

УДК 551.464.621(265.54)

П.П. Тищенко^{1,2}, П.Я. Тищенко², В.Б. Лобанов², А.Ф. Сергеев²,
П.Ю. Семкин^{2*}

¹ Дальневосточный федеральный университет,
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8;

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**РОЛЬ ДАУНВЕЛЛИНГА/АПВЕЛЛИНГА
В ФОРМИРОВАНИИ/РАЗРУШЕНИИ ГИПОКСИИ
ПРИДОННЫХ ВОД АМУРСКОГО ЗАЛИВА
(ЯПОНСКОЕ МОРЕ)**

Гидрологические данные, полученные во время экспедиций на НИС «Импульс» в августе 2012 г. и НИС «Малахит» в августе 2013 г., совместно с данными мониторинговой придонной гидрологической станции позволили установить, что формирование и разрушение гипоксии придонных вод Амурского залива зависит от функционирования системы «даунвеллинг/апвеллинг». Период формирования гипоксии соответствует даунвеллингу, когда доминируют южные и юго-восточные ветра. Разрушение гипоксии происходит в период апвеллинга, когда доминируют ветра северного и северо-западного направления.

Ключевые слова: даунвеллинг, апвеллинг, муссон, гипоксия, растворенный кислород, Амурский залив.

Tishchenko P.P., Tishchenko P.Ya., Lobanov V.B., Sergeev A.F., Semkin P.Yu. Role of downwelling/upwelling in formation/destruction of hypoxia in the bottom waters of the Amur Bay (Japan Sea) // Izv. TINRO. — 2015. — Vol. 183. — P. 156–165.

Downwelling/upwelling influence on hypoxia at the bottom of the Amur Bay is determined on the data of oceanographic surveys conducted aboard RV Impulse in August 2012 and RV Malachite in August 2013 coupled with the data of monitoring oceanographic station in the bay. The hypoxia develops in the period of downwelling circulation driven by southern and southeastern winds and relaxes in conditions of upwelling induced by northern and northwestern winds.

Key words: upwelling, downwelling, monsoon, hypoxia, dissolved oxygen, Amur Bay.

* Тищенко Петр Павлович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ДВФУ, научный сотрудник ТОИ, e-mail: eq15@poi.dvo.ru; Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru; Лобанов Вячеслав Борисович, кандидат географических наук, врио директора, e-mail: lobanov@poi.dvo.ru; Сергеев Александр Федорович, старший научный сотрудник, e-mail: sergeev@poi.dvo.ru; Семкин Павел Юрьевич, младший научный сотрудник, e-mail: pahno@list.ru.

Tishchenko Petr P., Ph.D., senior researcher; researcher, e-mail: eq15@poi.dvo.ru; Tishchenko Pavel Ya., D.Sc., head of laboratory, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru; Lobanov Vyacheslav B., Ph.D., deputy director, e-mail: lobanov@poi.dvo.ru; Sergeev Alexander F., senior researcher, e-mail: sergeev@poi.dvo.ru; Semkin Pavel Yu., junior researcher, e-mail: pahno@list.ru.

Введение

В последние три десятилетия количество прибрежных акваторий, подверженных гипоксии, значительно возросло (Diaz, Rosenberg, 2008). Их рост происходит на фоне изменения климата, сокращения лесных массивов, роста содержания двуокси углерода в атмосфере, ацидификации акваторий, загрязнения атмосферы окислами серы и азота. Эти глобальные изменения, а также деятельность человека — создание мегаполисов в прибрежных местах, развитие сельского хозяйства, перераспределение стока рек, эвтрофикация прибрежных вод — способствуют образованию придонных вод с низким содержанием кислорода (гипоксии). Формирование гипоксии часто происходит в мористой части эстуарных бассейнов. Именно к такому типу бассейнов относится Амурский залив, северная часть которого является приемным бассейном р. Раздольной.

В августе 2007 г. в центральной акватории залива была обнаружена область с низким содержанием кислорода в придонных водах, которое достигало 1, 5 % от равновесной с атмосферой концентрации (Тищенко и др., 2008). Дальнейшие экспедиционные работы показали сезонный характер гипоксии Амурского залива (Тищенко и др., 2011; Тищенко, 2013). Были установлены пространственно-временные рамки гипоксии: она присутствует в заливе около 3 мес., охватывая площадь порядка 60 км² (Тищенко, 2013; Тищенко и др., 2014). Установлено, что средняя скорость биохимического потребления кислорода при формировании гипоксии составляет 10 мкмоль/(кг·сут) (Тищенко и др., 2014). Последствиями гипоксии является образование «мертвых зон», которые негативным образом сказываются на общем функционировании экосистемы. В ряде статей (Коновалова, 1972; Климова, 1988; Мокеева, 1988; Некоторые региональные последствия ..., 1990*; Олейник и др., 2004) отмечается, что в зообентосе на смену видам, чувствительным к содержанию кислорода (например, приморский гребешок), пришли сообщества, устойчивые к низким содержаниям кислорода (полихеты). Сомнения в ухудшении состояния бентоса в зал. Петра Великого были высказаны В.П. Шунтовым (2001). Ранее (Шунтов, 2001; Надточий и др., 2005; Надточий, Безруков, 2008) показано, что биомасса макрозообентоса в заливе имеет положительную тенденцию к росту. Очевидно, что необходимы дальнейшие исследования не только по распределению зообентоса, но и по гидрохимическому состоянию придонных вод залива.

Знания о региональных особенностях формирования и разрушения гипоксии имеют практическое значение для выработки научно обоснованных предложений, способствующих улучшению состояния окружающей среды в данном регионе. Необходимо отметить, что при установлении причин формирования и разрушения гипоксии большое внимание уделяется источникам и потокам биогенных элементов в среду, поскольку они способствуют интенсификации продукции/деструкции органического вещества (Звалинский и др., 2012). Высокие потоки биогенных веществ приводят к избыточной первичной продукции бассейна (Звалинский и др., 2012).

Помимо изучения биологических факторов, приводящих к формированию гипоксии, важно учитывать и динамические, такие как скорость и направление ветра, а также системы течений исследуемых акваторий. Так, в отдельных случаях южные ветра и подъем глубинных вод на шельф могут приводить к формированию гипоксии (Grantham et al., 2004), а в других случаях аналогичные действия могут приводить к противоположным результатам (Nakayama et al., 2010; Тищенко и др., 2011). Применительно к Амурскому заливу раньше мы полагали, что доминирование над его акваторией ветров южных румбов приводит к «запиранию» вод в центральной части залива, приводя к некоторой их стагнации (Тищенко, 2013). Подобная точка зрения была высказана ранее японскими исследователями (Nakayama et al., 2010). Однако полученные нами результаты исследований, изложенные в этой работе, вынуждают провести пересмотр этой концепции.

Цель данной работы — рассмотреть роль даунвеллинга/апвеллинга в формировании/разрушении гипоксии придонных вод Амурского залива.

* Некоторые региональные последствия антропогенного воздействия на морскую среду : Тр. ДВНИГМИ. 1990. Вып. 144. 106 с.

Материалы и методы

В 2011 г. в зоне гипоксии (координаты 43°10,881' с.ш. 131°49,893' в.д.) в метре от дна на глубине 19 м в период с 10 мая по 5 сентября была установлена мониторинговая гидрологическая станция WQM (Water Quality Monitor) фирмы Wet Labs, оснащенная датчиками давления, температуры, электропроводности, кислорода. В течение более 3 мес. каждые 4 ч производилась запись показаний датчиков с интервалом в 1 с в течение 5 мин в подводный логгер DH4 той же фирмы. Результаты работы станции представлены на рис. 1.

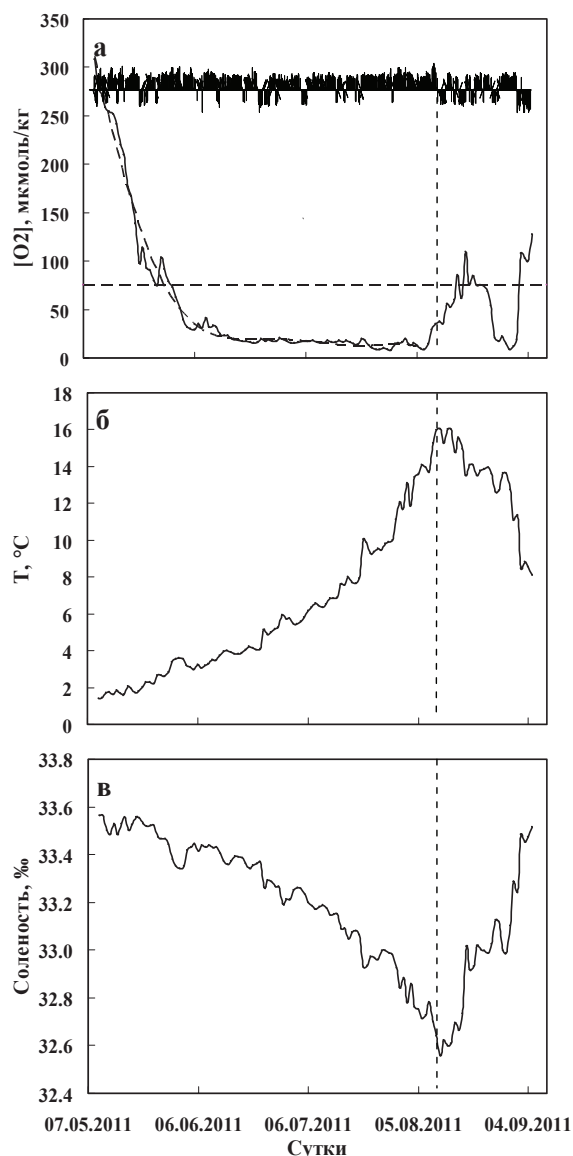


Рис. 1. Временная изменчивость содержания кислорода (а), температуры (б) и солености (в) в зоне гипоксии по данным WQM и направления ветра по данным метеостанции Владивосток. Горизонтальная пунктирная линия — пороговое значение концентрации кислорода 76 мкмоль/кг, вертикальная пунктирная линия — время смены направления ветра с южного на северное

Fig. 1. Temporal variability for dissolved oxygen content (а), temperature (б) and salinity (в) in the hypoxia area by the data of monitoring station WQM and for wind direction by the data of meteorological station Vladivostok. Horizontal dotted line — hypoxia threshold of dissolved oxygen content (76 mM/kg); vertical dotted line — time of wind direction change from south to north

Гидрологические исследования проводились на НИС «Импульс» и «Малахит» в период с 24 по 26 августа соответственно в 2012 и 2013 гг. В ходе работ использовали профилограф SBE 19plus, оснащенный датчиками температуры, электропроводности, флуоресценции хлорофилла и мутности. Впервые вертикальные профили кислорода получали при использовании малоинерционного оптического датчика кислорода phosphorescent memory DO-meter Infinity-RINKO серии ARO-USB. Результаты распределения кислорода и температуры для придонных вод, полученные во время этих съемок, показаны на рис. 2, 3. При обсуждении материала нами также использовались данные о направлении и скорости ветра, взятые с сайта <http://pogodaiklimat.ru>.

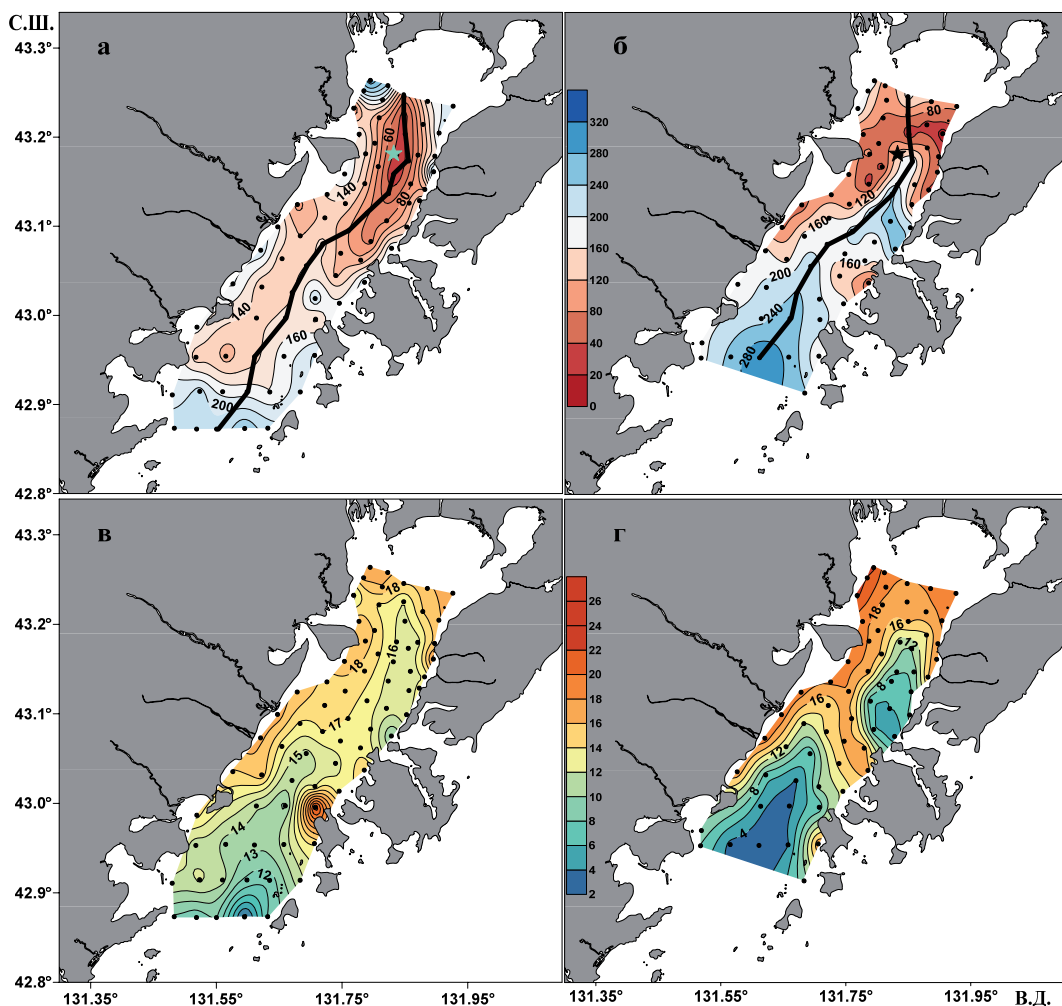


Рис. 2. Пространственное распределение растворенного кислорода (мкмоль/кг; а, б) и температуры (°C; в, г) в придонном горизонте Амурского залива 24–26 августа 2012 (а, в) и 2013 (б, г) гг. *Сплошной жирной линией* отмечены разрезы, представленные на рис. 3. *Звездой* отмечено место расположения станции WQM

Fig. 2. Spatial distribution of dissolved oxygen (mM/kg; а, б) and water temperature (в, г) at the bottom of the Amur Bay on August 24–26, 2012 (а, в) and 2013 (б, г). *Thick line* — longitudinal section shown at Fig. 3, *star* — WQM monitoring station

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений гидрологических параметров, полученных с 24 по 26 августа 2012 и 2013 гг., позволяют отметить как общие черты, так и существенные различия в их распределении (рис. 2, 3). Так, в северной части залива в обоих случаях наблюдаются области с низким содержанием кислорода: до 22,4 и 0,4 мкмоль/кг соответственно в 2012 и 2013 гг. Однако в 2012 г. эта область вытянута вдоль оси залива, отмечается тенденция уменьшения концентраций O_2 с понижением рельефа дна. При этом температура придонных вод севернее Муравьевского порога (поднятия рельефа дна на расстоянии 17–25 км от вершины разреза) составляет 16 °C (рис. 3, в). В противоположность ситуации 2012 г. распределение концентрации кислорода в придонном слое Амурского залива в 2013 г. имеет более сложный характер. Область минимальных значений растворенного кислорода смещена на северное мелководье залива и к п-ову Песчаному (рис. 2, б, 3, б). Температура воды в придонном слое большей части залива при этом существенно ниже и достигает 4 °C (рис. 2, г, 3, г).

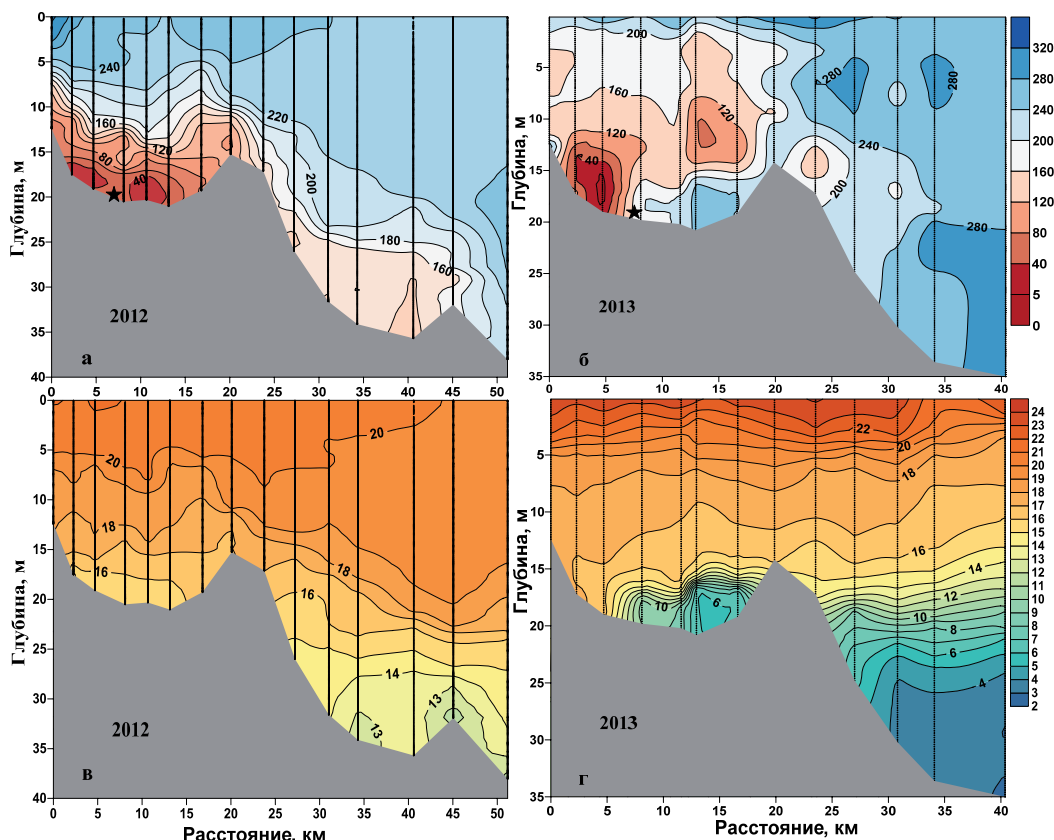


Рис. 3. Распределение растворенного кислорода (мкмоль/кг; а, б) и температуры (°С; в, г) на продольном разрезе через Амурский залив 24–26 августа 2012 (а, в) и 2013 (б, г) гг. Звездой отмечено место расположения станции WQM

Fig. 3. Distribution of dissolved oxygen (mM/kg; а, б) and water temperature (°C; в, г) on the longitudinal section across the Amur Bay on August 24–26t, 2012 (а, в) and 2013 (б, г). Star — WQM monitoring station

Временная изменчивость гидрологических параметров, полученных с помощью придонной станции WQM, представлена на рис. 1. В период с 10 мая по 6 июня концентрация растворенного кислорода в месте расположения станции понижается по закону, близкому к экспоненциальному. В этот же период происходит незначительное увеличение температуры и уменьшение солёности. Затем наступает период (с 6 июня до 10 августа) существования квазипостоянного низкого содержания кислорода (15,4 мкмоль/кг). Это стационарное состояние содержания кислорода сопровождается ростом температуры и уменьшением солёности. После 10 августа (см. вертикальную пунктирную линию на рис. 1) происходит резкое уменьшение температуры воды и увеличение солёности, чему за сутки предшествует рост концентрации O_2 .

Необходимо отметить, что температура придонных вод 24–26 августа 2012 г. была сравнима с температурой вод на момент 10 августа 2011 г. Так, для станции 58 (2012 г.) и станции наблюдения WQM (2011 г.), географическое расположение которых совпадает, температуры придонной воды практически равны — соответственно 15,9 и 16,0 °C. Несмотря на то что значения солёности для этих станций несколько различаются — 33,2 (2012 г.) и 32,5 ‰ (2011 г.), можно полагать, что данные 2011 и 2012 гг. соответствуют одной и той же фазе развития летних процессов. Тем самым они дополняют друг друга и дают общее представление о пространственно-временной изменчивости гидрологических параметров, характерной для летнего сезона.

Наблюдаемые на мониторинговой станции рост температуры и понижение солёности придонных вод на протяжении летнего сезона (рис. 1) можно было бы объяснить

процессами развития верхнего квазиоднородного слоя в результате радиационного прогрева, распреснения стоком речных вод и атмосферными осадками и воздействия ветрового перемешивания. Однако в точке наблюдения вода имеет заметную плотностную стратификацию и значительный вертикальный градиент концентрации кислорода (см. рис. 3, а). В этом случае, вне зависимости от физического механизма, опускание вод над точкой расположения WQM должно было бы приводить к значительному увеличению концентрации кислорода, регистрируемой на станции, чего в действительности не наблюдалось (см. рис. 1). Ниже мы покажем, что особенности пространственно-временной изменчивости гидрологических параметров придонных вод Амурского залива определяются горизонтальной адвекцией, контролируемой процессами апвеллинга и даунвеллинга, возникновение которых обусловлено муссонным характером климата Приморья.

Амурский залив (зал. Петра Великого, Японское море) расположен в области внетропического муссонного климата, который формируется под влиянием термических контрастов между материком и океаном. Сезонная смена муссонных ветров в Японском море происходит дважды в течение года. С октября по март действует северо-западный муссон, а с марта по август — юго-восточный (Гайко, 2005). Роль северо-западного муссона на динамику и структуру вод шельфа Японского моря (зал. Петра Великого) широко обсуждалась (Жабин и др., 1993; Юрасов, Вилинская, 2008; Храпченков и др., 2014).

В летний сезон в центральной части Амурского залива происходит формирование обширной гипоксии придонных вод. Первоначально нами принималось, что одно из условий формирования гипоксии — «стагнация» придонных вод залива (Тищенко, 2013), т.е. состояние замедленной динамики вод, при котором снижается скорость поступления кислорода и ослабляется вентиляция придонного слоя. Однако, как видно на рис. 1, медленное понижение в воде концентрации растворенного кислорода в течение более 2 мес. сопровождается заметным ростом температуры воды и уменьшением солености. Иначе говоря, придонные воды не находятся в состоянии стагнации. Одним из объяснений уменьшения солености и увеличения температуры в придонном слое в точке наблюдения станции WQM могло бы стать ветровое перемешивание, которое затрагивает всю толщу залива, доходя до глубины 20 м. Однако такому простому объяснению есть возражения. Во-первых, ветровому перемешиванию препятствует устойчивая стратификация вод залива (в области гипоксии для 2012 г. соленость увеличивается от поверхности до дна; температура уменьшается; верхний квазиоднородный слой захватывает 5 м — рис. 4). Во-вторых, концентрация кислорода на горизонте 3 м от дна возрастает более чем в два раза (см. рис. 3, а). В-третьих, при столь низких концентрациях кислорода ($15,4 \text{ мкмоль/кг}$) скорость биохимического потребления кислорода также низкая и составляет $1,9 \text{ мкмоль/(кг} \cdot \text{сутки)}$ (Тищенко и др., 2014). Поэтому поступление более пресных и теплых вод через ветровое перемешивание должно сопровождаться поступлением кислорода из вышележащих слоев, что тут же регистрировалось бы датчиком кислорода станции WQM, который включался 4 раза в сутки. Однако значительных изменений содержания кислорода в период с 6 июня по 10 августа не зарегистрировано. Наблюдаемые осцилляции имели амплитуду около $5\text{--}10 \text{ мкмоль/кг}$ (см. рис. 1).

Не исключая полностью механизм ветрового перемешивания всей толщи вод залива в точке наблюдения (например, в период шторма, вызванного тайфуном), мы предлагаем иной вариант объяснения временной изменчивости гидрологических параметров, представленных на рис. 1.

Формирование гипоксии и уменьшение солености проходят в условиях преобладания над акваторией Амурского залива ветров южных направлений (рис. 1, а, в). В Амурский залив в северо-западной его части впадает р. Раздольная — одна из крупнейших рек южного Приморья. Ветры южных направлений создают на бере и южнее бара реки интенсивное волновое перемешивание, поскольку ветровая волна из глубокой части залива, двигаясь на мелководье, увеличивает свою амплитуду. На расстоянии $2,5 \text{ км}$ от

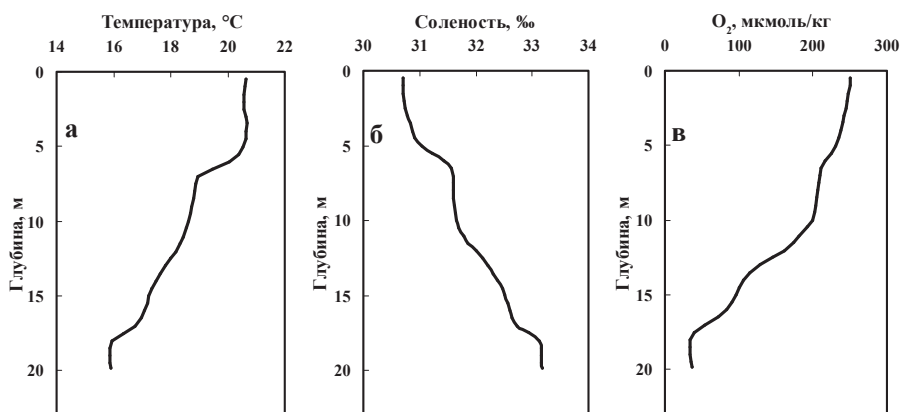


Рис. 4. Вертикальные профили температуры (а), солёности (б) и растворенного кислорода (в) для точки расположения придонной станции, 26 августа 2012 г.

Fig. 4. Vertical profiles of water temperature (а), salinity (б), and dissolved oxygen (в) at WQM monitoring station on August 26, 2012

бара в южном направлении глубина залива меняется от 0,5 до 6,0 м. Таким образом, благодаря ветровому воздействию южнее бара происходит перемешивание морских и речных вод, формирующее воды с солёностью 25–31 ‰ в зависимости от стока реки и скорости ветра. Ветры южных направлений имеют «нагонный» характер и совместно с речным стоком повышают уровень моря в северной части залива. Избыточное гидростатическое давление в этой области залива обеспечивает подток вод, образовавшихся в результате смешения, в нижележащий слой и дальнейшую их адвекцию по склону в южном направлении, что рассматривается как даунвеллинг (Healy, 2005). Энергетической основой даунвеллинга являются «нагонный» ветер южного направления и сток р. Раздольной, который максимален в летний сезон (Михайлик и др., 2011). По всей видимости, даунвеллинг менее плотных вод происходит преимущественно южнее бара эстуария р. Раздольной. Эти воды двигаются с севера на юг над верхним слоем осадков, обогащенным органическим углеродом (3 % углерода от общей массы осадков). На границе раздела вода/осадок происходит микробиологическое окисление органического вещества, в результате чего придонные воды теряют кислород. Уже на траверзе мыса Песчаного (координаты 43°10,881' с.ш. 131°49,893' в.д.) концентрация кислорода в придонном слое соответствует гипоксии. Важным обстоятельством является тот факт, что скорость биохимического потребления кислорода пропорциональна концентрации кислорода (реакция первого порядка, Тищенко и др., 2014). Особенность этой реакции состоит в ее демпфирующем характере, т.е. любые флуктуации в содержании кислорода, обусловленные флуктуациями в адвекции придонных вод, будут сглаживаться на временной шкале 2–3 суток. По этой причине концентрация кислорода на временном участке от 6 июня до 10 августа выглядит как квазистационарная. Такой характер ей обеспечивается временным лагом адвекции вод от бара реки в точку наблюдения.

На рис. 1 видно, что состояние гипоксии придонных вод в 2011 г. сохранялось вплоть до 10 августа, до этого момента доминировали южные ветры. При кратковременных изменениях направления ветра с южного на северное концентрация кислорода и солёность в придонном слое увеличивались, а температура понижалась (рис. 1). Полного соответствия на шкале времени между изменением направления ветра и изменениями концентрации кислорода, температуры и солёности нет. Изменения в концентрации кислорода предшествуют изменению направления ветра, а изменения в температуре и солёности происходят с временной задержкой. По-видимому, смена направления ветра на начальном этапе вызывает небольшое вертикальное перемешивание в придонном слое вод залива, которое увеличивает концентрацию кислорода у дна и приводит к временному дисбалансу между началом роста концентрации кислорода и изменением T, S-характеристик.

Однако главным событием наблюдаемой сезонной изменчивости стало резкое увеличение содержания кислорода придонных вод, начавшееся 10 августа. Одновременно с этим отмечаются прекращение роста температуры воды, начало ее понижения и рост солености. Это происходит на фоне сезонной смены ветрового режима — начала периода преобладания северных ветров, т.е. зимнего муссона. При изменении направления доминирующего ветра с южного на северное, произошедшем 10 августа, начинает усиливаться сгон поверхностных вод. Скорость поверхностного течения будет тем выше, чем выше была накопленная потенциальная энергия в северной части залива, обусловленная стоком реки и нагонными ветрами в предшествующий период. Движение поверхностных вод в южном направлении вызовет компенсационное противотечение придонных вод вверх по склону (апвеллинг). Связанная с этим адвекция холодных, соленых, обогащенных кислородом вод из открытой части зал. Петра Великого обуславливает понижение температуры, увеличение солености и содержания кислорода в придонном слое Амурского залива после смены направления ветра.

Таким образом, летний режим даунвеллинга теплых вод пониженной солености способствует формированию гипоксии, а осенний апвеллинг холодных соленых вод с высоким содержанием кислорода приводит к ее разрушению. Подтверждением вышесказанному служат результаты гидрологических съемок Амурского залива, проведенных в период с 24 по 26 августа 2012 и 2013 гг. Как показано на рис. 5 (а), на момент исследований, проведенных в 2012 г., над акваторией Амурского залива было зарегистрировано доминирование ветров южных направлений. При этом в ходе работ была отмечена обширная гипоксия придонных вод центральной части залива (содержание кислорода понижалось до 22,4 мкмоль/кг), сопровождавшаяся высокими значениями температуры воды (16 °С в зоне гипоксии) (см. рис. 2, а, в, рис. 3, а, в). Гидрологические исследования 2013 г. проводились в условиях разрушения структуры поля ветра, характерной для летнего периода: направление ветра сменялось с южного на северное и наоборот (см. рис. 5, б). В результате было зарегистрировано проникновение в центральную часть Амурского залива холодных кислородосодержащих вод через прол. Босфор Восточный из открытой части зал. Петра Великого (см. рис. 2, б, г). При этом массы воды с низким содержанием кислорода оказались вытесненными на северное мелководье и частично, под воздействием структуры течений, смещенными в западном направлении.

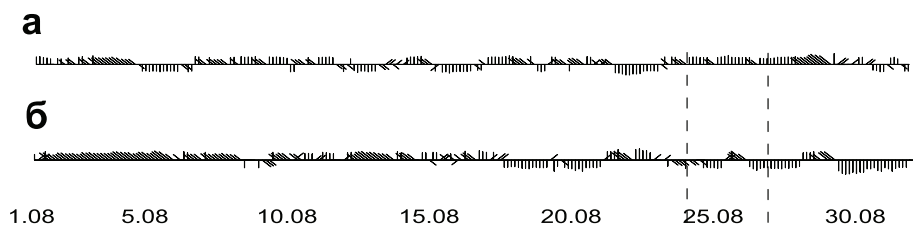


Рис. 5. Временная изменчивость направления ветра в период с 1 по 26 августа 2012 (а) и 2013 (б) гг. Период проведения гидрологических исследований ограничен вертикальными пунктирными линиями

Fig. 5. Temporal variability of wind direction in the periods August 1–26, 2012 (а) and 2013 (б). Periods of oceanographic surveys are limited by vertical dotted lines

При проникновении холодных кислородосодержащих вод в Амурский залив в его южной части, а также в области депрессии рельефа дна центральной части происходит понижение температуры придонных вод примерно на 10 °С (см. рис. 3, б, г) и возрастание содержания кислорода на 200 мкмоль/кг. При этом воды из южной части Амурского залива не пересекают Муравьевский порог. Таким образом, разрушение «мертвой зоны» происходит вследствие проникновения в область гипоксии вод из открытой части зал. Петра Великого через прол. Босфор Восточный (Тищенко и др., 2011; Тищенко, 2013).

Приведенные здесь данные (см. рис. 1, 2) показывают, что разрушение гипоксии в результате апвеллинга, зарегистрированное мониторинговой станцией 10 августа

2011 г., не было окончательным. Возвращение состояния гипоксии на короткое время наступило в конце августа, за ним вновь последовало ее разрушение в начале сентября. Таким образом, в конце лета резкие изменения содержания кислорода в точке наблюдений имеют колебательный характер, определяемый, очевидно, направлением адвекции вод в придонном слое. Так, при разрушении структуры поля ветра, характерного для летнего периода, происходит возрастание содержания кислорода в придонных водах Амурского залива. Однако последующее восстановление структуры поля ветра ведет к восстановлению гипоксии, что видно на рис. 1. По всей вероятности, результаты гидрологических исследований в 2013 г. отразили не окончательное разрушение гипоксии, поскольку в дальнейшем произошло восстановление структуры поля ветра, характерного для летнего сезона (см. рис. 5, б). Необходимо отметить, что, как видно на рис. 1, короткопериодная смена ветра в мае-июле не всегда вызывает флюктуации в гидрологических параметрах. По-видимому, есть дополнительные причины, помимо ветра, вызывающие апвеллинг/даунвеллинг, например фронт атмосферного давления (Зуенко, 2008).

Как известно (Гайко, 2005), над акваторией Амурского залива генеральная смена направления преобладающего ветра происходит дважды — весной (конец марта — начало апреля) и осенью (конец августа — сентябрь), что создает условия для формирования гипоксии (ветры южных румбов) и ее разрушения (ветры северных румбов). В то же время существуют короткопериодные флюктуации направления ветра (несколько дней), которые могут оказывать влияние на гидрологические (Т, S) и гидрохимические (O₂) характеристики придонных вод залива, но они не приводят к окончательному разрушению или формированию гипоксии. При таких флюктуациях, например в летний сезон, гипоксия быстро «восстанавливается». Так, в период с 10 августа по 4 сентября в результате неоднократной смены направления ветра изменялись Т, S, O₂-характеристики придонного слоя воды в заливе (рис. 1).

Выводы

Формирование и разрушение гипоксии придонных вод центральной части Амурского залива зависит от функционирования системы «даунвеллинг/апвеллинг», которая, в свою очередь, определяется муссонным характером ветра. При воздействии южных ветров в весенний и летний сезоны происходит смешение речных и морских вод южнее бара р. Раздольной, их последующий даунвеллинг и адвекция в более глубокую часть залива.

При движении этих вод с севера на юг над верхним слоем осадков, обогащенным органическим углеродом, они будут обедняться кислородом в результате микробиологического окисления органического вещества на границе раздела вода/осадок. При такой динамике вод в придонном слое вод Амурского залива формируется обширная зона гипоксии.

При северных ветрах происходит апвеллинг более холодных, соленых, обогащенных кислородом вод из открытой части зал. Петра Великого через прол. Босфор Восточный в Амурский залив. В этой ситуации область гипоксии разрушается, но не одномоментно. Лишь при окончательном установлении осенне-зимнего муссона происходит ее полное разрушение, как это было показано ранее (Тищенко и др., 2011).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-50-00034), грантов РФФИ 11-05-00241-а, 15-05-03796-а.

Список литературы

- Гайко Л.А. Особенности гидрометеорологического режима прибрежной зоны залива Петра Великого (Японское море) : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — 150 с.
- Жабин И.А., Грамм-Осипова О.Л., Юрасов Г.И. Ветровой апвеллинг у северо-западного побережья Японского моря // Метеорол. и гидрол. — 1993. — № 10. — С. 82–86.
- Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А. и др. Эвтрофикация Амурского залива // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. — Владивосток : Издат. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. — С. 76–113.

Зуенко Ю.И. Промысловая океанология Японского моря : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2008. — 227 с.

Климова В.Л. Оценка последствий сброса грунта по биологическим показателям в районах дампинга в Японском море // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. — М. : Гидрометеиздат, 1988. — С. 137–141.

Коновалова Г.В. Сезонная характеристика фитопланктона в Амурском заливе Японского моря // Океанол. — 1972. — Т. 12, № 1. — С. 123–128.

Михайлик Т.А., Тищенко П.Я., Колтунов А.М. и др. Влияние реки Раздольной на экологическое состояние вод Амурского залива (Японское море) // Водные ресурсы. — 2011. — Т. 38, № 4. — С. 474–484.

Моисеева Н.П. Отклик морских биоценозов на сброс грунта // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. — М. : Гидрометеиздат, 1988. — С. 89–104.

Надточий В.А., Безруков Р.Г. Состав и количественные характеристики сообществ макробентоса Амурского залива // Современное состояние водных биоресурсов : мат-лы конф., посвящ. 70-летию С.М. Коновалова. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2008. — С. 181–186.

Надточий В.А., Будникова Л.Л., Безруков Р.Г. Макрозообентос залива Петра Великого (Японское море): состав, распределение, ресурсы // Изв. ТИНРО. — 2005. — Т. 140. — С. 170–195.

Олейник Е.В., Мощенко А.В., Лишавская Т.С. Влияние загрязнения донных отложений на видовой состав и обилие двустворчатых моллюсков в заливе Петра Великого Японского моря // Биол. моря. — 2004. — Т. 30, № 1. — С. 39–45.

Тищенко П.П. Сезонная гипоксия Амурского залива : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Владивосток, 2013. — 16 с.

Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Звалинский В.И. и др. Скорость биохимического потребления кислорода при формировании гипоксии в Амурском заливе (Японское море) // Докл. РАН. — 2014. — Т. 459, № 6. — С. 750–754.

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., Сергеев А.Ф., Лобанов В.Б. и др. Гипоксия придонных вод Амурского залива // Вестн. ДВО РАН. — 2008. — № 6. — С. 115–125.

Храпченков Ф.Ф., Ярошук И.О., Кошелева А.В. и др. Ветровой апвеллинг в заливе Петра Великого по спутниковым и морским наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. — 2014. — № 3. — С. 33–40.

Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. — Т. 1. — 580 с.

Юрасов Г.И., Вилянская Е.А. Характерные особенности осенне-зимнего апвеллинга в заливе Петра Великого // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. — М. : ГЕОС, 2008. — С. 73–81.

Diaz R.J., Rosenberg R. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems // Science. — 2008. — Vol. 321. — P. 926–929.

Grantham B.A., Chan F., Nielsen K.J. et al. Upwelling-driven nearshore hypoxia signals ecosystem and oceanographic changes in the northeast Pacific // Nature. — 2004. — Vol. 429. — P. 749–754.

Healy T.R. Coastal wind effects // Encyclopedia of Coastal Sciences. — Springer, Netherlands, 2005. — P. 312–313.

Nakayama K., Sivapalan M., Sato C. and Furukawa K. Stochastic characterization of the onset of and recovery from hypoxia in Tokyo Bay, Japan: Derived distribution analysis based on «strong wind» events // Water resources research. — 2010. — Vol. 46. — W12532. — doi:10.1029/2009WR008900.

Поступила в редакцию 24.06.15 г.