

УДК 551.464:551.468

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННОГО В ВОДЕ КИСЛОРОДА В ПРОЛИВЕ БОСФОР ВОСТОЧНЫЙ (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

© 2017 г. Н. И. Григорьева

*Институт биологии моря им. А.В. Жирмунского, Национальный научный центр морской биологии ДВО РАН, Владивосток, Россия
e-mail: grigoryeva04@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.09.2015 г., после доработки 21.12.2015 г.

На основе многолетних наблюдений (2006–2013 гг.) проанализированы сезонные изменения содержания растворенного в воде кислорода в прол. Босфор Восточный (зал. Петра Великого, Японское море). Выявлено, что в придонном слое воды среднемесячные концентрации кислорода существенно снизились в летний период в сравнении со среднемноголетними данными, а минимальные значения стали фиксироваться в течение четырех месяцев – с июля по октябрь. Показано, что содержание растворенного в воде кислорода зависит от смены направлений течений в проливе; более низкие концентрации обусловлены притоком гипоксических вод преимущественно из Амурского залива.

DOI: 10.7868/S0030157417050070

Содержание растворенного в воде кислорода (O_2) характеризует степень аэрации водоема и имеет важное значение для оценки его экологического и санитарного состояния [5, 25, 26]. Изменение концентраций O_2 зависит от уровня антропогенной нагрузки и природных факторов – динамики вод, перемешивания и обмена с атмосферой. На состояние вод зал. Петра Великого значительное влияние оказывают бытовые и производственные стоки, поступающие из г. Владивостока [10, 14]; и, согласно сведениям Обзоров Росгидромета [9], их влияние носит определяющий характер и может значительно снижать показатели O_2 .

В водах, окружающих городскую территорию, – в б. Золотой Рог и Амурском заливе – минимальные значения содержания растворенного в воде кислорода (ниже 2.5–3.0 мл/л) стали фиксироваться с 1972 г. [13, 27], что объяснялось периодическим уменьшением интенсивности водного перемешивания [18]. Постоянный характер эти явления приобрели с 1990 г. [16, 19]. В дальнейшем области придонной гипоксии в Амурском заливе в летне-осенний период стали увеличивать площадь распространения [6, 19, 20], и, вследствие характера течений [22], их влияние стало сказываться на южных частях зал. Петра Великого, но до настоящего времени дальнейший перенос и трансформация гипоксических вод остаются не исследованными.

Проведенный нами мониторинг состояния прибрежных морских экосистем в связи со строительством морского океанариума позволил получить большой массив гидрохимических данных о морских водах, омывающих о-в Русский

и, в частности, его северную часть – прол. Босфор Восточный. Ориентированный в разные стороны света и соединяющий два залива второго порядка – Амурский и Уссурийский, этот пролив является самой северной проливной системой, разделяющей группу крупных островов в зал. Петра Великого (рис. 1). Его длина составляет около 9 км, ширина в центральной и западной частях – 0.8 и 1.5 км соответственно, в восточной – 3.7 км. Основные глубины вдоль осевой линии составляют 28–36 м. В западной части находится впадина с максимальной глубиной 50 м. В северный берег пролива врезаны бухты Золотой Рог, Диомид, Улисс и Патрокл, в южный берег восточной части – бухты Аякс и Парис.

Цель работы – изучение содержания растворенного в воде кислорода в водах прол. Босфор Восточный и мелководных бухтах северной части о-ва Русский и оценка роли природных факторов в формировании его межсезонной динамики по данным последних лет наблюдений (с 2006 по 2013 г.).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено по материалам проведенных работ с 2006 по 2013 г. с привлечением архивных данных экспедиций Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева (ТОИ) ДВО РАН [21], Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института (ДВНИГМИ) [1, 11, 16] и Н. Христофоровой [23].

Отбор проб и анализы выполнены по стандартным методикам. Химические анализы содержания

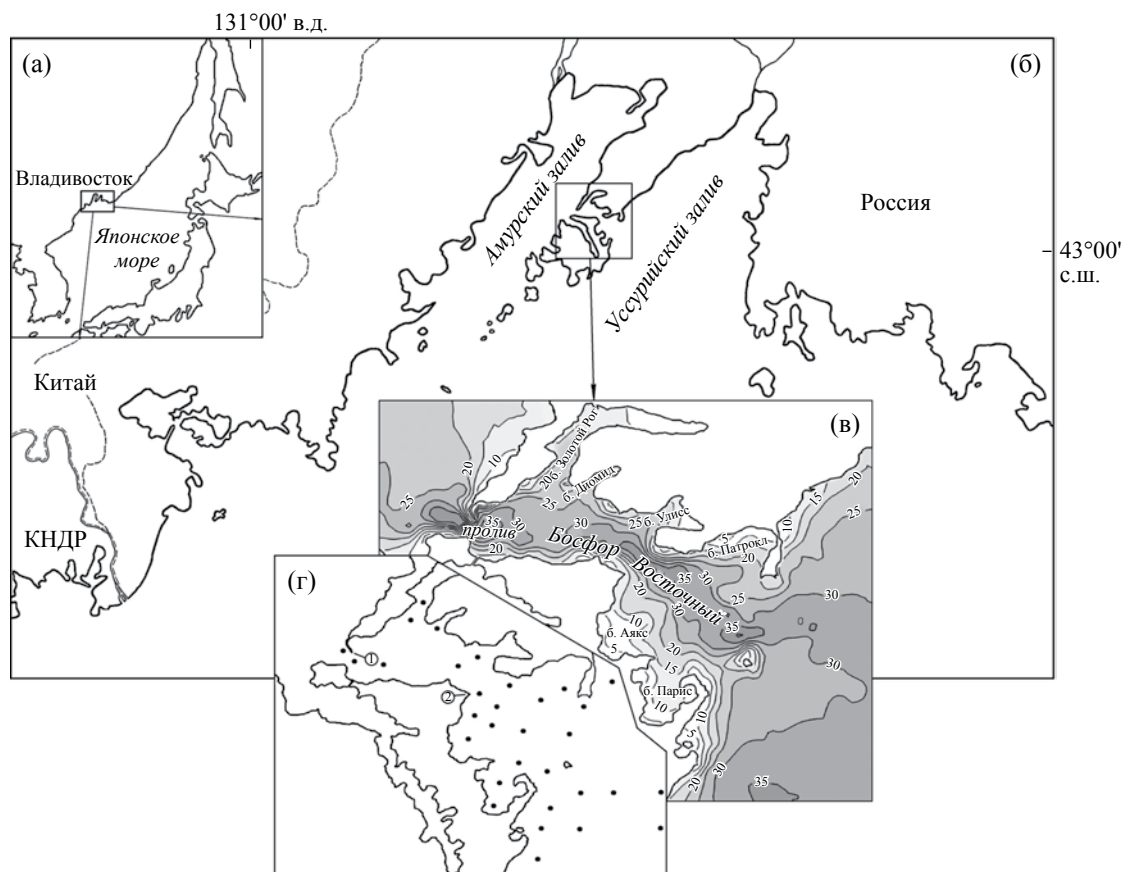


Рис. 1. Карты: района работ (а), зал. Петра Великого (б), прол. Босфор Восточный (в) и схема станций отбора проб воды (г). 1 – м. Токаревская кошка (маяк Токаревского), 2 – м. Новосильского.

растворенного кислорода проведены в соответствии с нормативными документами Росгидромета (URL: <http://www.snti.ru/srg.php>). Часть проб обработана в сертифицированной лаборатории Центра мониторинга загрязнения окружающей среды “Приморского УГМС”, другая – в аттестованной лаборатории ООО “ЭКОАНАЛИТИКА” по договору с Институтом биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН.

В работе использованы данные, полученные по различным сеткам станций с общим числом 33, включая прилегающую акваторию Уссурийского залива. Среднемесячные значения рассчитаны по станциям западной части пролива – от м. Токаревская кошка (маяк Токаревского) до м. Новосильского и бухт Аякс и Патрокл; достоверность различия средних проверена t-критерием Стьюдента. Все расчеты выполнены Excel, графическая интерпретация распределений параметров осуществлена программой Surfer методом kriging [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что содержание растворенного в воде кислорода в поверхностном слое вод зал. Петра Великого имеет годовой ход с максимумом

в холодное время года и минимумом в летний период [2, 13]. Образование первого экстремума связано с низкими температурами воды и массовым развитием фитопланктона, второго – с высокими температурами и интенсивно протекающими процессами бактериальной деструкции. В зал. Петра Великого среднегодовое содержание растворенного кислорода в поверхностном слое изменяется в пределах 6–8 мл/л, 100–120% насыщения, в придонном – от 4 до 6 мл/л, 50–80% насыщения [16]. Наиболее значительные изменения O_2 наблюдаются в период весенне-летнего прогрева воды. Весной его концентрации в поверхностном слое могут достигать 9–10 мл/л в Уссурийском и Амурском заливах и 12 мл/л в б. Золотой Рог, 90–130% насыщения, летом – снижаться до 4–5 мл/л, 45–90% насыщения.

В прол. Босфор Восточный и прилегающих бухтах содержание растворенного в воде кислорода в поверхностных водах достаточно высокое и составляет, как правило, свыше 100% насыщения, даже в летнее время. По данным станций Отдела государственной системы наблюдений (ОГСН) [2], максимум его содержания наблюдается в январе–апреле и составляет

в среднем 7.7–9.4 мл/л, 101–130% насыщения, с абсолютным максимумом 9.8 мл/л, 134% насыщения (рис. 2). Минимальные концентрации O_2 наблюдаются в июле–сентябре, среднемесячные значения составляют 5.0–6.8 мл/л, 90–127% насыщения. Минимум зафиксирован в сентябре (4.7 мл/л, 84% насыщения). У дна эти показатели в первую половину года в среднем выше 7.7 мл/л (98% насыщения) и могут иметь такие же значения, что и у поверхности воды, но в летний период снижаются до 3.0–5.5 мл/л, 50–89% насыщения. Минимум отмечен также в сентябре (2.6 мл/л, 46% насыщения).

По нашим данным (2006–2013 гг.), в летний период – в июле–августе – в прол. Босфор Восточный содержание растворенного в воде кислорода у поверхности в среднем осталось почти таким же – 5.7–5.9 мл/л, 106–111% насыщения, но у дна его содержание существенно снизилось – в среднем до 2.6–3.5 мл/л, 46–59% насыщения (рис. 2). Минимум составил 1.16 мл/л, 19% насыщения и зафиксирован в августе у м. Токаревская кошка (маяк Токаревского). Следует отметить, что снижение O_2 до 2.5–3.0 мл/л в придонном слое в летний период наблюдалось во все рассматриваемые годы, до 1.0–2.0 мл/л – в 2007, 2011 и 2013 гг. Кроме того, гипоксические воды стали фиксироваться в проливе и в октябре 2011 и 2012 гг., что ранее не отмечалось. Таким образом, нами выявлено, что снижение содержания растворенного в воде кислорода до 2.5 мл/л в придонных слоях прол. Босфор Восточный стало обычным явлением, в отдельные годы достигая критических значений 1.0–2.0 мл/л, а в целом минимальные концентрации O_2 стали наблюдаться в течение четырех месяцев – с июля по октябрь.

Также обнаружено, что летом и осенью в придонной зоне средние показатели O_2 были ниже в западной части пролива, чем в восточной (таблица). В августе–сентябре это различие было особенно заметным, в среднем на 1–2 мл/л (возможно, и в июле, т.к. наши данные неполные). При этом, в сентябре–октябре, когда величины растворенного в воде

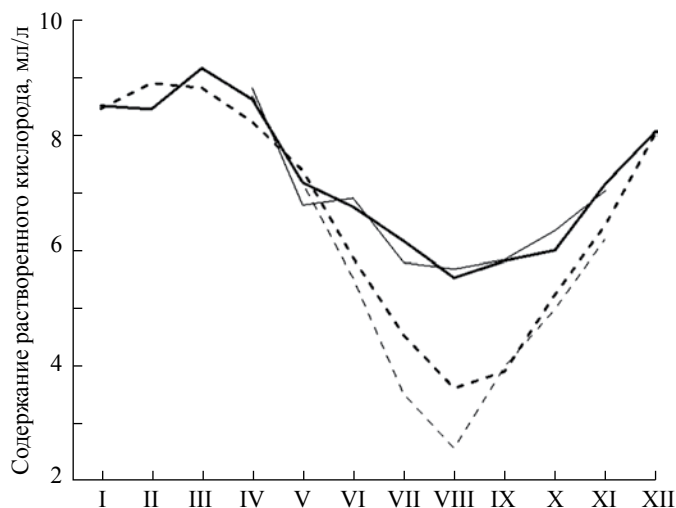


Рис. 2. Среднемесячное содержание растворенного кислорода в 1981–1985 гг. (жирная линия) и в 2006–2013 гг. (обычная линия) у поверхности воды (сплошная линия) и у дна (штрих-линия) в течение года в прол. Босфор Восточный (средние рассчитаны по станциям западной части пролива – от маяка Токаревского до бухт Аякс и Патрокл).

кислорода у дна, как правило, выравниваются и становятся 4.0–5.0 мл/л, средние значения O_2 оставались ниже в западной части пролива. Эти различия также проявлялись и по данным одномоментных съемок. Например, в июне 2006 г. в бухтах Диомид, Улисс, Аякс и Парис в придонных горизонтах (8–24 м) содержание кислорода составляло 5.25–5.74 мл/л, в то время как на тех же горизонтах у б. Золотой Рог и у м. Токаревская кошка его содержание находилось в пределах 2.22–4.03 мл/л. Аналогичные ситуации наблюдались и в другие исследованные годы. С большой уверенностью можно сказать, что это различие связано с превалированием влияния гипоксических вод, поступающих из Амурского залива и б. Золотой Рог.

Природные факторы определяют изменения содержания растворенного в воде кислорода. Эта изменчивость связана со сменой синоптической

Среднемесячное содержание растворенного в воде кислорода (мл/л) у поверхности воды/у дна в прол. Босфор Восточный (за 2006–2013 гг.)

Районы пролива Босфор Восточный	Месяцы							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Вход в пролив из Амурского залива*	-/-	6.82/7.49	6.50/5.43	5.63/3.67	5.56/2.08	5.30/2.67	5.91/4.56	6.61/5.37
Западная часть**	8.82/8.68	6.79/7.17	6.91/5.53	5.80/3.53	5.69/2.59	5.85/4.00	6.35/5.00	7.04/6.21
Восточная часть***	8.91/8.48	7.13/7.66	6.75/5.23	5.95/-	5.28/4.07	5.70/4.43	6.19/5.12	7.30/6.15

*Вход в пролив: от м. Токаревского (Амурский залив) до м. Токаревская кошка.

**Западная часть: от м. Токаревская кошка до м. Новосильского и бухт Аякс и Патрокл.

***Восточная часть: от м. Новосильского до выхода в Уссурийский залив.

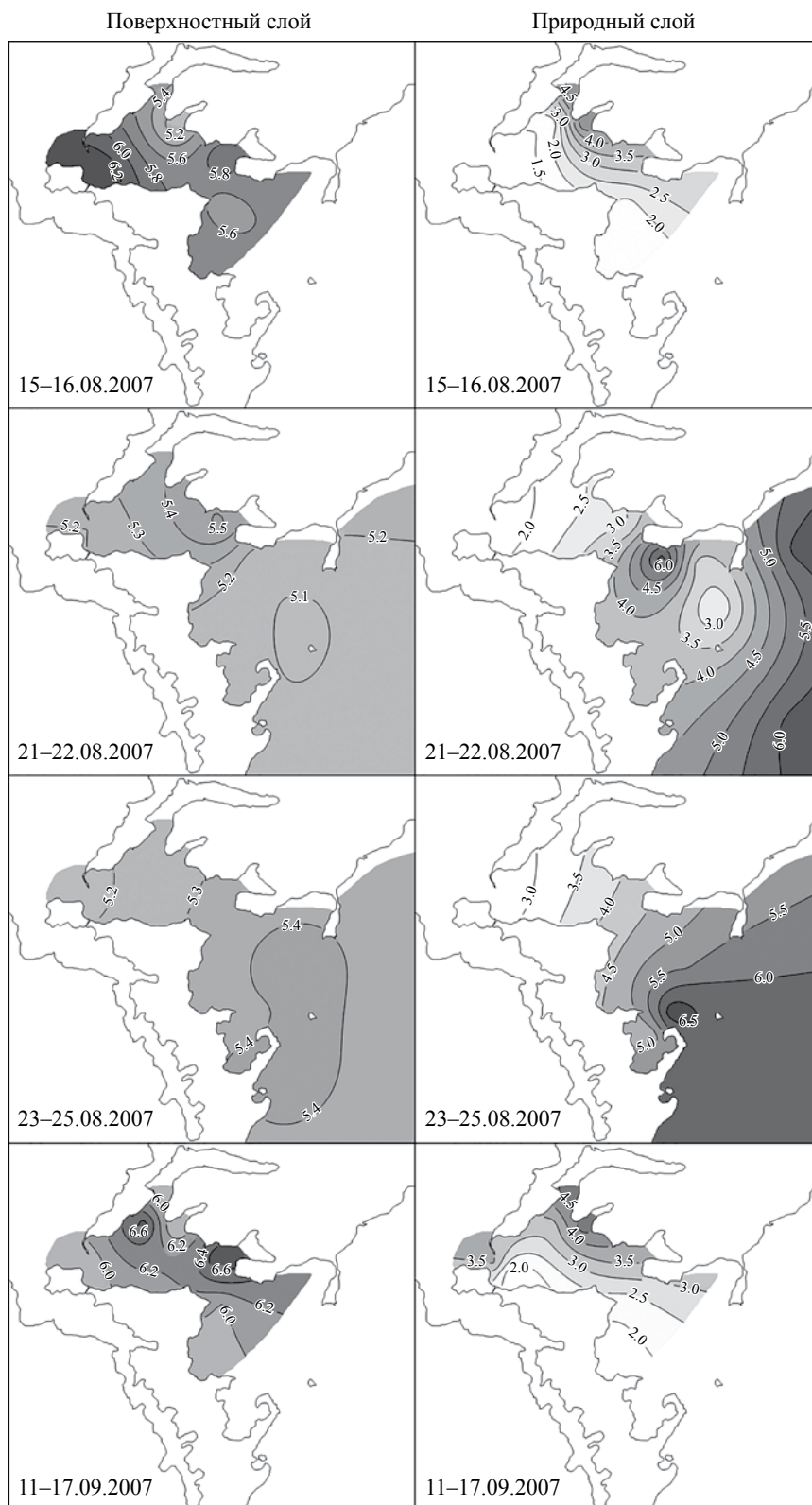


Рис. 3. Содержание растворенного кислорода (мл/л) в прол. Босфор Восточный и прилегающих районах в 15–16, 21–22, 23–25.08 и 11–17.09.2007 г.

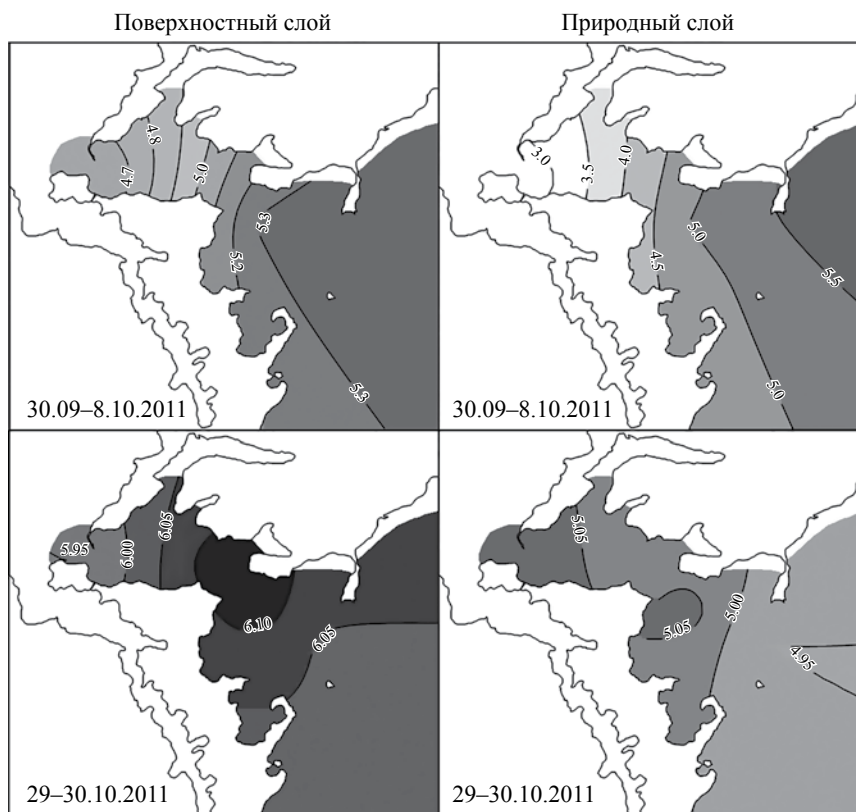


Рис. 4. Содержание растворенного кислорода (мл/л) в прол. Босфор Восточный и прилегающих районах в 30.09–8.10 и 29–30.10.2011 г.

ситуации, с флуктуациями направлений основных течений, перемешиванием и т.д. Наблюдаемые нами колебания в содержании O_2 в прол. Босфор Восточный свидетельствуют, что проход гипоксических вод через пролив может совершаться в течение месяца. Так, на иллюстрациях с 15 августа по 17 сентября 2007 г. хорошо прослеживаются обедненные кислородом воды, приходящие из Амурского залива, видна их локализация в отдельных местах пролива, а также момент выноса в Уссурийский залив (рис. 3). В то же время на рисунке отчетливо прослеживается подток вод из глубоководной части зал. Петра Великого в восточную часть прол. Босфор Восточный, и, несмотря на проброс гипоксических вод, в отдельные дни содержание растворенного O_2 в придонных горизонтах в конце августа имеет значения 5.0–6.5 мл/л (рис. 3). Здесь наблюдаются два процесса – пронос гипоксических вод через пролив и приток придонных вод из глубоководной части зал. Петра Великого в результате начинающего постоянного апвеллинга в шельфовой зоне. Как показывают наблюдения, оба этих процесса могут активно взаимодействовать, как например, в октябре 2011 г., когда влияние апвеллинга в проливе становится доминирующим, но пронос обедненных кислородом вод из Амурского залива все еще заметен (рис. 4).

По литературным сведениям [21], в летний период воды, проходящие через прол. Босфор Восточный в основном происходят из северной части Амурского залива, которые отмечаются в придонном слое у маяка Токаревского даже при доминирующих в теплый период года юго-восточных ветрах. Иногда их влияние сохраняется в придонном слое и при северных ветрах. В отдельные годы в июне–июле проброс вод может иметь значительную величину и фиксироваться по всей толще пролива, а к концу августа в западной придонной котловине Уссурийского залива из-за этого могут наблюдаться пониженные значения растворенного в воде кислорода [4, 17]. По материалам многосуточной станции, установленной у м. Токаревская кошка, в 2009 г. гипоксические воды наблюдались в течение 1.5 мес. [7].

Согласно предыдущим исследованиям, в прол. Босфор Восточный изменение направления генерального переноса с восточного на западный происходит в августе–сентябре [21]. В сентябре–октябре западный поток начинает полностью преобладать, и холодные, глубинные воды зал. Петра Великого проникают в прол. Босфор Восточный и затем проходят в Амурский залив. По мнению многих исследователей [4, 7, 17], именно апвеллинг япономорских вод на шельф и их последующая адвекция

в вершины заливов, происходящая в августе—октябре, является основным механизмом водообмена и разрушения формирующейся летом гипоксии в придонном слое Амурского залива. В этих работах показано, что подъём вод и продвижение водных масс моря на шельф может происходить волнообразно, в пульсирующем режиме, как это наблюдалось в октябре 2008 и 2011 гг. При этом в придонных горизонтах возникают значительные скачки основных гидрологических и гидрохимических характеристик морской воды, значительно повышающие их вариабельность в сравнении с поверхностными водами [24]. Например, по наблюдениям в июле—сентябре 2007—2009 гг. [15] в Уссурийском заливе были зафиксированы резкие смены температуры (на 15 °С) и солёности (на 1‰) в течение 5—7 дней, которые были связаны с проникновением субмезомасштабных струй антициклонического вихря в залив. Также по материалам, полученными В. Будаевой [1] в начале сентября 2011 г., признаки раннего апвеллинга в юго-западную часть Уссурийского залива также были отмечены снижением температуры на 1—2 °С и увеличением солёности воды на 0.1—0.2‰.

При анализе имеющихся у нас материалов, точные моменты изменений смены основного переноса вод в прол. Босфор Восточный в исследованные годы проследить не удалось, и, прежде всего, из-за недостатка данных, т.к. непрерывный мониторинг не ведётся. Кроме того, интенсивность переноса также неясна и требует дополнительных исследований. Удалось лишь проследить, что в зал. Петра Великого в 2008 г. апвеллинги возобновились в июле, в 2007 и 2009 гг. — в 20-х числах августа, в 2010 и 2011 гг. — в начале сентября. Таким образом, по данным гидрологических съёмок разных лет момент смены доминирующих течений в прол. Босфор Восточный варьирует в различные годы с конца июля до конца сентября и влияет на режим содержания растворённого в воде кислорода, что отражает межсезонную изменчивость регионального масштаба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в 2006—2013 гг. в прол. Босфор Восточный анализ содержания растворённого в воде кислорода показал, что его концентрации в летний период у поверхности воды в среднем остались почти такими же, но у дна его содержание существенно снизилось. Минимум зафиксирован в августе в западной части пролива. Общее снижение содержания растворённого в воде кислорода в прол. Босфор Восточный в придонных слоях воды стало происходить с июня, а минимальные значения стали наблюдаться в течение четырех месяцев — с июля по октябрь. Изменения концентраций растворённого в воде кислорода связаны с превалированием того

или иного направления переноса вод в проливе; вынос гипоксических вод происходит из Амурского залива и б. Золотой Рог.

В связи с этим очевидно, что периодические снижения концентраций растворённого кислорода могут нести угрозу экосистеме прол. Босфор Восточный, хотя и не носят катастрофического характера. Тем не менее, многие исследователи отмечают, что в последние годы в Амурском заливе существенно изменился состав донного сообщества: произошло обеднение видового состава и увеличилась доля устойчивых к дефициту кислорода видов зообентоса [3]. К настоящему времени также отмечены радикальные изменения в биомассе бентосных животных [12], которые подвергаются воздействию гипоксии. Таким образом, полученные нами новые материалы, оценивающие содержание растворённого в воде кислорода в прибрежных водах, уже не позволяют оптимистично смотреть на экологическое состояние наших заливов, остается лишь надежда на их способность к самоочищению, которая пока поддерживает некоторую стабильность в сохранении экосистем.

Автор благодарит свою коллегу Е.В. Журавель за ценные замечания при подготовке рукописи статьи.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта “Дальний Восток” № 15-И-6-059.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будаева В.Д. Состояние вод залива Петра Великого (Японское море) по данным океанографических съёмок 2010—2013 гг. URL: <http://www.ferhri.ru/>.
2. Бюллетень о состоянии химического загрязнения морской воды на территории Приморского края за 1981—1985 гг. Владивосток: ДВНИГМИ, 1981—1985.
3. Ващенко М.А. Загрязнение залива Петра Великого Японского моря и его биологические последствия // Биология моря. 2000. Т. 26. № 3. С. 149—159.
4. Данченков М.А., Фельдман К.Л., Файман П.А. Температура и солёность вод залива Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. Вып. ДВНИГМИ № 4. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 10—25.
5. Ерёмкина Т.Р., Максимов А.А., Волощук Е.В. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива // Океанология. 2012. Т. 52. № 6. С. 836—845.
6. Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф. и др. Экологические исследования залива Петра Великого, выполненные ТОИ ДВО в период 1999—2010 гг. // Тр. I регион. научн. конф. “Океанография залива Петра Великого”. Владивосток,

- 2–3 апреля 2012 г. Владивосток: ДВНИГМИ, 2012. С. 87–92. URL: <http://www.ferhri.ru/>.
7. Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Гуленко Т.А. и др. Сезонное изменение водообмена через пролив Босфор Восточный и изменение структуры вод Амурского залива // Тр. I регион. научн. конф. “Океанография залива Петра Великого”. Владивосток, 2–3 апреля 2012 г. Владивосток: ДВНИГМИ, 2012. С. 21–30. URL: <http://www.ferhri.ru/>.
 8. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. 408 с.
 9. Обзоры Росгидромета. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2010–2012 гг. URL: <http://www.meteorf.ru/>.
 10. Огородникова А.А. Эколого-экономическая оценка воздействия береговых источников загрязнения на природную среду и биоресурсы залива Петра Великого. Владивосток: ТИПРО-центр, 2001. 193 с.
 11. Океанографические съемки ДВНИГМИ в заливе Петра Великого в 2007–2011. URL: <http://www.ferhri.ru/>.
 12. 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 // Биология моря. 2004. Т. 30. № 1. С. 39–45.
 13. Подорванова Н.Ф., Ивашишникова Т.С., Петренко В.С. и др. Основные черты гидрохимии залива Петра Великого (Японское море). Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. 201 с.
 14. Редковская З.П. О влиянии химического загрязнения на кислородный режим залива Петра Великого // Оценки миграции загрязняющих веществ и их воздействия на природную среду. Владивосток: ДВНИГМИ, 1980. С. 94–103.
 15. Рогачев К.А. Динамика антициклонических вихрей и быстрое обновление вод Уссурийского залива (Японское море) по спутниковым и морским наблюдениям // Исследование земли из космоса. 2013. № 2. С. 42–49.
 16. Севастьянов А.В., Лишавская Т.С., Чаткина Т.В. Гипоксия придонных вод прибрежных районов залива Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. 2012. Вып. 154. С. 226–245.
 17. Сёмкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др. Особенности распределения гидрохимических параметров Уссурийского залива (Японское море) в летний период // Изв. ТИПРО. 2012. Т. 168. С. 152–168.
 18. Тищенко П.Я., Талли Л.Д., Лобанов В.Б. и др. Сезонная изменчивость гидрохимических свойств Японского моря // Океанология. 2003. Т. 43. № 5. С. 720–732.
 19. Тищенко П.Я., Сергеев А.Ф., Лобанов В.Б. и др. Гипоксия придонных вод Амурского залива // Вестник ДВО РАН. 2008. № 6. С. 115–125.
 20. Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Звалинский В.И. и др. Карбонатная система Амурского залива (Японское море) в условиях гипоксии // Океанология. 2011. Т. 51. № 2. С. 246–257.
 21. ТОИ. Морские научные исследования в рейсах НИС в 2009–2011 гг. URL: <http://pacificinfo.ru/>.
 22. Файман П.А. Расчет диагностических течений в заливе Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. Вып. ДВНИГМИ № 4. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 26–33.
 23. Христофорова Н.К., Емельянов А.А., Бердасова К.С. и др. Экологическая характеристика вод пролива Босфор Восточный по кислородным показателям // Изв. ТИПРО. 2015. Т. 181. С. 161–168.
 24. Шевцова О.В. Закономерности внутрисуточной изменчивости гидрохимических показателей в прибрежной зоне моря // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 3. С. 341–353.
 25. Gamo T. Dissolved oxygen in the bottom water of the Sea of Japan as a sensitive alarm for global climate change // Trends in Analytical Chemistry. 2011. V. 30. N8. P. 1308–1319.
 26. Rabalais N.N., Turner R.E., Díaz R.J. et al. Global change and eutrophication of coastal waters // J. of Marine Science. 2009. 66. P. 1528–1537.
 27. Tkalin A.V., Belan T.A., Shapovalov E.N. The state of the marine environment near Vladivostok, Russia // Marine Pollution Bull. 1993. V. 8. P. 418–422.

Investigation of Dissolved Oxygen Content in the Eastern Bosphorus Strait (Peter the Great Bay, Sea of Japan – East Sea)

N. I. Grigoryeva

The seasonal and inter-annual changes of dissolved oxygen (DO) were analyzed based on long-term data of observations (2006–2013) from the Eastern Bosphorus Strait (Peter the Great Bay, Sea of Japan). It was found that the monthly average concentrations of DO at the bottom of the strait in July and August were significantly lower than the average annual value of the historical data. The minimum values of DO were observed for four months, from July to October. It was also found that the western deep waters of the Eastern Bosphorus Strait showed lower values of DO than the eastern deep waters due to the hypoxic water inflow from Amur Bay. It was possible to analyze the seasonal evolution of the different water masses and their dissolved oxygen content in this strait.