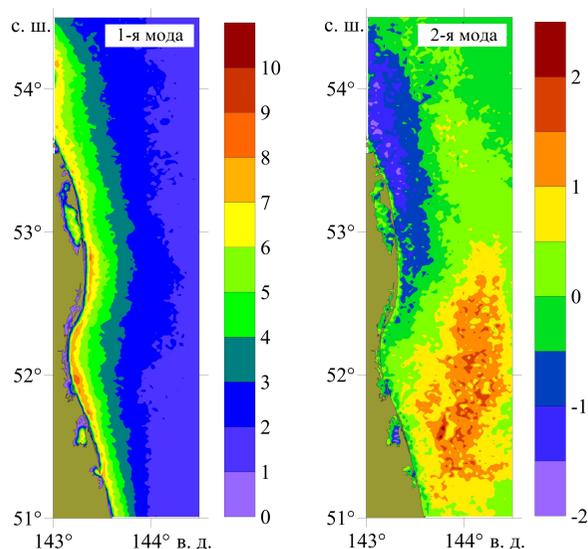
Р и с. 9. Вертикальные распределения концентрации хлорофилла *a* по результатам выполнения суточных океанологических станций 16–17 сентября (*a*), 27–28 сентября (*b*) и 19–20 октября 2019 г. (*c*)

F i g. 9. Vertical distributions of the chlorophyll *a* concentration resulted from of the diurnal oceanological stations on September 16–17 (*a*), September 27–28 (*b*) and October 19–20, 2019 (*c*)

Пространственно-временные вариации концентрации хлорофилла *a*.

Полученные оценки вариаций концентрации хлорофилла при выполнении суточных станций стимулировали более детальное исследование пространственно-временной изменчивости данного параметра с привлечением спутниковых

данных. Интенсивность развития фитопланктона, продолжительность активной фазы цветения, характер изменчивости во времени и пространстве зависят от океанологических, гидрохимических и ряда других условий ⁶ [11]. Северо-восточный шельф Сахалина является динамически активным районом, где обильное поступление биогенных веществ происходит из нескольких источников. В связи с этим пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла *a* в этом районе имеет свои характерные особенности. Результаты разложения исходного поля данного параметра методом ЕОФ показали, что первые 10 мод описывают 80 % суммарной дисперсии, где на первую моду приходится более 67 %, что указывает на устойчивую структуру сезонных процессов фотосинтеза в этом районе. На рис. 10 представлены пространственные распределения двух первых (ключевых) мод разложения поля концентрации хлорофилла *a* по ЕОФ (полагались безразмерными), а на рис. 11 – соответствующие им временные функции.



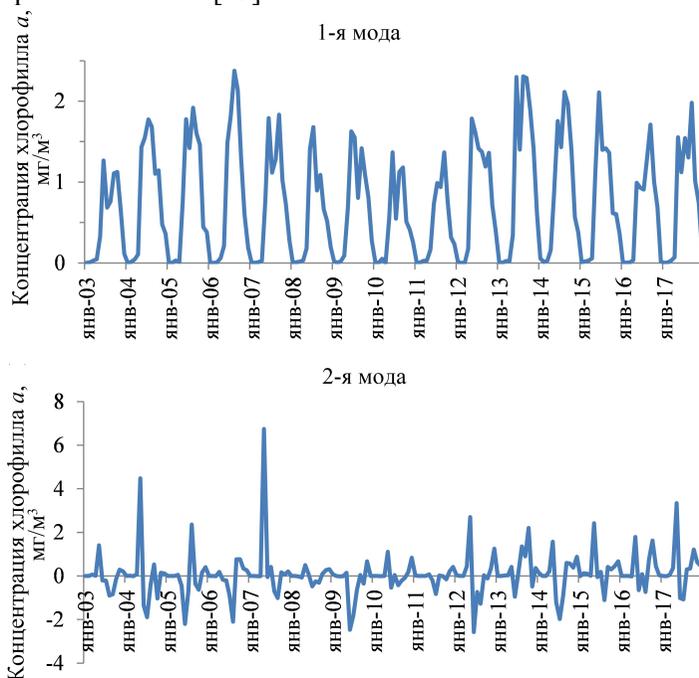
Р и с. 10. Пространственное распределение векторов первой и второй мод ЕОФ у северо-восточного побережья Сахалина за 2003–2017 гг.

F i g. 10. Spatial distribution of the vectors of the first and the second EOF modes near the Sakhalin northeastern coast for 2003–2017

График временной функции первой моды показывает основные закономерности изменчивости концентрации хлорофилла *a*, которые носили устойчивый сезонный характер. С января по апрель большая часть акватории покрыта льдом, а свободная ото льда поверхность характеризуется слабой фотосинтетической деятельностью, обусловленной рядом причин, в том числе и неблагоприятно низкой температурой воды ⁵, поэтому значения временной функции близки к нулю. Активные процессы фотосинтеза происходят в этом

⁶ *Матвеев В. И.* Гидрохимические условия биологической продуктивности Охотского моря : дисс. ... канд. геогр. наук. Владивосток : ТИНРО, 2006. 141 с.
 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 5 2023

районе в течение всего безледного периода. В амплитуде первой моды выделяются два сезонных пика цветения фитопланктона: весенний, как правило, в июне и осенний – в сентябре, что является характерным для морей субарктического типа [12]. В отдельные годы весенний максимум сдвигался на май, реже на июль, а осенний – на октябрь. Интенсивность цветения имела значительные межгодовые вариации и зависела прежде всего от взаимодействия нескольких ключевых факторов: динамики таяния льда, температуры поверхности воды и обеспеченности биогенными веществами, обусловленной преимущественно речным стоком [13].



Р и с. 11. Временные функции первой и второй мод ЕОФ у северо-восточного побережья Сахалина за 2003–2017 гг.

F i g. 11. Time functions of the first and the second EOF modes near the Sakhalin northeastern coast for 2003–2017

Весенняя фаза развития микроводорослей в большей степени определяется темпами таяния сформировавшегося в зимний период ледяного покрова. В 2006 и 2011 гг. вследствие малоледной зимы весеннее цветение было слабовыраженным⁵. Основная часть биогенных элементов поступала в этот район со стоком р. Амур. Поэтому активность процессов фотосинтеза зависела в первую очередь от величины амурского стока. С влиянием данного фактора связано снижение продуцирования фитопланктона в период летней межени и обильным развитием фитопланктона в период осеннего увеличения стока вследствие активизации циклонической деятельности над Приамурьем. Поэтому, в отличие от других районов Охотского моря, где доминирует весеннее цветение фитопланктона, интенсивность осеннего цветения в изучаемом районе зачастую бывает выше.

По пространственному распределению первой моды ЕОФ определились зоны повышенного продуцирования фитопланктона (рис. 12). Концентрация хлорофилла *a* увеличивалась по направлению от мористой части к побережью. В прибрежной зоне содержание пигмента существенно возрастало (до 10 мг/м³ и выше). Значительное число биогенных элементов у побережья прибывало не только с модифицированными амурскими водами, но и со стоком из многочисленных лагун, являющихся, в свою очередь, устьевыми зонами рек.

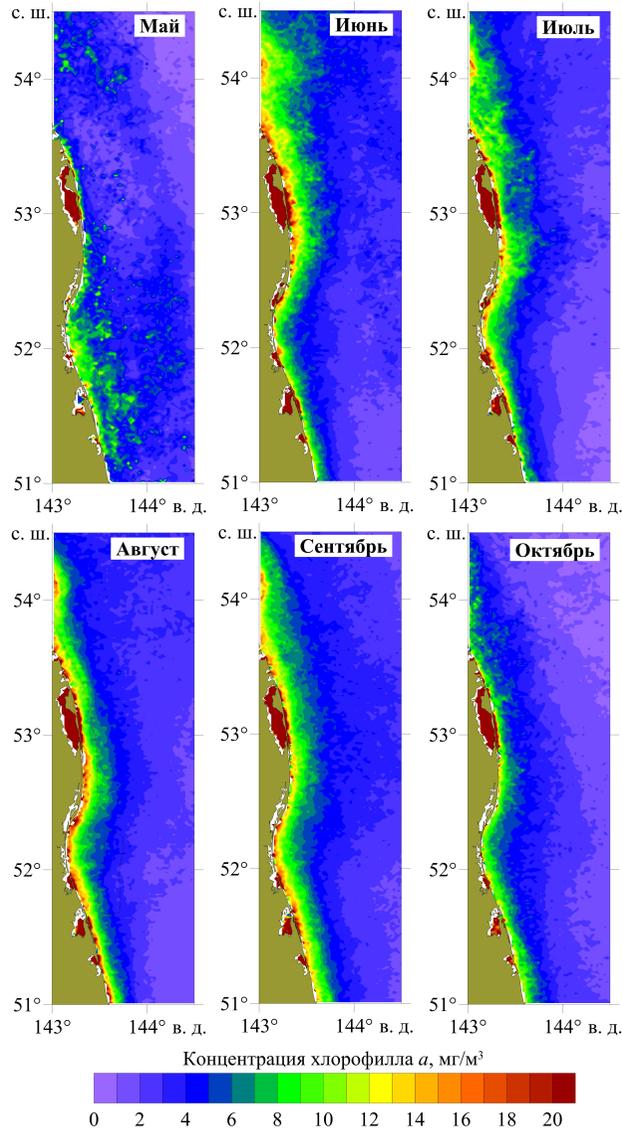


Рис. 12. Средние многолетние распределения концентрации хлорофилла *a* у северо-восточного побережья Сахалина за 2003–2017 гг.

Fig. 12. Average long-term distributions of the chlorophyll *a* concentrations near the Sakhalin north-eastern coast for 2003–2017

Согласно методу разложения по ЕОФ, вторая и последующие моды выявляют локальные особенности изменчивости изучаемого параметра. В нашем случае вторая мода ЕОФ (3 % суммарной дисперсии) выделила два участка (рис. 10), в которых пик цветения фитопланктона наступает в разное время, и, следовательно, в них активные процессы фотосинтеза происходят в противофазе.

Первый участок высоких концентраций хлорофилла *a* (таблица) целиком соответствует Пильтунскому району нагула в период с июня по июль (в некоторые годы по август). В это время там сгруппирована основная масса богатых биогенными элементами модифицированных амурских вод [5, 14, 15].

**Средние многолетние концентрации хлорофилла *a* (мг/м³)
у северо-восточного побережья Сахалина по спутниковым данным
Average long-term chlorophyll *a* concentrations (mg/m³) near the Sakhalin
northeastern coast based on satellite data**

Нагульный район / Feeding area	Май / May	Июнь / June	Июль / July	Август / August	Сентябрь / September	Октябрь / October
Пильтунский / Piltunsky	6,1	13,5	11,8	12,6	11,8	8,9
Морской / Marine	5,7	4,2	4,1	4,6	5,2	4,3

Второй участок, расположенный южнее 53° с. ш. на изобатах от 20 до 200 м, включает в себя Морской нагульный район. В этом районе отмечается два периода высоких концентраций хлорофилла *a*. Первый, как правило, в мае, во время цветения фитопланктона на кромке тающего льда. Второй – с августа по октябрь, когда в этом районе формируется зона повышенного продуцирования фитопланктона. Причина данного явления неясна. Одно из возможных объяснений – выдвинутая выше гипотеза о возможном приливном перемешивании, обеспечивающем необходимое поступление биогенных веществ из глубоких слоев. Наиболее интенсивное цветение в этом районе отмечалось в августе 2005 и 2013 гг., октябре 2013 и 2016 гг.

Таким образом, в результате анализа спутниковых данных с применением метода ЕОФ были определены наиболее значимые закономерности и особенности пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое северо-восточного шельфа Сахалина, в том числе в пространственной структуре второй моды, в которой выделяются как Пильтунский, так и Морской участки нагула серых китов как зоны повышенной концентрации хлорофилла *a*.

Заключение

Выполненный анализ материалов натурального эксперимента наглядно показал, что на Морском участке нагула серых китов на северо-восточном шельфе Сахалина имеет место постоянно работающий механизм (усиливающийся и ослабевающий вместе с суточными приливами с полумесячной цикличностью), обеспечивающий существование локальных зон с вертикальным движением вод. При этом зоны совпадают с районами нагула серых китов.

Были выявлены значимые суточные вариации температуры и солености морской воды в придонном слое, резко увеличившиеся на начальном этапе заглупления модифицированной воды амурского стока 25–28 сентября (максимальный размах 4,5 °С и 2,5 ЕПС). Максимум температуры и минимум солености наступали через 2–3 ч после максимального прилива. При резком уменьшении приливов в рамках полумесячных неравенств (экваториальный прилив) суточные колебания температуры и солености становятся почти незаметными, но не сразу, а со сдвигом около 2 сут.

Более наглядно роль приливного перемешивания обнаруживается по результатам выполнения суточных океанологических станций. Даже при сравнительно малых приливах 16–17 сентября заглупление изотерм и изогалин достигало 10–15 м, при больших приливах вода поверхностного слоя заглупляется до дна. Этот механизм способствует поступлению на глубину фитопланктона с поверхности, что обеспечивает необходимое питание бентосу и отражается на характере донного грунта, увеличивая долю мелкого песка и илистых фракций. К поверхности поднимается вода, богатая биогенными элементами. Данный результат согласуется с особенностями пространственной структуры второй моды, полученной при анализе изменчивости спутниковых данных о концентрации хлорофилла *a* методом ЕОФ. Максимальные концентрации для этой моды отмечены на Пильтунском и Морском участках, хотя и на различных интервалах времени (на первом в июне – августе, на втором – в мае и в сентябре – октябре). Наиболее вероятно, формирование кормовой базы специфических донных сообществ, в которых преобладают сестонофаги, обусловлено именно этими особенностями гидрологического режима.

Именно благодаря суточным шельфовым волнам на северо-восточном шельфе Сахалина, обеспечивающим локальное приливное перемешивание (очень редко наблюдаемое вдали от проливов, подводных гор и иных особенностей донного рельефа), в Морском районе нагула возникают условия, способствующие устойчивому формированию кормовой базы серых китов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gray whale southbound migration surveys 1967–2006: An integrated re-analysis / J. L. Laake [et al.] // *The Journal of Cetacean Research and Management*. 2012. Vol. 12, no. 3. P. 287–306.
2. *Богословская Л. С.* Серый кит // *Природа*. 1996. № 12. С. 46–60.
3. *Durkina V. B., Chapman J. W., Demchenko N. L.* *Ampelisca eschrichtii* Krøyer, 1842 (Ampeliscidae) of the Sakhalin Shelf in the Okhotsk Sea starve in summer and feast in winter // *Peer J – Life and Environment*. 2018. № 6. e4841. doi:10.7717/peerj.4841
4. *Фадеев В. И.* Исследование бентоса и кормовой базы в районах летнего нагула корейско-охотской популяции серого кита (*Eschrichtius robustus*) в 2001–2003 гг. : материалы Комплексного регионального проекта ДВО РАН по программе Президиума РАН // *Реакция морской биоты на изменения природной среды и климата*. Владивосток : Дальнаука, 2007. С. 213–232.
5. *Власова Г. А., Васильев А. С., Шевченко Г. В.* Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М. : Наука, 2008. 359 с.
6. *Рутенко А. Н., Храпченков Ф. Ф., Соснин В. А.* Прибрежный апвеллинг на шельфе о. Сахалин // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 2. С. 44–53.

7. Оценка экологической емкости среды для серых китов (*Eschrichtius robustus*) в известных районах нагула у северо-восточного побережья о-ва Сахалин / В. С. Лабай [и др.] // Морские млекопитающие Голарктики : сборник научных трудов по материалам X международной конференции, посвященной памяти А.В. Яблокова, Архангельск, 29 октября – 02 2018 года. Архангельск : РОО "Совет по морским млекопитающим", 2019. Том 1. С. 174–185. EDN NOCAEU. doi:10.35267/978-5-9904294-0-6-2019-1-174-185
8. *Багров Н. А.* Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды Центрального института прогнозов. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
9. *Рабинович А. Б., Жуков А. Е.* Приливные колебания на шельфе острова Сахалин // Океанология. 1984. Т. 24, № 2. С. 238–244.
10. *Shevchenko G. V., Rabinovich A. B., Thomson R. E.* Sea-ice drift on the northeastern shelf of Sakhalin Island // Journal of Physical Oceanography. 2004. Vol. 34, iss. 11. P. 2470–2491. <https://doi.org/10.1175/JPO2632.1>
11. *Мордасова Н. В., Метревели М. П.* Фитопигменты в Охотском море. // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. М. : ВНИРО, 1997. С. 199–205.
12. *Вентцель М. В., Крылов В. В., Леваишова С. С.* Закономерности распределения фитопланктона по акватории Северно-Западной Пацифики // Морские гидробиологические исследования. М. : ВНИРО, 2000. С. 11–21.
13. *Цхай Ж. Р.* Анализ сезонных вариаций концентрации хлорофилла-а методом естественных ортогональных функций в Охотском море по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2007. № 6. С. 37–45. EDN IBGVDP.
14. *Рутенко А. Н., Соснин В. А.* Гидродинамические процессы на шельфе о. Сахалин в прибрежном Пильтунском районе кормления серых китов и их связь с атмосферной циркуляцией // Метеорология и гидрология. 2014. № 5. С. 74–93. EDN QGPLVZ.
15. *Шевченко Г. В., Частиков В. Н.* Сезонная изменчивость гидрологических характеристик на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 246–263. EDN GXVMMN. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).19

Об авторах:

Шевченко Георгий Владимирович, зав. лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) (693023, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196), ведущий научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693023, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0785-4618**, shevchenko_zhora@mail.ru

Цхай Жанна Романовна, ученый секретарь, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) (693023, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1061-931X**, tshay@yandex.ru

Частиков Валерий Николаевич, ведущий специалист лаборатории океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) (693023, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196), v.chastikov@sakhniro.ru