

УДК 551.464:543.319(265.54)

**Ю.А. Барабанщиков, П.Я. Тищенко, П.Ю. Семкин, Т.И. Волкова,
В.И. Звалинский, Т.А. Михайлик, С.Г. Сагалаев, А.Ф. Сергеев,
П.П. Тищенко, М.Г. Швецова, Е.М. Шкирникова***

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

СЕЗОННЫЕ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БУХТЫ ВОЕВОДА (АМУРСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

В 2011 и 2012 гг. проведены сезонные гидролого-гидрохимические исследования в бухте Воевода (май, август, октябрь 2011 и февраль 2012 гг.). Показано, что мористую и среднюю части бухты Воевода (за исключением бухты Круглой) можно рассматривать как район со свободным обменом водами с Амурским заливом. Этот обмен осуществляется за счет течения в поверхностном слое, идущего вдоль южного побережья бухты в направлении кутовой части, и противоположного по направлению течения вдоль северного побережья. В бухте Мелководной из-за специфической орографии береговой линии и действия речного стока, максимального в летний сезон, формируется замкнутая циркуляция циклонического типа. Благодаря этому обмен вод между бухтой Мелководной и Амурским заливом ослаблен, и в бухте формируются локальные особенности гидрохимических параметров. Концентрация кислорода и парциальное давление углекислого газа вод бухты Мелководной во многом определяются интенсивностью разнонаправленных процессов продукции и деструкции органического вещества. Их особенность здесь заключается в том, что органическое вещество синтезируют три типа автотрофов: *Zostera marina*, перифитон и диатомовые водоросли (фитопланктон). Обсуждаются сезонные изменения баланса продукционно-деструкционных процессов на основании комплекса гидрохимических параметров.

Ключевые слова: термохалинные условия, обмен вод, парциальное давление CO_2 , растворенный кислород, продукционно/деструкционные процессы, *Zostera marina*.

* Барабанщиков Юрий Александрович, аспирант, ведущий инженер, e-mail: biw90@mail.ru; Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru; Семкин Павел Юрьевич, младший научный сотрудник, e-mail: pahno@poi.dvo.ru; Волкова Тамара Ивановна, научный сотрудник, e-mail: volkova@poi.dvo.ru; Звалинский Владимир Иванович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, e-mail: viz@poi.dvo.ru; Михайлик Татьяна Александровна, младший научный сотрудник, e-mail: tatyana_libra@mail.ru; Сагалаев Сергей Григорьевич, научный сотрудник, e-mail: sagalaev@poi.dvo.ru; Сергеев Александр Федорович, старший научный сотрудник, e-mail: sergeev@poi.dvo.ru; Тищенко Петр Павлович, научный сотрудник, e-mail: eq15@poi.dvo.ru; Швецова Мария Геннадиевна, научный сотрудник, e-mail: chippers@rambler.ru; Шкирникова Елена Михайловна, научный сотрудник, e-mail: elmi@poi.dvo.ru.

Barabanshchikov Yuriy A., leading engineer, e-mail: biw90@mail.ru; Tishchenko Pavel Ya., D.Sc., head of laboratory, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru; Semkin Pavel Yu., junior researcher, e-mail: pahno@poi.dvo.ru; Volkova Tamara I., researcher, e-mail: volkova@poi.dvo.ru; Zvalinsky Vladimir I., D.Sc., head researcher, e-mail: viz@poi.dvo.ru; Mikhailik Tatyana A., junior researcher, e-mail: tatyana_libra@mail.ru; Sagalaev Sergey G., researcher, e-mail: sagalaev@poi.dvo.ru; Sergeev Aleksandr F., senior researcher, e-mail: sergeev@poi.dvo.ru; Tishchenko Petr P., researcher, e-mail: ek15@poi.dvo.ru; Shvetsova Maria G., researcher, e-mail: chippers@rambler.ru; Shkirknikova Elena M., researcher, e-mail: elmi@poi.dvo.ru.

Barabanshchikov Yu.A., Tishchenko P.Ya., Semkin P.Yu., Volkova T.I., Zvalinsky V.I., Mikhailik T.A., Sagalaev S.G., Sergeev A.F., Tishchenko P.P., Shvetsova M.G., Shkirnikova E.M. Seasonal hydrological and hydrochemical surveys in the Voevoda Bay (Amur Bay, Japan Sea) // Izv. TINRO. — 2015. — Vol. 180. — P. 161–178.

Hydrological and hydrochemical surveys were conducted in the Voevoda Bay in May, August, and October, 2011 and February, 2012, in total 140 stations. Free water exchange of the bay with the Amur Bay is observed, with exception of its inner bights Kruglaya and Melkovodnaya. The water exchange is maintained by anticyclonic circulation with the inflow along the southern coast and outflow along the northern coast of the Voevoda Bay. However, the opposite cyclonic circulation is observed in the Melkovodnaya Bight because of its coastal line patterns and fresh water discharge by the river. Dissolved oxygen content and partial pressure of CO₂ in the bay waters are determined mostly by intensive processes of production and destruction of organic matter. There are three main groups of primary producers there, as diatom algae, sea grass *Zostera marina*, and periphyton. Specific chemical regime is formed in the Melkovodnaya Bight, in particular in winter when primary production depends on the ice cover and is driven by variations of photosynthetically active radiation passed through the ice. Seasonal variability of production-destruction processes intensity is discussed on the data of chemical parameters changes.

Key words: hydrological conditions, water exchange, CO₂ partial pressure, dissolved oxygen, production/destruction process, *Zostera marina*.

Введение

Особенность бухт третьего порядка зал. Петра Великого состоит в том, что все параметры среды здесь чрезвычайно изменчивы как в пространстве, так и во времени (Вышкварцев, 1979; Будаева и др., 2006; Рачков, 2006; Рогачев, Шлык, 2012). В настоящее время эти бухты привлекают внимание частных компаний в связи с возможным использованием для создания марикультурных хозяйств, зон отдыха, лечебных и рекреационных центров. После строительства моста через прол. Босфор Восточный бухты о. Русского становятся объектом интенсивного использования. При этом повышаются экологические риски для бухт, что вызывает озабоченность у государственных и общественных организаций, контролирующих общее экологическое состояние шельфа зал. Петра Великого. Как правило, бухты третьего порядка либо не исследованы, либо малоисследованы. Именно к таким бухтам относится бухта Воевода, расположенная в юго-западной части о. Русского.

В настоящее время в бухте Воевода на марикультурных хозяйствах культивируются приморский гребешок *Mizuhopecten yessoensis* и тихоокеанская мидия *Mytilus trossulus* (Гаврилова, Кучерявенко, 2011) по программе «Мониторинг по охране биоресурсов и окружающей среды при проведении изыскательских работ, эксплуатации запасов лечебных илов в бухте Мелководной бухты Воевода острова Русский» (данные ООО «ДальСТАМ»). В бухту заходят промысловые виды рыб: камбалы Pleuronectidae, навага *Eleginus gracilis*, пиленгас *Liza haematocheilus*, корюшка *Hypomesus japonicus* и др. На побережье бухты Воевода в районе ее кутовой части располагается лечебно-оздоровительный комплекс «Белый Лебедь», где активно практикуется пелотерапия (грязелечение). Сотрудниками санатория в течение всего теплого периода года ведется добыча донных осадков (лечебные грязи) в мелководных районах бухты.

В бухте Воевода произрастают обширные заросли zostеры (*Zostera marina*), которые, как известно, играют большую роль в качестве продуцента органического вещества (ОВ) (Кафанов, Лысенко, 1988а, б). Плотность зарослей zostеры в исследуемой акватории может достигать 50 кустов на 1 м²*. Обилие zostеры привлекает массу рыб, ее заросли служат излюбленным местом нереста и нагула молоди некоторых промысловых рыб, в частности тихоокеанской сельди *Clupea pallasii* (Амброз, 1931; Дерюгин, 1939; Посадова и др., 1982), и местообитанием разных видов креветок (Лысенко, 1982).

* Результаты поисков и оценки лечебной грязи в бухте Мелководная (б. Воевода) Японского моря, Владивостока, Приморского края. С подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2008. Участок Мелководной за 2006–2008 гг. : геологический отчет. 20 с.

Очевидно, что гидрологические и гидрохимические условия бухты оказывают существенное влияние на биоту и свойства донных отложений. Имеющиеся в литературе данные по условиям обитания гидробионтов в бухте Воевода, в частности по сезонному ходу температуры воды, малочисленны (Ляшенко, 2005).

Цель настоящей работы — представить результаты сезонных измерений гидрологических (температура, соленость) и гидрохимических (растворенный кислород, парциальное давление углекислого газа, биогенные вещества) параметров вод бухты.

Материалы и методы

Бухта Воевода располагается в восточной части мористого района Амурского залива (зал. Петра Великого, Японское море), глубоко вдаваясь в западное побережье о. Русского (рис. 1). Вход в бухту Воевода находится между камнем Матвеева и мысом Васильева. В северный берег бухты вдаются бухты Круглая и Мелководная. Акватория бухты Воевода имеет площадь около 4,0 км², бухты Мелководной — около 2,4 км². Прибрежье у высоких берегов приглубое (уже на удалении 50–100 м от берега глубины не менее 5–10 м), но с большим количеством подводных и надводных камней. У низменных берегов прибрежье мелководное, обычно глубины в 10 м удалены от берега не ближе 1 км. Дно каменистое, у низменных берегов — песчаное и песчано-илистое. С востока в бухту впадает единственная на острове небольшая речка Русская. Она имеет протяженность около 6 км и берет начало на севере острова на высоте 125–150 м над уровнем моря. Расход воды изменяется от 0,2 до 2,0 м³/с. В питании р. Русской преобладают дождевые воды. Замерзает она в конце ноября. На некоторых участках вода в русле промерзает до дна. Вскрытие реки часто сопровождается верховодкой, вода идет поверх льда. Ледохода не бывает, лед тает на месте. В начале лета уровень понижается, река сильно мелеет. Бассейн р. Русской покрыт лесом, практически не заселен и не застроен.

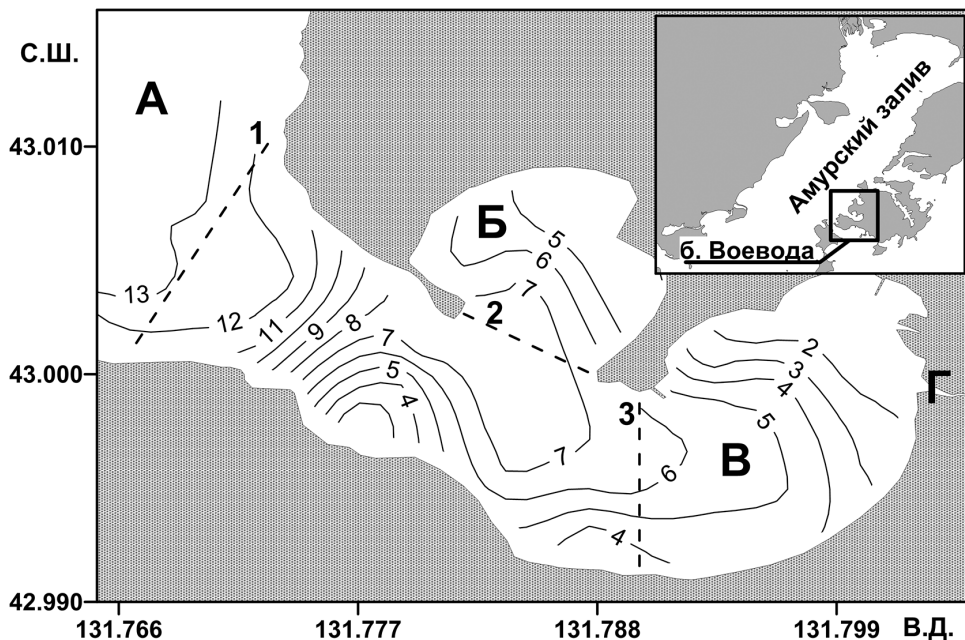


Рис. 1. Батиметрия бухты Воевода: А — Амурский залив; Б — бухта Круглая; В — бухта Мелководная; Г — устье р. Русской. Пунктирные линии 1, 2, 3 обозначают границы соответственно бухт Воевода, Круглая и Мелководная

Fig. 1. Bottom topography of the Voevoda Bay: А — Amur Bay; Б — Kruglaya Bay; В — Melkovodnaya Bay; Г — Estuary of the Russian River. Dashed lines 1, 2, 3 match the borders of Voevoda, Kruglaya and Melkovodnaya Bays, respectively

* Лощия северо-западного берега Японского моря. СПб.: ГУНИО МО, 1996. 360 с.

Исследования проводились весной с 28 по 29 мая, летом с 3 по 6 августа и осенью с 12 по 13 октября в 2011 г., а также в зимний сезон с 6 по 9 февраля 2012 г. Для каждого сезона было выполнено от 35 до 37 станций. Работы в мористой части района проводились с борта НИС «Импульс», в мелководных районах — на надувной лодке. Глубину на каждой станции определяли с помощью эхолота Garmin 421S. В зимний сезон акватория покрыта льдом, для бурения которого использовали бур с диаметром шнека 20 см. Отбор проб из поверхностного горизонта производился непосредственно около нижней кромки льда. Расположение станций для каждого сезона приведено на рис. 2. На каждой станции отбирались пробы с поверхностного (0,5–1,0 м от поверхности) и придонного (0,5–1,0 м от дна) горизонтов с помощью пятилитрового батометра Нискина. Измеряли следующие параметры: соленость, O_2 , pH, щелочность, концентрации биогенных веществ (силикаты, фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний), гумусового вещества, хлорофилла *a*. На основании данных о pH и общей щелочности (ТА) производился расчет параметров карбонатной системы: парциального давления углекислого газа и количества растворенного неорганического углерода (pCO_2 , DIC) (Методы ..., 1988*; Тищенко и др., 2006). На каждой станции с помощью зонда RBR-620XRХ проводилось вертикальное зондирование водной толщи с использованием датчиков температуры, электропроводности, флюоресценции хлорофилла *a*, мутности и освещенности.

Результаты и их обсуждение

Температура и соленость

Сезонная и пространственная изменчивость температуры и солености в бухте Воевода во многом зависит от тех же климатических и гидрологических процессов, которые определяют режим вод Амурского залива. Термический и соленостный режимы вод Амурского залива, как и зал. Петра Великого в целом, широко обсуждаются в литературе. В годовом ходе температуры воды для зал. Петра Великого отчетливо выделяется годовая гармоника, которая формируется под действием основных климатообразующих воздушных масс (Климат Владивостока, 1983**); Лучин и др., 2005). Отличительной особенностью океанографии Амурского залива является сильное распреснение вод в летний сезон (Бирюлин и др., 1970; Данченков и др., 2003; Будаева и др., 2010). В зимний сезон, в условиях льдообразования, соленость Амурского залива достигает максимальных значений (Юрасов и др., 2007). Эти характерные для Амурского залива тенденции сезонной изменчивости термохалинных свойств вод отмечены и для вод бухты Воевода и в ходе нашего гидролого-гидрохимического исследования. Поле температуры и солености в период весенней и осенней съемок характеризует эти сезоны как переходные между наиболее теплым летним сезоном и холодным зимним сезоном (рис. 2, 3). Так же, как и в Амурском заливе, в летний сезон воды кутовой части бухты имеют минимальную соленость, а в зимний сезон — максимальную (рис. 3). Весной (см. рис. 2, а) в период съемки температура поверхностных и придонных вод находилась в пределах соответственно 11,0–14,0 и 5,5–13,5 °С. В период летней съемки (рис. 2, б) температура повсеместно превышала значения 17,9 °С, характерные для мористой части района, достигая максимальных значений — 20,3 °С — в кутовой части бухты. В период осеннего охлаждения температура поверхностных и придонных вод находилась на уровне соответственно 14,0–14,4 и 14,0–11,5 °С. Поскольку на выполнение съемок в разные сезоны года затрачивалось несколько суток, а работы в период каждой съемки проводились при различных метеоусловиях, выделение отдельных структурных зон по температуре не представилось возможным. Тем не менее следует отметить, что минимальная температура придонного слоя в период осенней съемки была зафиксирована в средней

* Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов : метод. пособие. М.: ВНИРО, 1988. 120 с.

** Климат Владивостока. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 248 с.

части бухты на глубинах 7,0–7,5 м. При этом для весенней и летней съемок минимальная температура наблюдалась в мористой части с глубинами около 13 м. Объяснением этой особенности может быть заток вод пониженной температуры вдоль северной глубоководной части бухты незадолго до выполнения съемки.

Интересный результат был получен при сравнении поверхностных и придонных значений температуры воды в зимний сезон (рис. 2, г). На основной части акватории бухты в период съемки температура воды на придонном горизонте оказалась выше, чем в поверхностном слое. При этом температура придонных вод достигала минус 1,20 °С, в то время как температура поверхностных вод на основной части акватории находилась на уровне минус 1,78 °С. Этот эффект был ранее отмечен в Амурском заливе (Лучин, Сагалаев, 2005; Лазарюк и др., 2012). Возможным объяснением увеличения температуры в направлении дна может быть прогрев придонного слоя воды за счет отдачи тепла донными осадками, которое, в свою очередь, было накоплено в летний сезон.

Поскольку соленость — один из наиболее консервативных океанографических параметров, на основании этих данных можно выделить ряд структурных особенностей вод бухты, оказывающих влияние на биогеохимические процессы в ней.

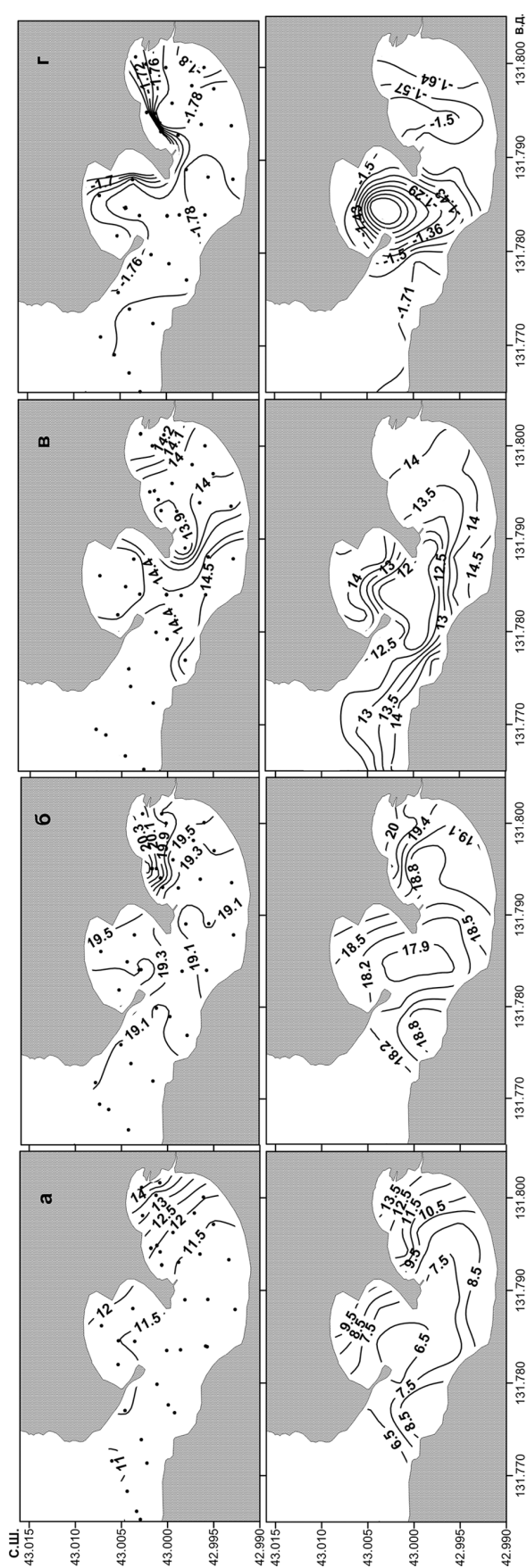


Рис. 2. Распределение температуры (°С) в поверхностных (верхний ряд) и придонных (нижний ряд) водах бухты Воевода для разных сезонов: **а** — май, **б** — август, **в** — октябрь 2011 г.; **г** — февраль 2012 г.

Fig. 2. Water temperature (°C) at the sea surface (top panel) and the sea bottom (bottom panel) in the Voevoda Bay: **a** — May, **б** — August, **в** — October 2011; **г** — February 2012

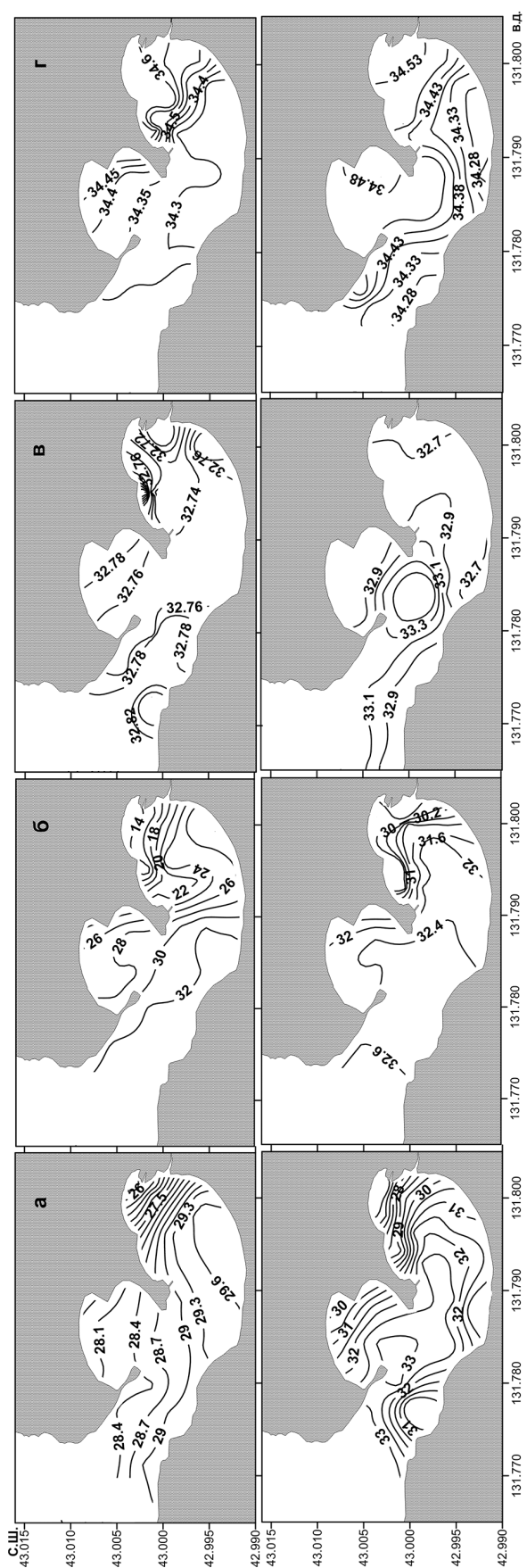


Рис. 3. Распределение солёности (‰) в поверхностных (верхний ряд) и придонных (нижний ряд) водах бухты Воевода для разных сезонов: а — май, б — август, в — октябрь 2011 г.; г — февраль 2012 г.
 Fig. 3. Salinity at the sea surface (top panel) and the sea bottom (bottom panel) in the Voevoda Bay: а — May, б — August, в — October 2011; г — February 2012

Общий контур распределения изолиний солёности в период весенней съёмки для поверхностного горизонта (рис. 3, а) косвенно указывает на приток вод повышенной солёности вдоль южного берега акватории из моря в бухту. При этом солёность поверхностного слоя в мористой части бухты находилась на уровне 29,0 и 28,3 ‰ в районах соответственно южного и северного побережья. Однако распределение солёности для придонного горизонта в этой части бухты имело противоположный характер: она в этом районе повышалась до 31 и 33 ‰ соответственно у южного и северного побережий. Одно из возможных объяснений этому факту состоит в том, что заток поверхностных вод из Амурского залива происходит преимущественно вдоль южного побережья, а выход опреснённых вод — вдоль северного побережья (циклоническая циркуляция). Для придонных вод, благодаря компенсационным эффектам, ситуация противоположная. Максимальная солёность (29,6 ‰) в весенней съёмке для поверхностного горизонта была обнаружена в южной акватории бухты Мелководной. Увеличение солёности поверхностного слоя для данного района может быть вызвано выходом вод придонного слоя на мелководье южного побережья. В условиях отсутствия источников распределения в этот сезон (в р. Русской весенний паводок практически отсутствует) в направлении кутовой части солёность понижается до 26 ‰. У дна тенденция изменения солёности в на-

правлении кутовой части аналогичная (уменьшение солёности в направлении кутовой части). Следует отметить, что в бухте Мелководной воды в районе северного побережья имели меньшую солёность, чем воды в районе южного побережья, что обусловлено существованием небольшого ключа «Русское», впадающего в северную часть бухты Мелководной.

В период летней съёмки (рис. 3, б) распределение солёности в поверхностном горизонте мористого района было подобным распределению солёности весной. Изолиния 32 ‰ отделяла воды повышенной солёности, проникающие вдоль южного побережья в бухту, от вод пониженной солёности, выходящих из бухты. Распределение солёности в районе бухты Мелководной в период летней съёмки во многом определилось влиянием р. Русской, расход которой в это время был наибольшим в сравнении с периодами других съёмок. В результате повышенного речного стока воды кутовой части имели солёность на уровне 14 ‰. При этом под действием стокового течения линза солоноватых вод распространялась вдоль северного побережья бухты Мелководной на юго-запад. Далее поток солоноватых вод в районе входа в бухту Мелководную менял направление на юго-восточное. Поток вод повышенной солёности, идущих вдоль южного побережья бухты Воевода из Амурского залива, создавал условия для возникновения замкнутой ячейки циркуляции циклонического направления с пониженной солёностью. В придонном горизонте в период данной съёмки поле солёности имело аналогичную завихренность.

Развитие плотностной конвекции и усиление ветров северного и северо-западного направления, характерных для периода осенней съёмки (Климат Владивостока, 1983*; Юрасов и др., 2007), вызывали интенсивное вертикальное перемешивание вод в данный сезон. Расход р. Русской в период осенней съёмки был минимальным по сравнению с расходом в периоды весенней и летней съёмок. Уменьшение речного стока, вертикальное перемешивание и усиление водообмена бухты с Амурским заливом привело к высокой пространственной однородности солёности поверхностного горизонта в период осенней съёмки. Солёность для всей акватории бухты Воевода изменялась от 32,72 ‰ в кутовой части до 32,82 ‰ в районе захода вод Амурского залива в бухту. В придонных горизонтах пространственные изменения солёности также были незначительными, от 32,7 до 33,3 ‰, что существенно меньше в сравнении с весенним и летним сезонами (рис. 3, в). Характерная особенность пространственного распределения солёности в придонном горизонте — наличие вод повышенной солёности в районе средней части бухты. Области повышенной солёности и пониженной температуры совпадают. Предполагается, что плотные воды пониженной температуры и повышенной солёности проникли в бухту до периода съёмки и заполнили собой центральную котловину бухты. Центральная котловина в бухте Воевода представляет собой своеобразную ловушку для плотных вод.

Максимальные значения солёности в бухте Воевода были зафиксированы в зимний сезон (рис. 3, г). В противоположность остальным сезонам, наиболее солёные воды (34,64 ‰) были зафиксированы в кутовой части бухты, а не в её мористом районе. Повышенная солёность вод кутовой части объясняется льдообразованием и пониженной динамикой вод в условиях покрытия припаем, поскольку осолоняющий эффект от льдообразования тем выше, чем меньше глубина бассейна. В данном случае бухта Воевода служит источником вод повышенной солёности для Амурского залива, а не наоборот, в отличие от других сезонов. Следует отметить, что в ряде случаев солёность поверхностного слоя превышала солёность придонного слоя. Например, в мористом районе солёность поверхностного и придонного слоев была соответственно 34,36 и 34,30 ‰. Для южной части бухты Мелководной значения солёности для поверхностного и придонного горизонтов составили соответственно 34,28 и 34,26 ‰, а для кутовой части — 34,60 и 34,54 ‰. Данный факт необычен, так как мы наблюдали случай статической неустойчивости (когда более плотные воды находятся над менее плотными водами). Это может означать, что на момент отбора проб более плотные

* Климат Владивостока, 1983.

поверхностные воды формировались в результате льдообразования, а придонные воды уменьшали свою плотность, нагреваясь от ложа бухты и распределяясь поровой водой осадков, соленость которой ниже солености морской воды. При статической неустойчивости начало конвекции определяется критическим числом Рэлея (Тернер, 1977). По-видимому, интенсивность перемешивания, обусловленная конвекцией, «не успевает» за интенсивностью осолонения верхних горизонтов и нагревом нижних горизонтов. Однако это явление требует дополнительного исследования.

Растворенный кислород и парциальное давление углекислого газа

Поскольку в прибрежных высокопродуктивных районах концентрацию кислорода и углекислого газа во многом определяют процессы образования и разложения ОВ (Chen, Borges, 2009; Levin et al., 2009; Тищенко и др., 2011), динамика концентраций этих газов рассматривается в одном разделе. Весной и осенью распределение величин растворенного O_2 и pCO_2 было достаточно однородным, без наличия ярко выраженных экстремумов (рис. 4). Тем не менее необходимо отметить особенность в распределении O_2 и pCO_2 между поверхностными и придонными горизонтами в весенний период (рис. 4, а), которая состоит в том, что концентрации кислорода в придонном горизонте, как правило, выше, а pCO_2 — ниже по сравнению с поверхностным горизонтом. Этот результат мы связываем с более интенсивными продукционными процессами в придонных горизонтах в весенний сезон. Для осеннего сезона ситуация обратная, т.е. доминирует деструкция ОВ над продукцией.

В целом наименьшие концентрации O_2 в исследуемой акватории наблюдались в летний сезон (рис. 4, б). При этом для поверхностного слоя на основной части акватории концентрация кислорода находилась на уровне 240–250 мкмоль/кг. Парциальное давление углекислого газа поверхностного слоя изменялось от 400 мкатм и выше (рис. 5), т.е. почти повсеместно превосходило равновесное с атмосферой (равновесное с атмосферой pCO_2 принимается 400 мкатм). В придонном горизонте концентрация O_2 практически во всей бухте была систематически понижена на 15–20 мкмоль/кг в сравнении с концентрацией O_2 в поверхностном горизонте. Парциальное давление углекислого газа в придонном слое было систематически повышено на 50 мкатм и более. Выделяются две области — бухта Круглая и центральная часть бухты Мелководной. Концентрации кислорода в этих районах были наименьшими в сравнении со всей акваторией и находились на уровне соответственно 170 и 150 мкмоль/кг. Этим же районам соответствуют повышенные значения pCO_2 в придонном слое, соответственно 700 и 780 мкатм. Вблизи устья р. Русской был отмечен локальный максимум кислорода. Наибольшая концентрация O_2 в поверхностном слое данного района достигала 350 мкмоль/кг, а pCO_2 снижалось до 140 мкатм. При этом соленость пробы данного района находилась на уровне 16 ‰. В то же время на станции, удаленной всего на 100 м севернее (станция в кутовой части, с соленостью в поверхностном слое 13 ‰), концентрация O_2 снижалась до 250 мкмоль/кг, а величина pCO_2 возрастала до 680 мкатм, что указывает на высокую пространственную изменчивость интенсивности продукции–деструкции ОВ.

В зимний сезон справедливо ожидать роста концентрации O_2 и понижения величины pCO_2 , поскольку растворимость газов увеличивается с понижением температуры. Особенность распределения этих параметров в том, что тенденция вертикальной и горизонтальной изменчивости величин O_2 и pCO_2 , как правило, была противоположна тенденции вертикальной и горизонтальной изменчивости этих параметров в летний сезон. В поверхностном слое концентрация O_2 находилась в диапазоне 390–450 мкмоль/кг, а величина pCO_2 — в диапазоне от 210 до 260 мкатм, что значительно ниже pCO_2 , равновесного с атмосферой. Концентрация O_2 в придонном слое почти повсеместно превышала концентрацию кислорода в поверхностном слое на величину до 45 мкмоль/кг. При этом pCO_2 придонных вод было ниже на величину до 60 мкатм. Максимальные значения O_2 (455 мкмоль/кг) в придонном слое были зафиксированы в северной части бухты Мелководной, кажущееся потребление кислорода ($AOU = [O_2]_{\text{рав}} - [O_2]_{\text{изм}}$) при этом

достигало минус 100 мкмоль/кг, $p\text{CO}_2$ этих вод снижалось до 195 мкатм, что означает доминирование фотосинтетических процессов (продукция ОВ) над деструкцией ОВ.

Поскольку наиболее контрастно различаются гидролого-гидрохимические характеристики бухты Воевода для летнего и зимнего сезонов, обсуждение ниже будет сосредоточено на сравнении полученных результатов для этих сезонов.

Один из важных факторов, оказывающих влияние на направленность биогеохимических процессов в прибрежных водах для летнего сезона — величина речного стока, поставляющего биогенные вещества в фотический слой (Звалинский и др., 2012). Как было отмечено выше, вблизи устья р. Русской было зафиксировано уменьшение парциального давления углекислого газа и повышение концентрации кислорода, что указывает на доминирование продукции ОВ. Однако область с максимальными значениями хлорофилла *a* находилась на удалении от данного района (рис. 6). Возможной причиной несоответствия полей распределения $p\text{CO}_2$, O_2 и хлорофилла *a* может быть разная интенсивность потребления фитопланктона вторичным звеном пищевой цепи (фитофагами). Поток солоноватых вод в ячейке циркуляции циклонического направления также просматривается по контурам распределения нитратов (рис. 7) и си-

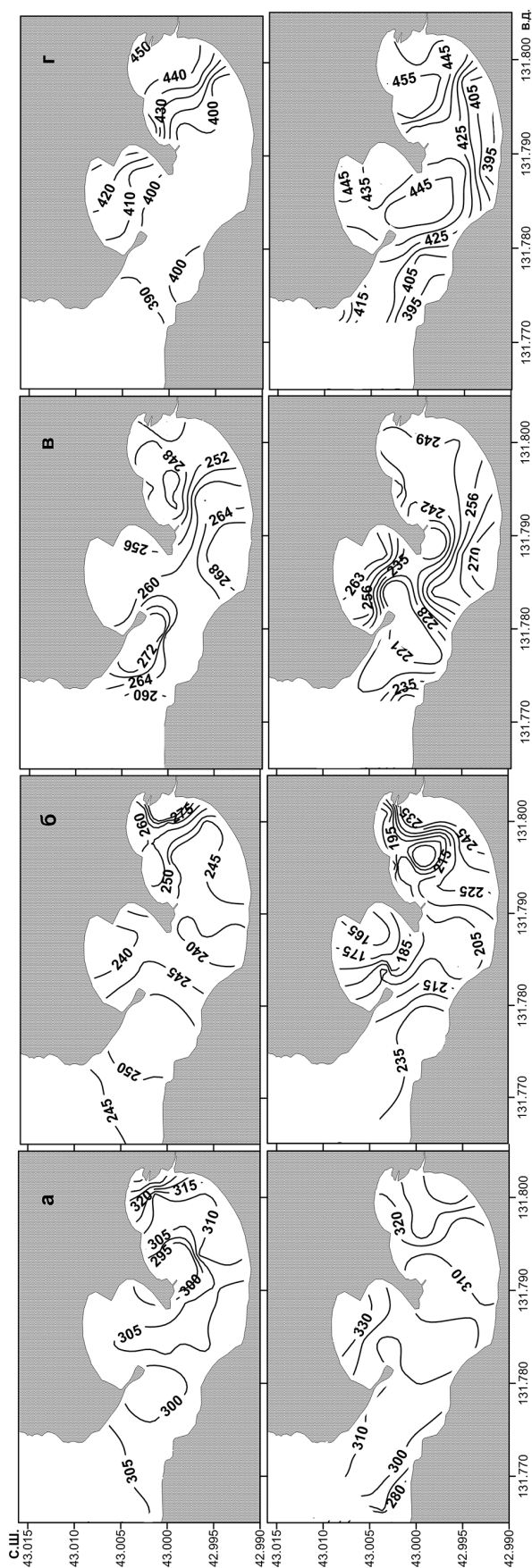


Рис. 4. Распределение концентрации растворенного кислорода (мкмоль/кг) в поверхностных (верхний ряд) и придонных (нижний ряд) водах бухты Воевода для разных сезонов: а — май, б — август, в — октябрь 2011 г.; г — февраль 2012 г.

Fig. 4. Dissolved oxygen content ($\mu\text{mol/kg}$) at the sea surface (top panel) and at the sea bottom (bottom panel) in the Voevoda Bay: а — May, б — August, в — October 2011; г — February 2012

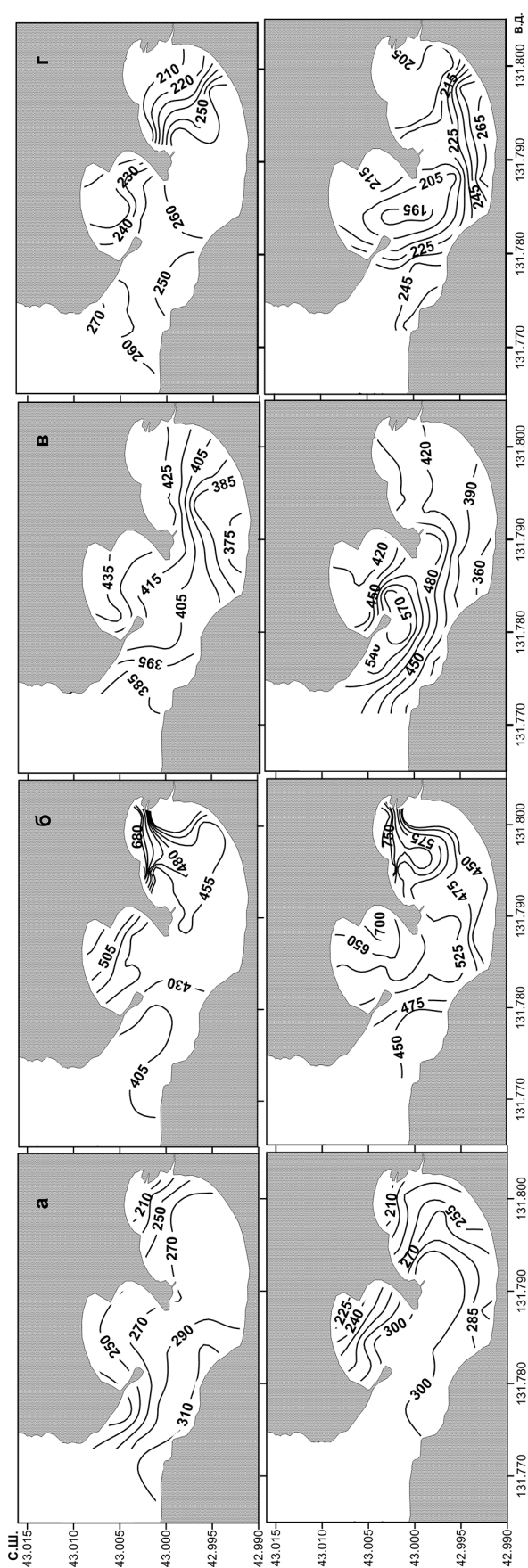


Рис. 5. Распределение парциального давления $p\text{CO}_2$ (матм) в поверхностных (верхний ряд) и придонных (нижний ряд) водах бухты Воеводова для разных сезонов: **а** — май, **б** — август, **в** — октябрь 2011 г.; **г** — февраль 2012 г.

Fig. 5. Partial pressure of CO_2 (matm) at the sea surface (top panel) and at the sea bottom (bottom panel) in the Voevod Bay in 2011: **а** — May, **б** — August, **в** — October 2011; **г** — February 2012

ликатов (рис. 8). Таким образом, акватория бухты Мелководной с соленостью вод от 13 до 26 ‰ и с замкнутой ячейкой циркуляции циклонического направления в летний сезон являлась, в какой-то степени, областью маргинального фильтра для биогенных элементов, поступающих со стоком р. Русской. В этой акватории доминировали продукционные процессы в поверхностном слое и деструкция избыточной биомассы фитопланктона в придонном слое (Лисицин, 1994). Работой маргинального фильтра можно объяснить наличие локальных областей с высоким содержанием кислорода и низкими значениями $p\text{CO}_2$ в поверхностном горизонте и, наоборот, локальных мест с пониженной концентрацией O_2 и повышенной величиной $p\text{CO}_2$ в придонном горизонте центральной части бухты Мелководной. Однако такой взгляд не применим к бухте Круглой, поскольку её воды не испытывают влияния речного стока.

Необходимо отметить, что разложение диатомовых водорослей обычно сопровождается повышением концентрации силикатов, этот эффект ранее нами был отмечен для придонных вод Амурского и Уссурийского заливов (Тищенко и др., 2011; Сёмкин и др., 2012). Однако увеличение концентрации силикатов в местах наиболее интенсивной деструкции не наблюдалось. Глав-

ное отличие бухты Воевода от Амурского и Уссурийского заливов в отношении продукционно-деструкционных процессов состоит в том, что значительную часть автотрофов в бухте составляют донные макрофиты, и в первую очередь заросли zostеры. Наиболее вероятно, что в период летней съемки жизненный цикл zostеры был таков, что деструкция её биомассы доминировала над продукцией. Известно, что продукция zostеры в течение года сильно изменяется в зависимости от местообитания и метеорологических условий (Бергер, 2011). Для цикла жизни zostеры на акваториях Приморья характерна общая закономерность: увеличение биомассы от весны к лету с максимумом в мае-июле, а в летне-осенний период, начиная с августа, снижение биомассы вследствие отмирания листьев и замедления роста (Паймеева, 1984). Визуальные наблюдения в ходе наших исследований действительно подтверждают массовое отмирание листьев zostеры в августе и в начале осени. В дополнение следует отметить, что область вод с дефицитом O_2 и повышенной величиной pCO_2 находилась в центральной части бухты Мелководной. В ходе водолазных работ, связанных с другими исследованиями, было обнаружено, что плотность зарослей zostеры здесь минимальная (приблизи-

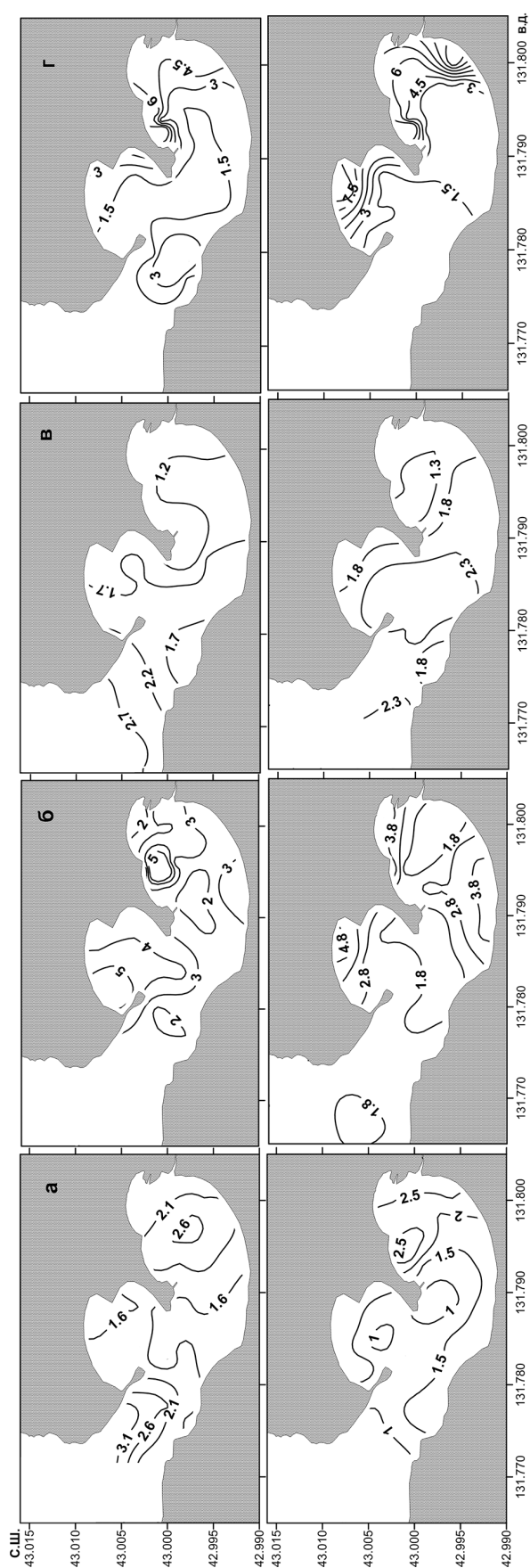


Рис. 6. Распределение хлорофилла *a* (мкг/л) в поверхностных (верхний ряд) и придонных (нижний ряд) водах бухты Воевода для разных сезонов: а — май, б — август, в — октябрь 2011 г.; г — февраль 2012 г.

Fig. 6. Chlorophyll *a* concentration (mg/l) at the sea surface (top panel) and at the sea bottom (bottom panel) in the Voevoda Bay: а — May, б — August, в — October 2011; г — February 2012

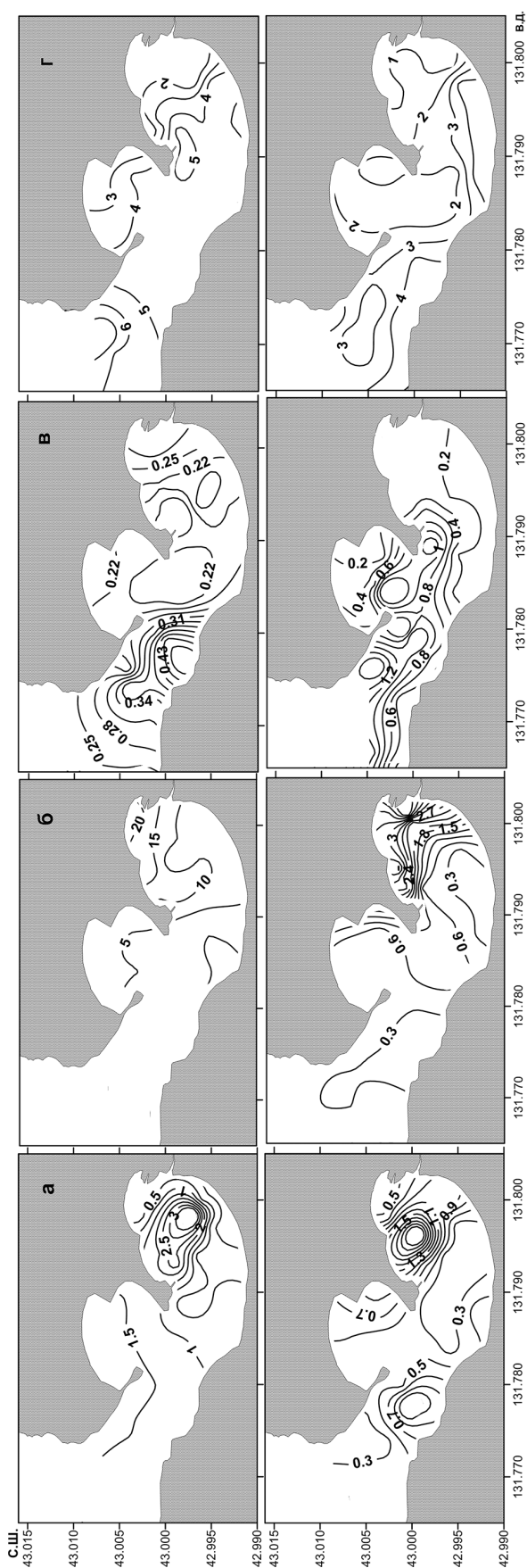


Рис. 7. Распределение концентрации нитратов (мкмоль/л) в поверхностных (верхний ряд) и придонных (нижний ряд) водах бухты Воевода для разных сезонов: **а** — май, **б** — август, **в** — октябрь 2011 г.; **г** — февраль 2012 г.

Fig. 7. Nitrate concentration (mmol/l) at the sea surface (top panel) and at the sea bottom (bottom panel) in the Voevoda Bay: **а** — May, **б** — August, **в** — October 2011; **г** — February 2012

тельно 1–3 куста на 1 м²) в сравнении с остальной частью бухты Мелководной. По-видимому, в бухте Мелководной в условиях наибольшего речного стока существуют два источника ОВ, окисление которого сопровождается поглощением O₂ и выделением pCO₂: избыточная масса фитопланктона и продукты жизнедеятельности зоостеры. Причиной дефицита O₂ и повышения pCO₂ в бухте Круглой является деструкция ОВ, образованного главным образом зоостерой.

Наиболее значимый фактор для зимнего сезона — наличие сплошного ледяного покрова на всей акватории бухты. Именно состояние ледяного покрова является определяющим в отношении проникновения фотосинтетически активной радиации в водную среду, что, в свою очередь, определяет биогеохимические процессы подо льдом. Вертикальное перемешивание вод в результате зимней конвекции также значимый фактор в формировании гидрохимических условий. Интенсивность обмена вод бухты с Амурским заливом, а также локальная система циркуляции определяют степень застоя вод. Высокие концентрации кислорода и низкие значения парциального давления углекислого газа в зимний сезон указывают на доминирование процессов продукции ОВ над процессами деструкции.

Другой важный результат зимней съемки —

обнаружение повышенных концентраций кислорода в придонном слое по сравнению с концентрациями поверхностного слоя практически на всей исследуемой акватории. Важен тот факт, что в областях придонных вод с максимальными значениями кислорода наблюдались минимальные величины парциального давления углекислого газа. Данная тенденция изменения гидрохимических параметров указывает, что интенсивность продукционных процессов в придонном горизонте выше в сравнении с поверхностным горизонтом. Такая же тенденция, но менее выраженная, наблюдается для весеннего сезона.

Нерешенным остается вопрос, какие именно организмы в придонном слое способны вызывать более интенсивное продуцирование ОВ в сравнении с поверхностным слоем, обуславливая наблюдаемую структуру вод по отношению к rCO_2 и O_2 . Имеющиеся в придонном слое на мелководьях локальные участки вод с повышенной концентрацией хлорофилла a не объясняют в целом повсеместное значительное перенасыщение вод кислородом (кажущееся потребление кислорода ($AOU = [O_2]_{\text{рав}} - [O_2]_{\text{нзм}}$) минус 100 мкмоль/кг). Вероятнее всего, главная роль в процессах первичного продуцирования органического вещества в придонном слое зимой может принадлежать морской zostере и перифитону. Наиболее плотные

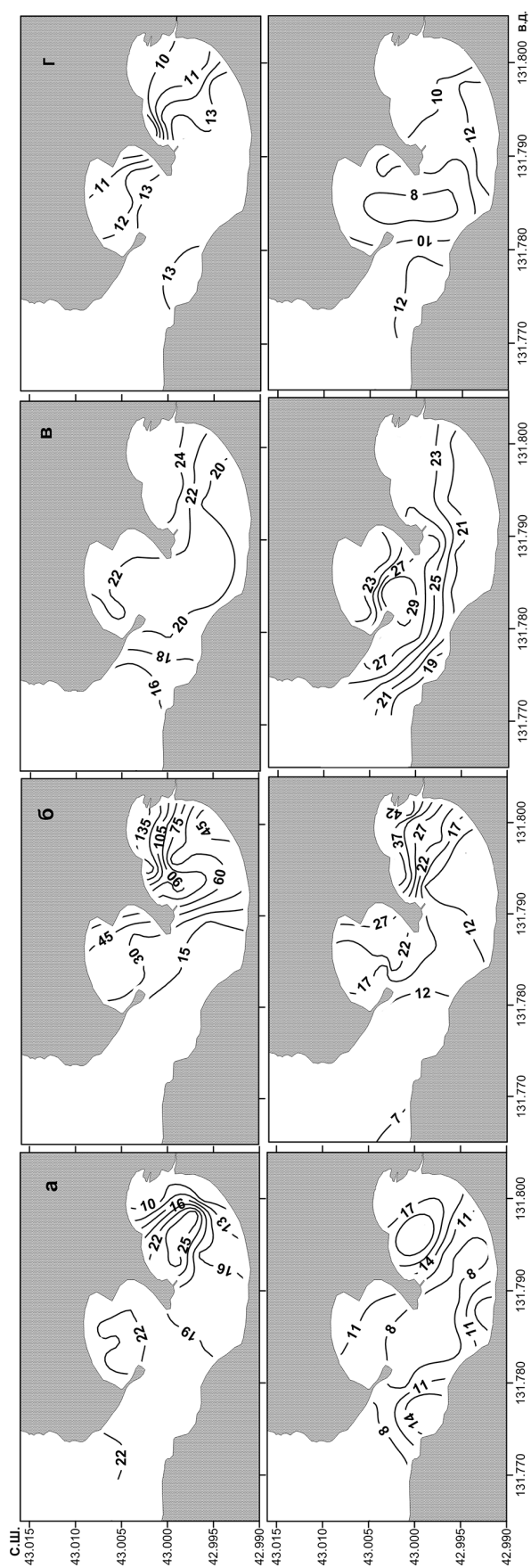


Рис. 8. Распределение концентрации силикатов (ммоль/л) в поверхностных (верхний ряд) и придонных (нижний ряд) водах бухты Воевода для разных сезонов: а — май, б — август, в — октябрь 2011 г.; г — февраль 2012 г.

Fig. 8. Silicate concentration (mmol/l) at the sea surface (top panel) and at the sea bottom (bottom panel) in the Voevoda Bay: а — May, б — August, в — October 2011; г — February 2012

заросли zostеры наблюдаются в бухтах Круглой и Мелководной. Известно, что рост и продуцирование органики zostерой в зимний сезон продолжают, однако менее интенсивно, чем в теплый период года (Паймеева, 1984). Благодаря наличию льда в зимний сезон отсутствует ветровое перемешивание и повышается прозрачность вод, что обеспечивает более высокую продуктивность перифитона в зимний сезон. Отсутствие снежного покрова на припайном льду в период экспедиционных работ способствовало лучшему проникновению фотосинтетически активной радиации (ФАР) в водную толщу. На рис. 9 представлено вертикальное изменение интенсивности ФАР в средней части мористого района акватории бухты Воевода (станция с координатами 43,00561° с.ш. и 131,76906° в.д.). Графики построены по данным зондирования в летний и зимний сезоны. Точка выбрана исходя из учета наибольшей глубины района, а также по причине того, что зондирование выполнено в одинаковое время суток (в промежутке времени 11:50–12:10). Покров льда толщиной свыше 60 см значительно влияет на проникновение ФАР в толщу вод. Однако на горизонте 2 м в условиях сплошного покрытия льдом водной поверхности количество ФАР находилось в пределах 90 Вт/м² (рис. 9). По-видимому, данной освещенности вполне достаточно для фотосинтеза во всей толще мелководной части бухты.

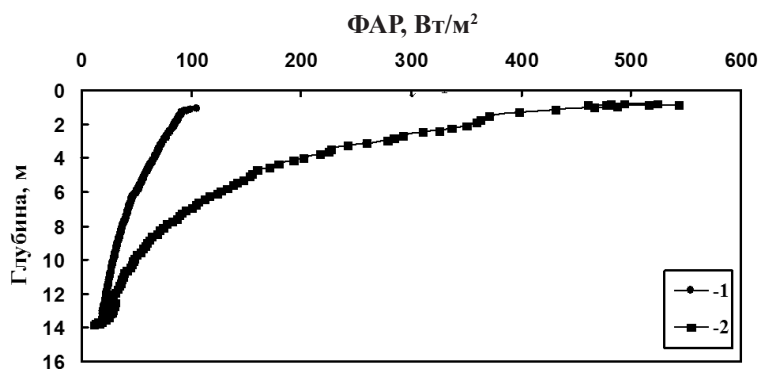


Рис. 9. Вертикальное изменение фотосинтетически активной радиации (ФАР) (станция с координатами 43,00561° с.ш. и 131,76906° в.д.): 1 — февраль 2012 г.; 2 — август 2011 г.

Fig. 9. Vertical profiles of photosynthetically active radiation (FAR, W/m²) at the point 43.00561° N and 131.76906° E: 1 — February, 2012; 2 — August, 2011

В поверхностных слоях акватории бухты Воевода основная роль в первичном продуцировании ОВ принадлежит диатомовым водорослям. Впервые «цветение» диатомовых водорослей под припайным льдом было обнаружено в Амурском заливе (Коновалова, 1972). Позже были установлены три максимума биомассы фитопланктона для акватории Амурского залива: зимний (январь-февраль), летний (июль) и осенний (конец сентября — октябрь) (Сорокин, Коновалова, 1978). Вскоре было предложено объяснение развития зимнего «цветения» (Вышкварцев, Коновалова, 1979). Его суть сводится к тому, что благодаря зимней конвекции происходит перемешивание всей толщи воды в бухте. В результате вертикального перемешивания вся толща вод обогащается биогенными элементами. В то же время клетки фитопланктона находятся в зоне фотического слоя, когда бассейн достаточно мелководный (авторы рассматривали бухту Новгородскую зал. Посъета). Именно такой механизм полностью подходит для случая бухты Воевода, когда лед не покрыт снегом. В качестве поправки к данному объяснению следует указать влияние zostеры и перифитона, которые интенсифицируют продукционные процессы в придонном слое воды, в результате чего увеличивается концентрация кислорода и уменьшаются концентрации биогенных веществ (нитраты, силикаты) (см. рис. 7, 8). В заключение следует отметить, что оценка роли каждого из автотрофов (фитопланктон, донные макрофиты, эпифитон) в формировании общей величины первичной продукции требует отдельных исследований, которые планируются в перспективе.

Нормированная потенциальная щелочность и биогеохимические процессы

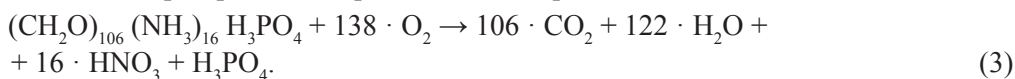
Морская вода содержит анионы слабых кислот (угольной, борной и др.). Их гидролиз создает слабощелочную среду океанических вод. Именно это свойство морской воды послужило основанием для развития концепции щелочности (Dickson, 1992). Через концентрации компонентов кислотно-основного баланса ТА количественно определяется по формуле (Dickson, 1981)

$$\begin{aligned} \text{ТА} = & [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] + [\text{OH}^-] + [\text{HPO}_4^{2-}] + 2[\text{PO}_4^{3-}] + [\text{HS}^-] + \\ & + [\text{SiO}(\text{OH})_3^-] + [\text{NH}_3] + \dots - [\text{H}^+] - [\text{HF}] - [\text{H}_3\text{PO}_4] - [\text{HSO}_4^-] - [\text{HNO}_2] - \dots \quad (1) \end{aligned}$$

В квадратных скобках даны концентрации соответствующих компонентов (моль/кг). Данное уравнение представляет собой баланс акцепторов и доноров протонов, присутствующих в морской воде для широкой области рН (до рН 3). Для морских аэробных бассейнов для диапазона рН 7,5–8,5 уравнение (1) упрощается до вида

$$\text{ТА} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B}(\text{OH})_4^-]. \quad (2)$$

Необходимо отметить, что анионы угольной кислоты и бор являются макрокомпонентами морской воды, что предполагает близкую к линейной их зависимость от солености. Для исключения влияния концентрирования/разбавления морской воды, связанного с испарением и атмосферными осадками, а также образованием/таянием льда, содержание общей щелочности нормируется к солености 35‰ ($n\text{ТА} = \text{ТА} \cdot 35/\text{S}$). Микробиологическое разложение ОВ в аэробных условиях приводит к уменьшению общей щелочности (Wolf-Gladrow et al., 2007). Конечными продуктами разложения в этих условиях будут азотная, фосфорная и серная кислоты, которые оттитровывают часть щелочного резерва. Этот процесс можно представить схемой



Здесь «формула» ОВ записана с использованием соотношений Редфилда (Redfield et al., 1963). Фотосинтез с использованием нитратов в качестве источника азота приводит к увеличению ТА, т.е. это процесс, противоположный реакции (3). Для того чтобы устранить влияние аэробного образования/разложения органического вещества на ТА, исследователями (Brewer et al., 1975) было введено понятие потенциальной щелочности. Нормированная потенциальная щелочность ($n\text{РА}$) определяется уравнением (Тищенко и др., 2012)

$$n\text{РА} = (\text{ТА} + [\text{NO}_3^-] - [\text{NH}_4^+] + 5,8[\text{PO}_4]) \cdot 35/\text{S}. \quad (4)$$

Величина $n\text{РА}$ — важная характеристика таких биогеохимических процессов, как растворение/образование карбоната кальция, сульфатредукция или окисление сероводорода. Распределение $n\text{РА}$ приведено на рис. 10. Результаты показывают, что в осенне-зимний сезон распределение щелочности в поверхностных и придонных горизонтах однородно, причем сами значения по абсолютной величине близки к $n\text{РА}$ поверхностных вод Японского моря (Тищенко и др., 2012). Однако в мае и в августе концентрации нормированной потенциальной щелочности существенно выше, особенно для поверхностных горизонтов вдоль северного побережья бухты Воевода. Нами сделано предположение, что основной причиной увеличения $n\text{РА}$ является процесс разложения зостеры. Как правило, ее отмершие листья прибывают к северному берегу бухты в осенний сезон и начинают разлагаться. Аэробное окисление органического вещества приводит в целом к уменьшению щелочности (реакция (3)), но этот процесс не затрагивает $n\text{РА}$. Однако нами установлено, что листья зостеры покрыты эпифитомом, в составе которого преобладают диатомовые микроводоросли, имеющие карбонатный скелет. Полная стадия разложения зостеры наступает в весенне-летний сезон. В этот период происходит разложение эпифитона, т.е. растворение карбонатных скелетов, что приводит к увеличению $n\text{РА}$. Данная гипотеза требует дальнейшей проверки и уточнения.

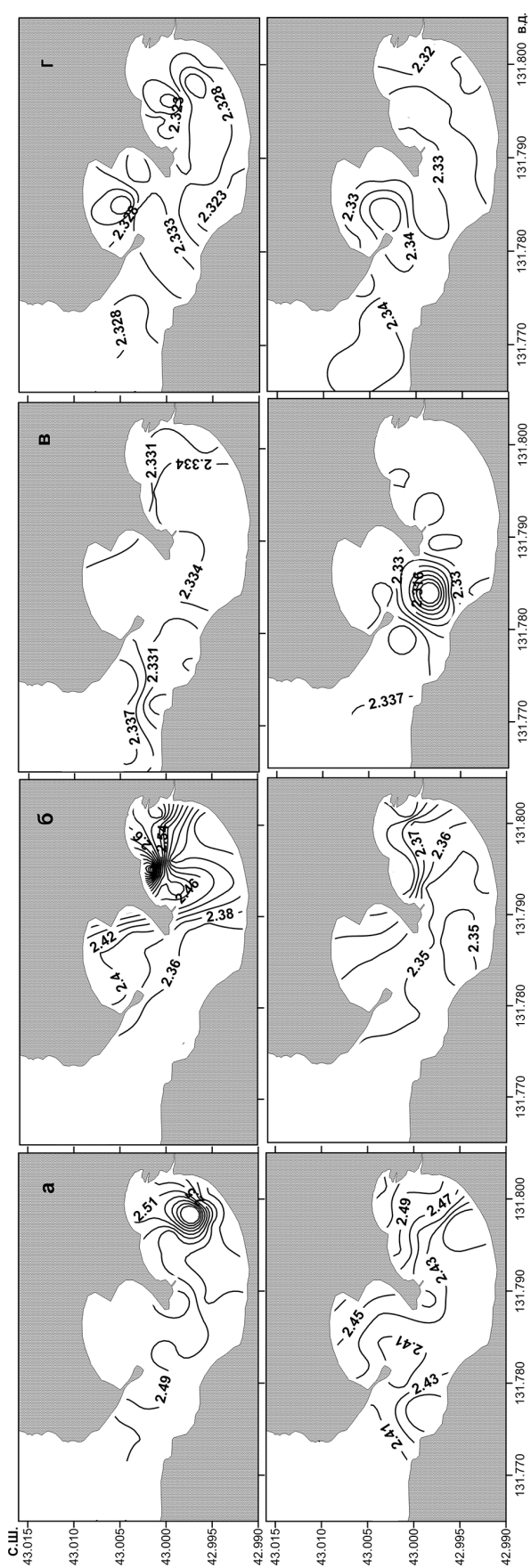


Рис. 10. Распределение нормированной потенциальной щелочности (ммоль/кг) в поверхностных (верхний ряд) и придонных (нижний ряд) водах бухты Воевода для разных сезонов: а — май, б — август, в — октябрь 2011 г.; г — февраль 2012 г.

Fig. 10. Normalized potential alkalinity (mmol/kg) at the sea surface (top panel) and at the sea bottom (bottom panel) in the Voevoda Bay: а — May, б — August, в — October 2011; г — February 2012

Выводы

На основе гидрологических данных (соленость, температура) бухта Воевода разделена по гидродинамическим признакам на две структурные зоны. К первой зоне относятся мористая и средняя часть бухты, для которых характерен свободный водообмен с Амурским заливом. Вторая структурная зона, которая наблюдалась в летний сезон, представляет замкнутую циркуляцию циклонического типа в бухте Мелководной. Эта циркуляция формируется под действием стока р. Русской вдоль северного побережья бухты и течения вод из Амурского залива, идущего вдоль южного побережья бухты.

Направленность биогеохимических процессов в бухте Воевода определяется интенсивностью продукции/деструкции ОВ, образованного тремя источниками: фитопланктоном, донными макрофитами и перифитомом.

В летний сезон в бухте Мелководной может возникать цветение фитопланктона. Основная причина этого — увеличение поставки биогенных элементов со стоком р. Русской. Избыточная масса фитопланктона, не съеденного зоопланктоном, подвергается деструкции с потреблением кислорода и выделением углекислого газа. Наряду с этим происходит деструкция отмерших частей zostеры.

В зимний сезон в условиях покрытия акватории ледяным покровом при отсутствии снега на льду условия освещенности для фотосинтеза остаются недостаточными. В результате во всей толще вод бухты развиваются планктонные диатомовые водоросли. Перенасыщенность вод бухты по кислороду и недосыщенность по углекислому газу указывают на преобладание продукционных процессов над деструкцией ОВ в зимний сезон. Однако интенсивность фотосинтетических процессов у дна выше, чем на поверхности, благодаря участию зостеры и перифитона, что приводит к увеличению содержания кислорода и уменьшению $r\text{CO}_2$ в придонном слое бухты по сравнению с поверхностным горизонтом.

Установлено, что в мае и августе концентрации $n\text{РА}$ существенно выше, особенно для поверхностных горизонтов вдоль южного побережья бухты Воевода. Сделано предположение, что основной причиной увеличения нормированной щелочности служит разложение карбонатных скелетов микроводорослей эпифитона, ассоциированных с отмершими листьями зостеры.

Авторы благодарят Владимира Александровича Кузьмина за ценные советы и консультации при планировании и проведении экспедиционных исследований, а также за предоставление транспорта, жилых и технических помещений в ходе экспедиционных работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 11-05-00241-а, 11-05-98543-р_восток-а, 14-05-31127 мол_а.

Список литературы

- Амброз А.И.** Сельдь (*Clupea harengus pallasii* С. V.) залива Петра Великого (биологический очерк) : Изв. ТИРХ. — 1931. — Т. 6. — 312 с.
- Бергер В.Я.** О продукции зостеры *Zostera marina* Linnaeus, 1753 в Белом море // Биол. моря. — 2011. — Т. 37, № 5. — С. 362–366.
- Бирюлин Г.М., Бирюлина М.Г., Микулич Л.В., Якунин Л.П.** Летние модификации вод залива Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. — 1970. — Вып. 30. — С. 286–299.
- Будаева В.Д., Зуенко Ю.И., Макаров В.Г.** Структура и динамика вод залива Петра Великого в условиях сильного летнего распреснения (2008–2009 гг.) // Юбилейный вып. ДВНИГМИ — 60 лет. — Владивосток : Дальнаука, 2010. — С. 158–172.
- Будаева В.Д., Зуенко Ю.И., Макаров В.Г.** Структура и циркуляция вод бухты Суходол (Уссурийский залив, Японское море) // Изв. ТИПРО. — 2006. — Т. 146. — С. 226–234.
- Вышкварцев Д.И.** Особенности продукционных процессов в мелководных бухтах зал. Посьета (Японское море) : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ИБМ, 1979. — 251 с.
- Вышкварцев Д.И., Коновалова Г.И.** О механизме зимнего «цветения» микроводорослей в водах залива Петра Великого (Японское море) // Биол. моря. — 1979. — № 1. — С. 72–73.
- Гаврилова Г.С., Кучерявенко А.В.** Продуктивность плантаций двухстворчатых моллюсков в Приморье : монография. — Владивосток : ТИПРО-центр, 2011. — 112 с.
- Данченков М.А., Фельдман К.Л., Файман П.А.** Температура и соленость вод залива Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. — Владивосток : Дальнаука, 2003. — С. 10–25.
- Дерюгин К.М.** Зоны и биоценозы зал. Петра Великого (Японское море) // Сборник, посвященный научной деятельности Н.М. Книповича. — М. ; Л. : АН СССР, 1939. — С. 45–86.
- Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я.** Эвтрофикация Амурского залива // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. — Владивосток : Издат. дом ДВФУ, 2012. — С. 76–113.
- Кафанов А.И., Лысенко В.Н.** Биология морской травы *Zostera marina* // Биота и сообщества дальневосточных морей. Лагуны и заливы Камчатки и Сахалина. — Владивосток : ДВО АН СССР, 1988а. — С. 93–113.
- Кафанов А.И., Лысенко В.Н.** О трофических ресурсах сообщества зостеры залива Петра Великого Японского моря // Биол. моря. — 1988б. — № 6. — С. 24–30.
- Коновалова Г.В.** Сезонная характеристика фитопланктона в Амурском заливе Японского моря // Океанол. — 1972. — Т. 12, № 1. — С. 123–128.
- Лазарюк А.Ю., Буров Б.А., Лобанов В.Б., Пономарев В.А.** Эволюция структуры вод Амурского залива подо льдом // Тез. докл. конф. «Океанографические условия залива Петра Великого». — Владивосток : Дальнаука, 2012. — С. 56.

- Лисицын А.П.** Маргинальный фильтр океанов // *Океанол.* — 1994. — Т. 34, № 5. — С. 735–747.
- Лучин В.А., Сагалаев С.Г.** Океанологические условия в амурском заливе (Японское море) зимой 2005 г. // *Изв. ТИНРО.* — 2005. — Т. 143. — С. 203–218.
- Лучин В.А., Тихомирова Е.А., Круз А.А.** Океанографический режим вод залива Петра Великого (Японское море) // *Изв. ТИНРО.* — 2005. — Т. 140. — С. 130–169.
- Лысенко В.Н.** Экология креветок сообщества *Zostera* бухты Мелководная (Японское море) // 2-я Всесоюз. конф. по морской биологии : тез. докл. — Владивосток, 1982. — Ч. 1. — С. 45–46.
- Ляшенко С.А.** Особенности воспроизводства тихоокеанской мидии в бухте Воевода (остров Русский) // *Изв. ТИНРО.* — 2005. — Т. 140. — С. 352–365.
- Паймеева Л.Г.** Биология *Zostera marina L.* и *Zostera asiatica* Приморья : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ТИНРО, 1984. — 185 с.
- Посадова В.П., Иванкова З.Г., Феденко И.М.** Рыбные ресурсы залива Петра Великого и меры по их восстановлению и охране // 2-я Всесоюз. конф. по морской биологии : тез. докл. — Владивосток, 1982. — Ч. 3. — С. 36–37.
- Рачков В.И.** Гидрохимические условия в вершине Уссурийского залива в период нереста анадарты // *Изв. ТИНРО.* — 2006. — Т. 146. — С. 264–275.
- Рогачев К.А., Шлык Н.В.** Прямые наблюдения эстуарной циркуляции вод в бухте Суходол и северной части Уссурийского залива (Японское море) // *Изв. ТИНРО.* — 2012. — Т. 170. — С. 210–219.
- Сёмкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др.** Особенности распределения гидрохимических параметров Уссурийского залива (Японское море) в летний период // *Изв. ТИНРО.* — 2012. — Т. 168. — С. 152–168.
- Сорокин Ю.И., Коновалова Г.В.** Исследование подледного «цветения» фитопланктона в Амурском заливе Японского моря // Биологические исследования дальневосточных морей. — Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1978. — С. 89–94.
- Тернер Дж.** Эффекты плавучести в жидкостях : монография. — М. : Мир, 1977. — 431 с.
- Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Звалинский В.И. и др.** Сезонная гипоксия Амурского залива (Японское море) // *Изв. ТИНРО.* — 2011. — Т. 165. — С. 108–129.
- Тищенко П.Я., Павлова Г.Ю., Шкирникова Е.М.** Щелочность Японского моря. Новый взгляд // *Океанол.* — 2012. — Т. 52, № 1. — С. 26–39.
- Тищенко П.Я., Тищенко П.П., Звалинский В.И. и др.** Карбонатная система Амурского залива (Японское море) летом 2005 г. // *Изв. ТИНРО.* — 2006. — Т. 146. — С. 235–255.
- Юрасов Г.И., Ванин Н.С., Рудых Н.И.** Особенности гидрологического режима зал. Петра Великого в осенне-зимний период // *Изв. ТИНРО.* — 2007. — Т. 148. — С. 211–220.
- Brewer P., Wong G., Bacon M., Spencer D.** An oceanic calcium problem // *Earth and Planetary Science Letters.* — 1975. — Vol. 26. — P. 81–87.
- Chen A.C.-T., Borges A.V.** Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂ // *Deep-Sea Res.* II. — 2009. — Vol. 56. — P. 578–590.
- Dickson A.G.** An exact definition of total alkalinity and a procedure for the estimation of alkalinity and total CO₂ from titration data // *Deep-Sea Res.* — 1981. — Vol. 28. — P. 609–623.
- Dickson A.G.** The development of the alkalinity concept in marine chemistry // *Mar. Chem.* — 1992. — Vol. 40. — P. 49–63.
- Levin L.A., Ecau W., Gooday A.J. et al.** Effect of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos // *Biogeosciences.* — 2009. — Vol. 6. — P. 2063–2098.
- Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A.** The influence of organisms on the composition of seawater // *The Sea.* — N.Y. : Interscience, 1963. — Vol. 2. — P. 26–77.
- Wolf-Gladrow D.A., Zeebe R.E., Klaas C. et al.** Total alkalinity: The explicit conservative expression and its application to biogeochemical processes // *Mar. Chem.* — 2007. — Vol. 106. — P. 287–300.

Поступила в редакцию 15.10.14 г.