УДК 551.464

# СЕЗОННАЯ ГИПОКСИЯ ВОД ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО МОРСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

***П.Я. Тищенко, П.А.Стунжас*, В.В. Ивин**, П.П. Тищенко, П.Ю. Семкин, Т.А. Михайлик, Ю.А. Барабанщиков***

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
*E-mail: tpavel@poi.dvo.ru*
* Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
г. Москва, Нахимовский проспект, 36
** Институт биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН
г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17

*В статье приводятся данные гидролого-гидрохимических характеристик вод южного района Дальневосточного морского биосферного заповедника, выполненные в летний сезон 2013–2014 гг. Также приводятся результаты мониторинга станции наблюдений – WQM (Water Quality Monitor) за период 2014–2015 гг. Результаты указывают на существование гипоксии придонных вод у о. Фуругельма. Обсуждаются возможные причины формирования и разрушения гипоксии.*

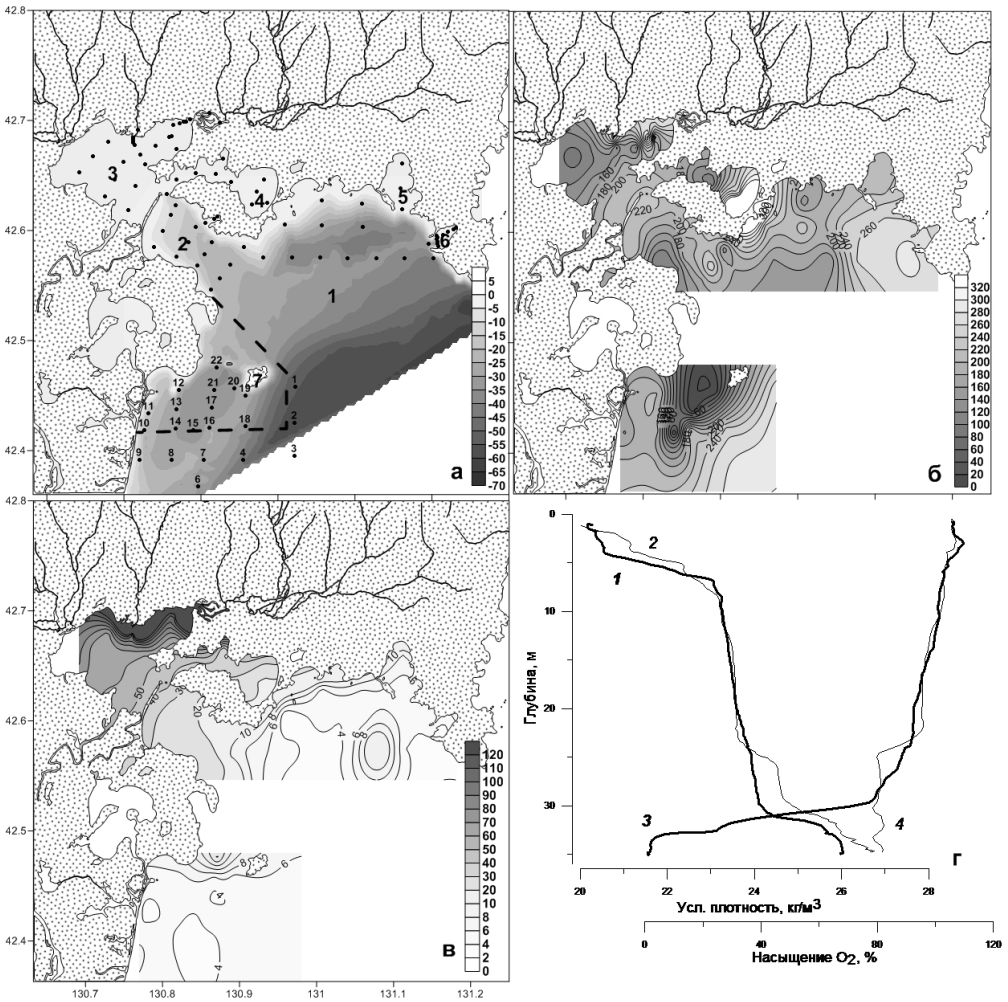
**Введение**. В последние три десятилетия количество прибрежных акваторий, подверженных гипоксии, значительно возросло. Это явление рассматривается как новый глобальный вызов человечеству [1–3]. Глобальное потепление климата, уменьшение лесных массивов, рост двуокиси углерода в атмосфере, загрязнение атмосферы окислами серы и азота способствуют формированию гипоксии. На региональном уровне мощными факторами формирования и разрушения гипоксии являются: обмен вод между шельфом и морем, создание мегаполисов в прибрежных районах, развитие сельского хозяйства, перераспределение стока рек, строительство дамб, эвтрофикация прибрежных вод.

Антропогенное воздействие на экосистемы морского шельфа Японского моря оказало особенное воздействие на наиболее изолированную часть зал. Петра Великого – Амурский залив [4]. В августе 2007 г. в придонных водах центральной части Амурского залива была обнаружена область с низким содержанием кислорода, до 5 мкмоль/кг [5]. В ходе последующих экспедиционных работ в этом районе был установлен сезонный характер гипоксии Амурского залива [6] и показано, что существенную роль в ее формировании играет граница раздела вода/осадок. Было установлено, что в период формирования гипоксии средняя скорость биохимического потребления кислорода в придонном слое залива составляет 10 мкмоль/(кг·сут) [7].

В 2013 г. совместно с Институтом Биологии моря и Институтом океанологии РАН впервые была обнаружена область сероводородного заражения с отсутствием кислорода и мертвым зообентосом в южном районе Дальневосточного морского заповедника возле о. Фуругельма [8]. Такое открытие оказалось неприятной неожиданностью, т.к. эта акватория охраняется государством и не находится под прямым воздействием человека. В связи с этим были предприняты в течение 2013 – 2015 гг. значительные усилия по исследованию акватории, прилегающей к о. Фуругельма. Результаты этих исследований, их обсуждение являются предметом данной статьи.

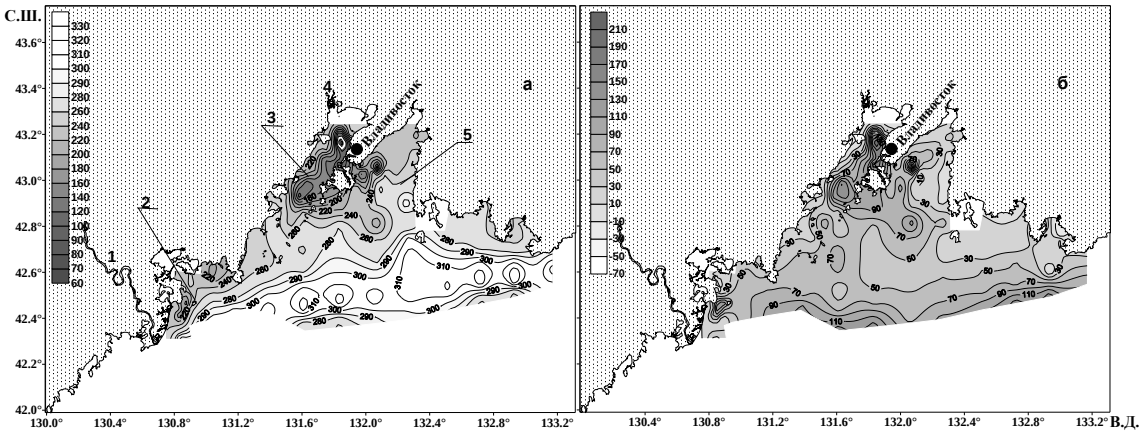
**Материал и методы.** С помощью подводного аппарата "SubFighter-3000” в 2013 г., 12 августа сотрудниками Института биологии моря была зафиксирована массовая гибель бентосных организмов (звезды, морские черви) во впадине вблизи о. Фуругельма. Гидролого-гидрохимическая экспедиция была проведена 16 августа на НИС “Профессор Насонов”. Всего было выполнено 22 гидролого-гидрохимические станции, на которых, помимо отбора проб на биогенные вещества, pH, щелочность, проводились определения глубины видимости диска Секки и вертикальное зондирование профилей температуры, электропроводности, растворенного кислорода, флуоресценции хлорофилла и мутности с помощью зонда SBE-19 plus. В этой работе нами будут использованы только данные, полученные зондирующей аппаратурой. При зондировании использовался малоинерционный оптический кислородный датчик японского производства (ARO2-USB). Аналогичные исследования были проведены нами в период с 13 по 18 июля в открытой ча-

сти залива Посьета и некоторых его бухтах – всего 81 станция, положение которых отмечено точками на рис.1а. Поскольку над впадиной с гипоксией наблюдался очень резкий градиент свойств воды, то в показания датчиков температуры (для расчета солености и плотности) и кислорода вносилась коррекция на запаздывание по методике, предложенной в [9].

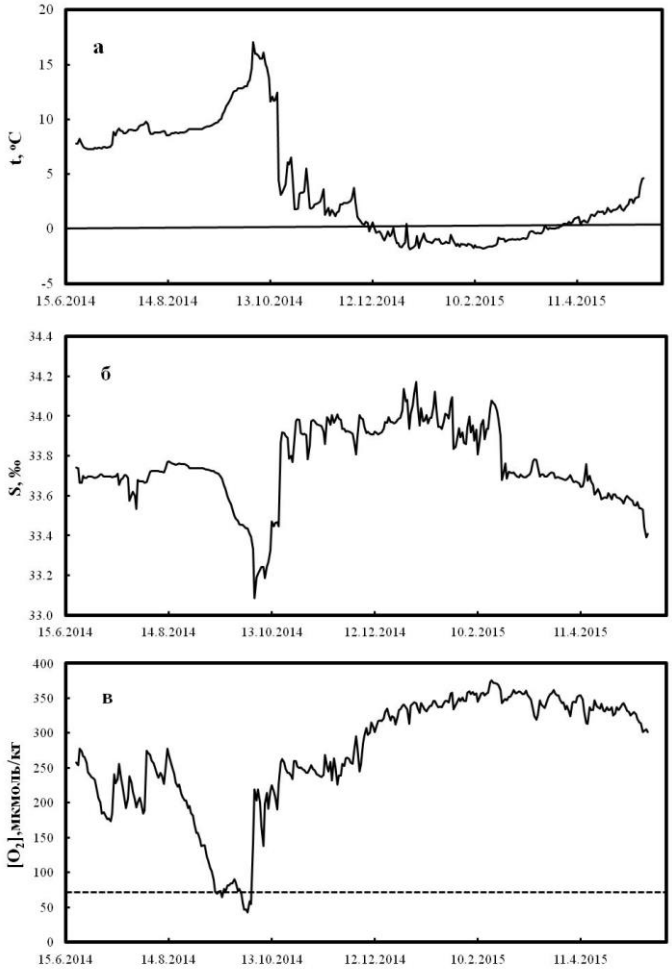



Р и с. 1. Распределения гидролого-гидрохимических характеристик залива Посьета (Японское море). **а** – батиметрическая карта глубин, 1 – открытая часть залива Посьета, 2 – б. Рейд Паллада, 3 – б. Экспедиции, 4 – б. Новгородская, 5 – б. Троицы, 6 – м. Шульца, 7 – о. Фуругельма, точками показано расположение станций, пунктирной линией – границы Южного района морского заповедника; **б** – распределение концентрации кислорода (мкмоль/кг) в придонном слое воды в заливе Посьета (июль, 2013 г.) и на юго-западе от о. Фуругельма (август, 2013 г.); **в** – распределение концентрации силикатов (мкмоль/кг) там же в поверхностном слое воды; **г** – распределение условной плотности (1, 2) и процентного насыщения кислорода (3, 4) на ст. 21 (жирная линия) и ст. 18, 16 августа, 2013

В 2014 г. были проведены масштабные гидрохимические исследования залива Петра Великого в 62 рейсе НИС “Профессор Гагаринский”. В период с 26 августа по 6 сентября было выполнено 154 гидролого-гидрохимических станции. На этих станциях было выполнено вертикальное зондирование профилей температуры, электропроводности, растворенного кислорода, флуоресценции хлорофилла и мутности с помощью зонда RINKO (Япония). В этом случае также использовался малоинерционный оптический датчик на кислород. Результаты распределения кислорода и кажущегося поглощения кислорода (Apparent Oxygen Utilization, $AOU = [O_2]_m - [O_2]_o$, где $[O_2]_m, [O_2]_o$ – концентрации кислорода измеренная и рассчитанная из условия равновесия с воздухом, соответственно) приведены на рис. 2.




Р и с. 2. Распределение концентрации растворенного кислорода (**а**) и кажущегося поглощения кислорода (**б**) в заливе Петра Великого. Результаты получены 26 августа – 3 сентября, 2014 г. 62 рейс НИС ”Профессор Гагаринский”. 1 – река Туманная; 2 – о. Фуругельма; 3 – Амурский залив; 4 – р. Раздольная; 5 – Уссурийский залив. Жирная изолиния белого цвета – граница гипоксии в северной части Амурского залива




Р и с. 3. Временная изменчивость температуры (°C) (а), солености (‰) (б) и содержания кислорода (мкмоль/кг), в зоне гипоксии по данным станции WQM. Горизонтальная пунктирная линия соответствует пороговому значению концентрации кислорода 76 мкмоль/кг

В 2014 г., в зоне аноксии, обнаруженной в августе 2013 г., (координаты 42˚ 28,3′ с.ш.; 130˚ 53,046′ в.д.) в метре от дна на глубине 36 м в период с 21 июня 2014 г. по 20 мая 2015 г. была установлена мониторинговая гидрологи-

ческая станция WQM (Water Quality Monitor) фирмы Wet Labs, оснащенная датчиками давления, температуры, электропроводности, кислорода. В течение одиннадцати месяцев, каждые три часа производилась запись показаний датчиков с интервалом в одну секунду в течение 5 минут в память прибора. Были получены средние значения показаний прибора для каждых суток. Среднесуточные значения для температуры, солености и растворенного кислорода представлены на рис. 3.

**Обсуждение.** Предыдущие гидрохимические исследования Залива Петра Великого показали, что минимальное содержание кислорода формируется в придонных горизонтах на максимальных глубинах в северной части Амурского залива [6]. Установлено, что основной причиной формирования гипоксии является микробиологическое окисление “избыточной” биомассы диатомовых водорослей, осевших на дно Амурского залива в условиях слабой динамики вод и при низкой интенсивности фотосинтетически активной радиации. Образование “избыточной” массы фитопланктона обусловлено залповым характером эвтрофикации Амурского залива рекой Раздольной в паводковый период. Исследование эвтрофикации вод залива Петра Великого показало, что Амурский залив в наибольшей степени подвержен антропогенному воздействию и в первую очередь избыточной поставке биогенных веществ и терригенной взвеси. Поэтому открытие мертвого зообентоса с помощью подводной фотосъемки аппаратом "SubFighter-3000” в районе морского заповедника оказалось неожиданностью, поскольку акватория заповедника не находится под непосредственным влиянием человека. Данные зондирования малоинерционным оптическим датчиком кислорода (ARO2-USB) показали отсутствие кислорода у дна для трех из 22 станций (17, 20, 21, рис. 1). Эти станции приурочены к депрессии рельефа дна, расположенной между о. Фуругельма и береговой линией залива Петра Великого. Также на этих станциях, в придонных горизонтах было обнаружено наличие сероводорода (данные неопубликованы), что, по нашему мнению, вызвало гибель морских организмов. По сути, массовый замор морских звезд и червей, который был зарегистрирован подводной фотосъемкой, является прямым доказательством аноксии придонных вод. Необходимо отметить, что эти организмы обладают высокой толерантностью к низким содержаниям кислорода, но в данном случае они были мертвы. Побуждающей причиной формирования гипоксии, на наш взгляд, является микробиологическое разложение органического вещества, происходящее без проникновения фотосинтетически активной радиации (ФАР). Глубина видимости диска Секки для фоновых станций расположенных на востоке и юго-востоке от о. Фуругельма, как правило, была 9 – 11 м, что соответствует толщине фотического слоя, примерно 30 – 35 м. Однако, для области депрессии глубина видимости диска Секки была существенно меньше и находилась в пределах 5.5 – 7.0 м. Этот результат подтверждается данными зондирования с помощью датчика мутности. Снижение прозрачности для этой акватории обусловлено тремя причинами. Во-первых, близость берега может обусловливать поступление взвешенного терригенного материала, во-вторых, взвешенный материал поступает из б. Экспедиции, в-третьих, повышенная продукция вод в районе депрессии снижает прозрачность вод. Из результатов измерения прозрачности по диску Секки следует, что толщина фотического слоя в области депрессии дна составляет 20 – 25 м, а глубина дна – 30 – 35 м. Таким образом, разложение органического вещества происходит в условиях отсутствия возможности регенерации кислорода через фотосинтез. Результаты зондирования кислорода указывают на то, что толщина придонного слоя, подверженного гипоксии-аноксии, не превышает 3–5 м (рис. 1 *г*). Общая площадь акватории, находящейся в условиях аноксии, составляет около 15 – 20 км$^2$.

Проведенные гидрохимические исследования в конце лета 2014 г. на НИС ”Профессор Гагаринский” показали наличие гипоксии в северной части Амурского залива (29 мкмоль/кг), рис. 2. Возле о. Фуругельма минимальная концентрация кислорода в придонном слое была 81 мкмоль/кг, т.е. превышала значение 76 мкмоль/кг, которое было при-

нято нами как пороговое значение, указывающее на гипоксийные условия [7]. На станции мониторинга у о. Фуругельма гипоксия была зафиксирована с 9 по 30 сентября, т.е. придонные воды заповедника находились три недели в состоянии гипоксии (рис. 3). Необходимо отметить, что существенное понижение концентрации кислорода с 15 августа по 12 сентября 2014 г. сопровождалось плавным ростом температуры и уменьшением солености в придонной воде. Скорость формирования гипоксии была примерно -6.6 мкмоль/(кг сут).

Разрушение гипоксии началось 29 сентября. Оно сопровождалось существенным увеличением температуры с 13 (28 сентября) до 17 $^{o}$C (3 октября). В этом временном интервале соленость уменьшилась от 33.4 до 33.1 ‰. Вслед за этими событиями последовало резкое уменьшение температуры и увеличение солености до 3.3 $^{o}$C и 33.9 ‰, соответственно (20 октября). Увеличение солености и уменьшение температуры, очевидно, связано с сезонным апвеллингом япономорских вод [10], которые содержат высокие концентрации кислорода. Дальнейшее разрушение гипоксии обусловлено зимней конвекцией. В период с середины декабря по начало апреля температура воды была отрицательной. Соленость с середины декабря до конца февраля находилась в пределах $34 \pm 0.1$‰. В этот же период наблюдалось максимальное содержание растворенного кислорода $330 \pm 20$ мкмоль/кг.

Очевидно, что формирование гипоксии происходило и ранее, до 2013 г. В пользу такой точки зрения говорят исследования зообентоса проведенные ранее, в 2000 г. Для исследуемой акватории было найдено обширное поселение полихет-детритофагов: биомасса и плотность достигали 3950 г/м$^2$ и 7540 экз/м$^2$, соответственно; основу биомассы полихет составляли следующие виды: *Maldane sarsi, Phyllodoce groenlandica, Dipolydora cardalia* и *Scoloplos armiger* [11]. Эти результаты уже в 2000 г. привели автора работы – Т.А. Белан к выводу о неблагополучной экологической ситуации в данном районе.

Установление причины формирования ”избыточной” биомассы фитопланктона является главной научной задачей, которая пока не решена. “Избыточная” биомасса – та часть фитопланктона, которая минуя второй трофический уровень (зоопланктон, зообентос), подвергается микробиологической деструкции и формирует в ложбине залива гипоксию в условиях низкой динамики вод. Очевидно, что для фотосинтеза фитопланктона необходим “строительный материал” – биогенные вещества, в первую очередь неорганические формы азота (нитраты, ионы аммония) и фосфора (фосфаты). Источниками биогенных веществ для данной акватории заповедника могут стать речной сток и береговой сток, включая грунтовые воды. Таким источником могут служить воды р. Туманной, которая впадает в Японское море в 25 км западнее исследуемой акватории. Это самая большая река Южного Приморья, годовой сток которой составляет 9.05 км$^3$ [12]. К сожалению, р. Туманная и ее эстуарий наименее исследованы, поскольку эта река является пограничной для трех государств – Китая, Сев.Кореи, России. Другим источником биогенных веществ могут служить воды б. Экспедиции, куда впадают много мелких речек (Гладкая, Цукановка, Тесная, Карасик). Наши гидрохимические наблюдения в б. Экспедиции для разных сезонов указывают на ее высокую продукцию: обычная концентрация хлорофилла в ее водах составляла 5–10 мг/м$^3$. Общая циркуляция течений в заливе Посьета такова, что опресненные и обогащенные биогенными элементами и органическим веществом воды б. Экспедиции в летний сезон могут поступать вдоль западного побережья б. Рейд Паллада, а затем отклоняться к юго-западу, в район между о. Фуругельм и западным побережьем [13]. Данные наблюдений, полученные в июле и августе 2013 г.: распределение солености поверхностных вод, а также концентраций кремния и хлорофилла, указывают на дополнительную продукцию фитопланктона в области депрессии дна. На побережье между б. Рейд Паллада и р. Туманной существует много болот с соленостью 10–25 ‰, что указывает на грунтовый водообмен между болотами и морем. Этот водообмен может также служить поставщиком биогенных веществ и взвеси в акваторию морского заповедника. Установление источников

биогенных веществ для ”избыточной” биомассы фитопланктона будет дальнейшим этапом наших исследований.

**Заключение.** На основе полученных гидролого-гидрохимических наблюдений в период 2013 – 2015 гг. установлен сезонный характер гипоксии в южной части морского заповедника. Средняя скорость формирования гипоксии равна – 6.6 мкмоль/(кг·сут). Придонные воды заповедника в 2014 году находились в состоянии гипоксии в течение трех недель. Область гипоксии локализована во впадине, расположенной между о. Фуругельма и береговой линией залива Петра Великого. Общая площадь акватории, находящейся в условиях гипоксии составляла 15 – 20 км$^2$. Скорость разрушения гипоксии была 40 мкмоль/(кг·сут).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 15-05-03796-а и программы “Дальний Восток” (№ 15-I-1-010)*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhang J., Gilbert D., Gooday A.J., et al.* Natural and human hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. Biogeosciences. – 2010. – 7. – P. 1443–1467.
2. *Breitburg D.L., Hondorp D.W., Davias L.A., et al.* Hypoxia, nitrogen, and fisheries: Integrating effects across local and global landscapes. Ann. Rev. Mar. Sci. – 2009. – 1. – P. 329–349.
3. *Diaz R.J., Rosenberg R.* Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems // Science. – 2008. – 321. – P. 926–929.
4. *Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А. и др.* Эвтрофикация залива Петра Великого // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана [под ред. В.А. Акуличева]. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 1. – С. 260–293.
5. *Тищенко П.Я., Сергеев А.Ф., Лобанов В.Б. и др.* Гипоксия придонных вод Амурского залива // Вестник ДВО РАН. – 2008. – № 6. – С. 115–125.
6. *Tishchenko P.Ya., Lobanov V.B., Zvalinsky V.I. et al.* Seasonal Hypoxia of Amursky Bay in the Japan Sea: Formation and Destruction // Terr. Atmos. Ocean. Sci. – 2013. – 24. – P. 1033–1050.
7. *Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Звалинский В.И., Семкин П.Ю.* Скорость биохимического потребления кислорода при формировании гипоксии в Аморском заливе (Японское море) // ДАН. – 2014. – 459. – С. 750–754.
8. *Tishchenko P., Ivin V., Stunzhas P.* Anoxia in the Far Eastern Marine Biosphere Reserve (Peter the Great Bay) // IMBERNews. – 2014. – № 26. – P. 21–22.
9. *Стунжас П.А., Мошаров В.Е., Радченко В.Н.* // Океанология. – 2013. – 53. – С. 558–568.
10. *Жабин И.А., Грамм-Осипова О.Л., Юрасов Г.И.* Ветровой апвеллинг у северо-западного побережья Японского моря // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 10. – С. 82–86.
11. *Белан Т.А.* Макрозообентос мягких грунтов на акватории от приустьевого участка реки Туманной до острова Фуругельма // Экологическое состояние и биота Юго-Западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 1. – С. 147–167.
12. *Шулькин В.М., Семыкина Г.И.* Поступление загрязняющих веществ в залив Петра Великого и оценка их вклада в создание экологических проблем // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря [под ред. Н.К. Христофоровой]. – Владивосток: Издательский дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. – С. 76–113.
13. *Григорьева Н.И.* Залив Посьета**:** физико-географическая характеристика, климат, гидрологический режим // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря [под ред. Н.К. Христофоровой]. – Владивосток: Издат. дом Дальневост. федерал. ун-та. – 2012. – С. 31–61.