

На правах рукописи



Семкин Павел Юрьевич

ГИПОКСИЯ ЭСТУАРИЕВ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Владивосток – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук.

Научный руководитель: **Тищенко Павел Яковлевич**, доктор химических наук, заведующий лабораторией гидрохимии ТОИ ДВО РАН, г. Владивостока

Официальные оппоненты: **Маккавеев Петр Николаевич**, доктор географических наук, заведующий лабораторией биогидрохимии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. Ширшова Российской академии наук, г. Москва

Христофорова Надежда Константиновна, доктор биологических наук, профессор кафедры экологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится 19 октября 2018 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 005.017.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТОИ ДВО РАН и на сайте <http://www.poi.dvo.ru>

Отзывы просим присылать в 2-х экземплярах с заверенной подписью по адресу: 690041 Владивосток, ул. Балтийская 43, ТОИ ДВО РАН, приемная

Автореферат разослан «8» августа 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д005.017.02, к.г.н.



Ф.Ф. Храпченков

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Эстуарные и прибрежные экосистемы являются самыми продуктивными акваториями мирового океана (Costanza, 1997), в которых дефицит кислорода в придонных слоях является естественным результатом жизнедеятельности скоплений фитопланктона в зоне смешения речных и морских вод (Симонов, 1966, 1969; Хлебович, 1974; Лисицин, 1994). Эвтрофикация интенсифицирует “цветение” фитопланктона в верхнем слое водоема и сопровождается формированием гипоксии при разложении биомассы фитопланктона в отсутствии фотосинтетически активной радиации (ФАР) в придонном слое вод (Levin et al., 2009). Увеличение потока биогенных веществ с речным стоком приводит к росту площадей гипоксии в прибрежных акваториях в последние два десятилетия (Diaz and Rosenberg, 2008; Breitburg et al., 2009), особенно во внешних эстуариях – Восточно-китайское море (р. Янцзы; Zhuo-Yi Zhu et al., 2011), залив Святого Лаврентия (р. Св. Лаврентия; Gilbert et al., 2005), Мексиканский залив (р. Миссисипи; Rabalais et al., 2007), Чесапикский залив (р. Сасквеханна, Hagy et al., 2004). Гипоксии подвержены и внутренние районы эстуариев рек, сравнимых по объему речного стока с реками водосбора залива Петра Великого. Примеры таких акваторий с наблюдаемой гипоксией: эстуарии рек Шельда и Эльба в Европе (Geerts et al., 2017); р. Миньцзян в Китае (Zhang et al., 2015); р. Памлико в США (Stanley, Nixon, 1992); р. Юра в Японии (Watanabe et al., 2014).

Реки, впадающие в залив Петра Великого, подвержены значительному антропогенному воздействию. В бассейне трансграничной р. Туманной имеются промышленные стоки железорудной (КНДР, г. Мусан), целлюлозно-бумажной (КНДР, г. Ындок и КНР, г. Шисянь) и текстильной (КНР, г. Кайшаньтунь) промышленности, которые, безусловно, оказывают влияние на химический состав речной воды и на экосистему реки в целом (Changming et al., 1995; Wei et al., 1999; Zhu et al., 1998; Экологическое состояние..., 2000, 2001, 2002). Источником биогенных веществ в р. Туманной являются коммунальные стоки и сельскохозяйственные поля. В настоящее время наблюдается быстрый рост населения, проживающего в бассейне реки. В период 2002 года в бассейне реки проживало 1,5 млн. жителей КНР (Wang et al., 2002), в 2010 – 2,2 млн. человек (White, 2010).

Трансграничная р. Раздольная – вторая по величине после р. Туманной, в водосборе залива Петра Великого, самая протяженная и экономически значимая водная артерия юга Приморья (Никаноров, 2011). Ее бассейн – один из самых крупных сельскохозяйственных районов Приморского края со множеством промышленно-хозяйственных предприятий: угледобывающих, пищевой промышленности, машиностроения, производство строительных материалов. Это район с развитой инфраструктурой, автомобильными и железнодорожными транспортными линиями. Основными источниками биогенных веществ для этой реки на территории РФ являются животноводческие и промышленно-хозяйственные предприятия, места хранения органических и минеральных удобрений, коммунально-бытовые и промышленные сточные воды г. Уссурийска (Никулина, 2006). Наибольший вклад в потоки биогенных веществ вносят сельскохозяйственные поля (Михайлик и др., 2011; Звалинский и др., 2012) как на территории РФ, так и на территории КНР, на которых задействовано в настоящее время около 50% (19 млн. чел.) населения по провинции Хэйлунцзян (Jiang, 2016). В эстуарии р. Раздольной неоднократно фиксировались заморы рыбы.

Малые реки водосбора залива Петра Великого также в разной степени подвержены антропогенному влиянию. В р. Артемовку, например, сбрасываются коммунально-бытовые отходы г. Артема без предварительной очистки (Важова, 2011), которые содержат высокие концентрации биогенных веществ. Данные по эвтрофикации Амурского залива и залива Петра Великого обобщены в работах В. И. Звалинского с коллегами (Звалинский и др., 2012; Звалинский и др., 2013).

Исследования кислородного режима эстуариев залива Петра Великого актуально в связи с тяжелыми последствиями гипоксии для экосистем (Zhang et al., 2010; Тищенко и др., 2016), которые в заливе Петра Великого отличаются большим биоразнообразием (Колпаков и др., 2010). Выявление подверженных гипоксии акваторий, и изучение механизмов её формирования и разрушения открывают путь к рациональному природопользованию и созданию технологий, уменьшающих опасность возникновения “мертвых зон”.

Цель работы – изучение продукционно-деструкционных процессов органического вещества и закономерностей формирования и разрушения гипоксии в

эстуариях залива Петра Великого. Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих **задач**:

- Изучение динамики вод и зависимости положения зоны смешения (ЗС) в эстуариях залива Петра Великого (р. Туманной, р. Раздольной, р. Партизанской, р. Артемовки, р. Шкотовки, р. Амба) от следующих основных факторов: расхода реки, приливов, метеоусловий, покрытия льдом.
- Изучение сезонной и пространственной изменчивости гидрохимических и продукционных характеристик: растворенного кислорода; параметров карбонатной системы; биогенных веществ; органического вещества и его состава; мутности; ФАР; хлорофилла-а).

Исходные материалы. В период с 2011 по 2018 г. в разные гидрологические фазы рек были выполнены сезонные полевые гидролого-гидрохимические исследования в эстуариях рек Туманной (юго-западная часть залива Петра Великого), Раздольной (Амурский залив), Партизанской (залив Находка) Артемовки и Шкотовки (Уссурийский залив), Амба (Амурский залив). При обсуждении результатов использовались также данные сезонных наблюдений в эстуариях рек Гладкой, Тесной, Цукановки (бухта Экспедиции залива Посъета).

В период с 2013 по 2015 год исследована суточная изменчивость гидрометеорологических и продукционных характеристик в эстуариях в различные гидрологические фазы рек.

При обсуждении результатов были использованы данные, полученные в приемных бассейнах залива Петра Великого в период с 2008 по 2015 гг. (рейсы на НИС «Малахит», «Импульс», «Носонов»). Используются гидролого-гидрохимические данные, полученные в заливе Петра Великого (НИС «Луговое», НИС «Профессор Гагаринский», НИС «Академик Лаврентьев»). Рассматриваются данные гидрологических (Т, S, мутность), гидрохимических (O_2) и продукционных характеристик (хлорофилл, ФАР), полученных в заливе Петра Великого и в эстуариях, с автономных буйковых станций, общее кол-во постановок которых, при участии автора за период исследований превысило 60.

Всего в работе были проанализированы результаты 21 рейса на НИС – ах в заливе Петра Великого, 32 сезонных комплексных экспедиций в эстуариях, а также 8

полевых выездов, по изучению внутрисуточной изменчивости гидрологических и продукционных характеристик в эстуариях.

Достоверность и обоснованность результатов. Диссертация основана на большом количестве экспедиционных данных, полученных в основном, коллективом лаборатории гидрохимии ТОИ ДВО РАН. Комплекс гидрохимических характеристик воды, за исключением параметров карбонатной системы, определялся по общепринятым в мировой практике методикам (Современные методы..., 1992), с помощью современного аналитического оборудования, позволяющего обеспечить высокую точность измерений.

Величины параметров карбонатной системы *in situ* рассчитывались из измеренных величин pH (метод с применением ячейки безжидкостного соединения Тищенко П.Я. (2007а)), и общей щелочности воды (методом Бруевича (1944)).

Гидрологические характеристики воды получены с помощью приборов, точность которых гарантирована имеющимися в институте калибровочными сертификатами.

Научные положения и выводы диссертации не противоречат современным представлениям о гидролого-гидрохимической структуре и свойствах воды.

Научная новизна работы:

1. Впервые обнаружена гипоксия во внутреннем и внешнем эстуарии трансграничной р. Туманной. Формирование гипоксии связывается с развитием сельского хозяйства и ростом населения КНР. Впервые обнаружена гипоксия в эстуариях рек Партизанской, Артемовки, Амба, рассматриваются причины этого явления. Изучены закономерности формирования и разрушения гипоксии в эстуарии трансграничной р. Раздольной, основная причина которой связывается с развитием сельского хозяйства и ростом населения КНР и РФ и урбанизацией.

2. Впервые проведено комплексное исследование гидрометеорологических (температуры, солености, динамики вод, ледяного покрова, метеоусловий), гидрохимических (биогенных веществ, кислорода, органического углерода и разных форм неорганического углерода) и гидробиологических (освещенности, хлорофилла *a*) характеристик экосистем эстуариев залива Петра Великого.

3. Оценена скорость формирования гипоксии во внутренних эстуариях в период ледостава и открытого русла, а также скорость формирования гипоксии в приемных бассейнах на примере юго-западной части залива Петра Великого.

4. Показано, что только при определенных гидрологических условиях (величина расхода реки, наличие пикноклина) возникает гипоксия во внутреннем районе эстуариев, приуроченная к плесам.

Защищаемые положения:

1. В эстуариях залива Петра Великого положение биогеохимического барьера, приуроченного к зоне смешения вод, определяется водным режимом рек. Приливы и ветер оказывают влияние на динамику вод внутри зоны смешения.
2. Обнаруженная гипоксия формируется в зоне смешения, во внутренней части эстуариев в придонных водах плесов в период летней межени и сопровождается изменением величины параметров карбонатной системы и биогенных веществ.
3. Формирование гипоксии в эстуариях залива Петра Великого происходит в результате микробиологической деструкции биомассы диатомей и аллохтонного органического вещества в ограничении ФАР, а разрушение гипоксии происходит при смене водного режима рек с межени на паводок и сопровождается формированием гипоксии в приемных бассейнах.

Практическая значимость работы. Полученный комплекс гидрологических, гидрохимических и продукционных характеристик отражает текущее состояние акваторий, которое в дальнейшем может использоваться для оценки долгопериодной изменчивости специалистами разных направлений.

Полученная связь формирования гипоксии с расходом рек с известными концентрациями биогенных веществ и взвеси совместно с установленной скоростью формирования гипоксии дает возможность делать прогнозирование этого явления во внутренних и внешних эстуариях как в акваториях залива Петра Великого, так и за его пределами. Появилась возможность сравнения условий формирования гипоксии в эстуариях залива Петра Великого. Например, в случае реки Раздольной мелководный лиман общей длиной 5 км препятствует обновлению морских вод в эстуарии, поскольку расстояние проникновения морских вод за одну приливную фазу приблизительно в два раза меньше длины лимана, то есть лиманные эстуарии залива Петра Великого гораздо более подвержены гипоксии при одних и тех же скоростях падения концентрации O_2 из-за ослабленного водообмена. Эстуарии трансграничных рек Туманной и Раздольной подвержены гипоксии в большей степени по сравнению, например с эстуарием р. Партизанкой из-за высокой концентрации биогенных

веществ, что приводит к цветению фитопланктона, а также большей величины БПК₅, и большей концентрации взвеси, которая снижает ФАР придонных вод. При снижении концентрации взвеси и величины БПК₅ в водах реки Туманной до уровня, который существует например в Партизанской, возможно скорости обмена морскими водами в эстуарии хватило бы для нормального кислородного режима, поскольку в русловом эстуарии Туманной следует ожидать подобной интенсивности потока морских вод в направлении реки как в эст. р. Партизанской при одних и тех же колебаниях уровня. По-видимому, наиболее действенные способы для снижения количества акваторий подверженных гипоксии – увеличения прозрачности воды, чего можно добиться укреплением берегов рек, строительством дамб на пути речного потока, установкой искусственных рифов в эстуариях, увеличивающих количество биофильтраторов в зоне смешения.

Публикации и апробация работы. Основные результаты исследований, обобщенные в диссертации, представлены и обсуждены на конференциях регионального и международного уровня: конференции молодых ученых Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН «Океанологические исследования» (Владивосток, 2011, 2013, 2016), конференции молодых ученых «Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего востока России» (Владивосток, 2012); ежегодных конференциях «Океанографические условия залива Петра Великого» (2012, 2013 гг. Владивосток, ДВНИГМИ); конференции «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах (Барнаул, 2017). На международных конференциях PICES (Хабаровск, Россия, 2011; Владивосток, Россия, 2017) и ECSA 53 (Шанхай, Китай, 2013). Результаты исследований отражены в 10 статьях, опубликованных в журналах, включенных в базу данных WOS, Scopus и в 8 статьях, опубликованных в сборниках из перечня ВАК.

Личный вклад. Полевые работы и морские экспедиции, проводимые с 2010 по 2018 гг. проходили при непосредственном участии автора в составе химического, гидрологического, биологического отрядов. В нескольких рейсах был начальником, или заместителем начальника экспедиции.

Участвовал в отборе проб воды на различные виды анализов. Проводил измерения O_2 , pH, общей щелочности, биогенных веществ, рассчитывал параметры карбонатной системы.

В морских экспедициях участвовал в настройке и обслуживании пробоотборных систем SBE, гидрологических зондов разных производителей.

В ходе исследований программировал и обслуживал измерительную технику: зонды SBE 19 PLUS, RBR 620-XXR, YSI, RINKO PROFILER; измерители течений INFINITY, S4; измерительные системы WQM, CTD- измерители SBE 37, STD-LATE; оптические измерители кислорода ARO USB.

Анализ литературных данных, обработка первичного материала, все расчеты, интерпретация полученного фактического материала и обобщения сделаны лично автором. Результаты, представленные в диссертации, получены лично автором, либо на равных правах с соавторами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Содержание работы изложено на 140 страницах, включая список литературы из 195 наименований, 39 иллюстраций, 11 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.х.н. Тищенко П.Я. Диссертант признателен за ценные консультации, обсуждение, поддержку и конструктивную критику при планировании экспедиций и написании работы к.г.н. Лобанову В.Б., Сергееву А.Ф., к.х.н. Недашковскому А.П., д.г.н. Андрееву А.Г., к.х.н. Павловой Г.Ю. Автор выражает признательность Колтунову А.М., Горину И.И., Воронину А.А., Баннову В.А., за помощь в подготовке и обслуживании измерительной техники, а также за участие в постановках и подъемах АБС. За помощь в ходе полевых работ автор благодарен Михайлик Т.А, Сагалаеву С.Г., к.г.н. Тищенко П.П. к.х.н. Чижовой Т.Л., Косьяненко А.А., Юрцеву А.Ю., Степановой В.И., Шамбаровоу Ю.В. За участие в гидрохимическом анализе проб воды Волковой Т. И., Звалинскому В.И., Чичкину Р.В., Швецовоу М.Г., Шкирниковоу Е.М. Также автор выражает благодарность рецензентам редакции журнала «Водные ресурсы».

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и основные задачи исследований, раскрыта научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** подробно рассмотрен район исследований, дана общая характеристика водосбора залива Петра Великого, показаны региональные особенности гидрологического и гидрохимического режима рек водосбора залива Петра Великого и приемных бассейнов.

В **Главе 2** приведено описание используемых в работе материалов и методов исследования. В основу диссертации положены результаты гидролого-гидрохимических сезонных исследований (**раздел 2.1**) проводимых в период с 2011 по 2018 гг., в ходе которых отбирались пробы воды с поверхностного и придонного горизонтов на станциях, положение которых определялось дальностью проникновения морских вод в эстуарий, структурой зоны смешения, и распространения речных вод в море. Необходимым условием было, чтобы конечные станции на профиле вдоль максимальных глубин эстуария отражали характеристики речных и морских вод без смешения, при этом общее количество станций в том или ином эстуарии в конкретную гидрологическую фазу рек было от 7 до 19. Поскольку гипоксия природных вод во многих случаях является индикатором нарушения устойчивости экосистемы для понимания механизма формирования гипоксии, необходимо исследование многих характеристик. В диссертации рассмотрены в комплексе такие характеристики экосистемы, как гидролого-гидрофизические (температура, соленость, динамика вод), гидрохимические (биогенные вещества, кислород, органический углерод и разные формы неорганического углерода), гидробиологические (освещенность, хлорофилл а и фитопланктон, бактериопланктон). Приводятся методики изучения всех этих характеристик, за исключением, концентраций и видового состава фитопланктона и бактерий, которые изучались по литературным данным. Суточные исследования (**раздел 2.2**) были проведены в период зимней и летней межени в эстуариях рек Раздольной, Партизанской, Артемовки и Шкотовки. Эти работы включали следующий комплекс измерений: наблюдения за уровнем воды в разных точках эстуария, а также в

приемных бассейнах и в открытой части залива Петра Великого; внутрисуточные измерения течений; CTD – зондирование вдоль зоны смешения через каждые три часа в течение суток; наблюдения за метеоусловиями и волнением.

В **Главе 3** устанавливаются основные факторы, влияющие на динамику зоны смешения и структуру вод в эстуариях, как условий формирования гипоксии. На основании доступных данных о величине расходов рек и результатов собственных гидрологических исследований показано, что решающим фактором проникновения зоны смешения в эстуарии залива Петра Великого является объем речного стока и характеристика устьевое участка реки. Наибольшая дальность проникновения зоны смешения от устьевого бара в направлении реки выделяемая по положению изогалины 1‰, установлена для эстуария реки Раздольной с проникновением на расстояние 28 км в период зимней межени (рис. 1), и 22 км в летней (табл. 1).

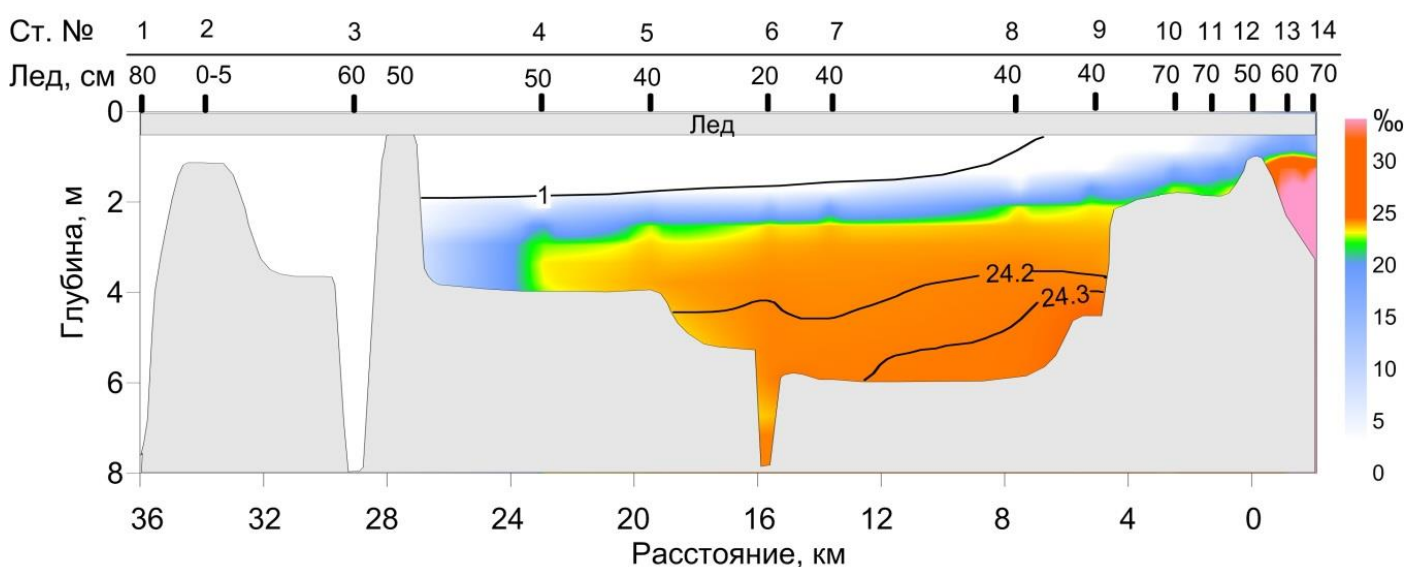


Рисунок 1 – Распределение солёности в эстуарии реки Раздольной в период зимней межени по данным зондирования 24.02.2018 г при расходе реки 5 м³/с. Слева – река, справа – море, отсчет расстояния от устьевого бара.

Аналогично, в других изученных эстуариях залива Петра Великого в зимнюю межень и в межень периода открытой воды дальность проникновения зоны смешения в эстуарий наибольшая, в течение года на пике половодья или паводков зона смешения вытесняется из эстуария в приемные бассейны (табл. 1).

Таблица 1. – Расходы воды и дальность проникновения зоны смешения (выделяемая по положению изогалины 1‰) от устьевого бара реки в эстуариях залива Петра Великого

Река	Период исследований	Расход реки, м ³ /с	Расстояние от устьевого бара до речной границы зоны смешения, км
Туманная	15.02.2017	11	7,5
	22.10.2015	130	2,5
Раздольная	24.02.2018 (ледостав)	6	28
	16–17.08.2011	22,7	22
	25–30.05.2011	393,0–222,0	0
Партизанская	28.02.2016 (ледостав)	7,77	12,5
	8–19.02.2014 (ледостав)	11,9	10,5
	18–19.07.2012	20,11	11
	15–16.09.2015	30	9,5
	18–19.05.2012	73,67–65,9	5
	Расчетный	110	0
Артемовка	01.03.2011 (ледостав)	0,66	8
	18.07.2011	6,33	4,5
	04.05.2011	11,9	2
Шкотовка	10.03.2014 (ледостав)	0,75	1,7
	03.05.2011	6	1,7
	19.07.2011	5,24	1,7
Амба	17.01.2012 (ледостав)	0,28	5
	24.07.2012	6,03	2,2
	20.09.2012	25,9	0

Результаты измерений течений и выполнение суточных станций в зоне смешения вод позволили установить, что приливы и сгонно-нагонные ветры оказывают влияние на изменчивость солености внутри зоны смешения, при этом суточная изменчивость дальности проникновения зоны смешения в эстуариях залива Петра Великого не наблюдается. Скорость течения речных вод в поверхностном слое эстуариев существенно зависит от фазы прилива. С повышением расхода реки и развитием сгонного ветра скорость прямого течения может превышать 70 см/с, даже при небольших расходах реки в межень, при этом в приливную фазу и в полные воды в поверхностном слое формируется обратное течение. Для примера показана временная развертка уровня и течений в эстуарии р. Партизанской (рис. 2). В придонном слое вод, как правило, наблюдается устойчивое обратное течение, которое формируется в результате вовлечения морских вод речными водами во

внутренней части эстуариев. Однако, влияние этого течения (на примере эстуариев рек Партизанской и Раздольной) прослеживается на расстояние не более 3 и 9 км от устьевого бара реки соответственно при существенно большей дальности проникновения зоны смешения вод (табл. 1).

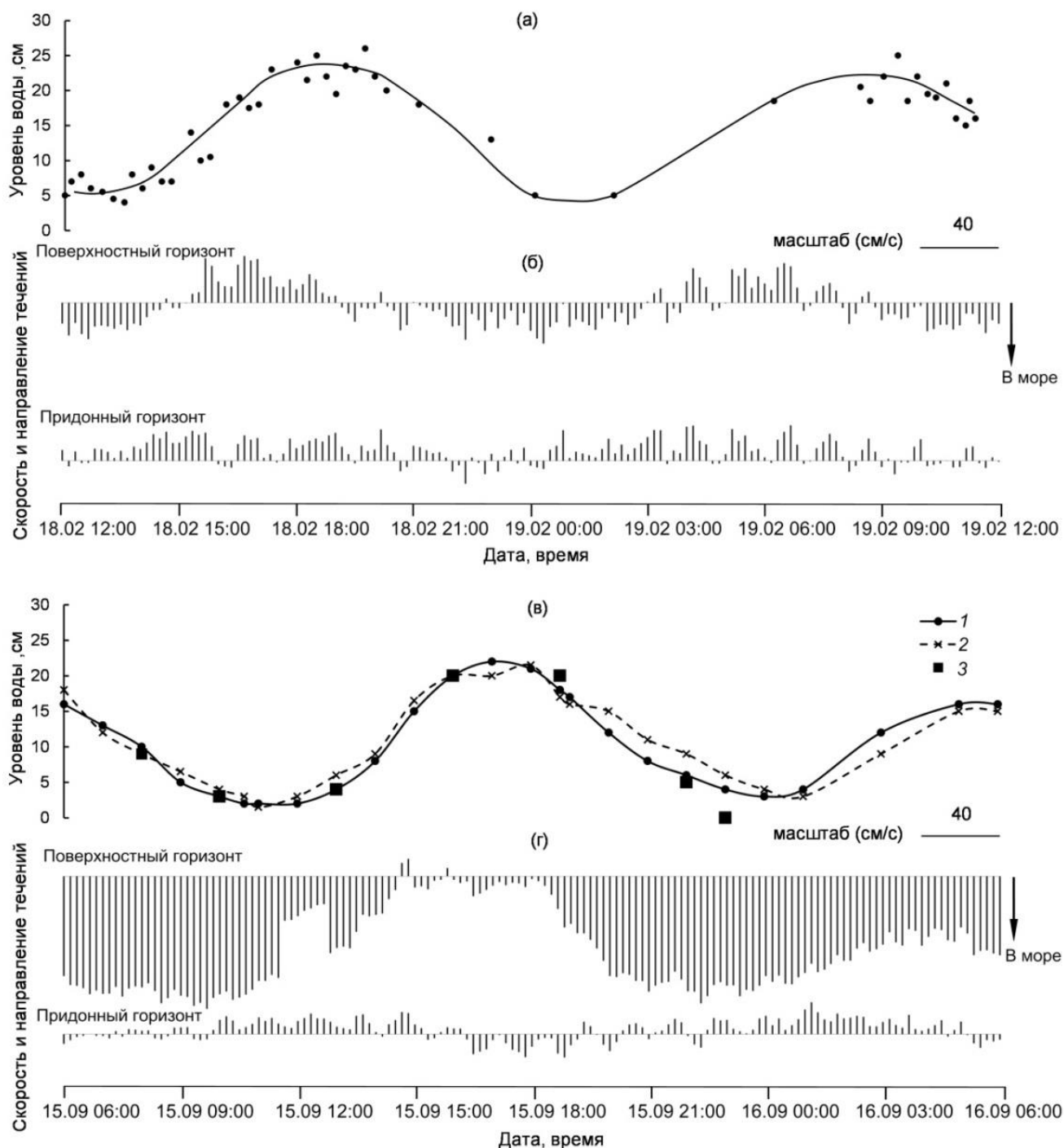


Рисунок 2 – Уровень, скорость и направление течений по данным АБС в эстуарии р. Партизанской (в координатах: $42^{\circ} 50,151' \text{с.ш.}$ $132^{\circ} 59,857' \text{в.д.}$) в феврале 2014 г (а, б) и в сентябре 2015 г. (в, г). 1, 2, 3 – изменчивость уровня воды в створах, удаленных на 1,8, 3,3 и 11,1 км от устьевого бара реки

На основании проведенных исследований согласно современной классификации (Михайлов, Горин, 2012) эстуарии рек Туманной, Партизанской и Амба относятся к русловому типу с приглубым устьевым взморьем с двухслойной циркуляцией и сильной стратификацией вод. Эстуарии рек Раздольной, Артемовки и Шкотовки относятся к лиманным эстуариям с двухслойной циркуляцией и сильной стратификацией вод. Максимальный градиент солености, достигающий 30‰ на 0,5 м установлен в русловых эстуариях. Такой тип гидрологической структуры предполагает, что обмен придонных (морских) вод между эстуарием и морем существенно меньше водообмена верхнего слоя вод (Долгополова, Исупова, 2010).

Данные гидрологического зондирования позволили приблизительно оценить объем пресной воды в эстуариях залива Петра Великого. По этим данным и величинам речного стока по известному соотношению было оценено время необходимое для полной замены пресных вод в зоне смешения:

$T_f = V / Q$, где T_f – время “жизни” пресных вод в эстуарии, V – объем пресных вод, Q – расход реки (Priya et al., 2012). Величина T_f для речных вод в зависимости от величины речного стока в эстуариях наиболее крупных рек залива Петра Великого Туманной, Раздольной, Партизанской составит приблизительно от 4 часов до 4 – 5 суток, в эстуариях малых рек этот период как минимум вдвое меньше. Морские воды в эстуариях залива Петра Великого, заполняя депрессии рельефа, находятся в условиях стагнации, высокая плотностная устойчивость слоев препятствует их перемешиванию, то есть время “жизни” морских вод в придонном слое гораздо большее в сравнении с речными водами, что способствует накоплению органической взвеси в депрессиях рельефа в зоне смешения. Плотностная граница, сформированная при взаимодействии речных и морских вод рассматривается как жидкое дно для клеток фитопланктона.

В **главе 4** показаны районы формирования гипоксии во внутренних частях эстуариев, а также во внешней эстуарии реки Туманной – юго-западной части залива Петра Великого. Обсуждаются изменчивость параметров карбонатной системы, концентрации биогенных веществ, компонентов растворенного органического вещества и продукционных характеристик в условиях гипоксии, пути микробиальной деструкции органического вещества. Причиной формирования придонной гипоксии в

эстуариях в межень периода открытой воды является поглощение кислорода в результате деструкции органического вещества автохтонного происхождения. Основанием для такого вывода служит наблюдаемый высокий уровень содержания хлорофилла *a* в эстуариях: до 50 мкг/л р. Туманной, до 100 мкг/л р. Раздольной, до 40 мкг/л р. Партизанской, до 200 мкг/л р. Артемовки. Общей тенденцией, в распределении хлорофилла *a* в эстуариях исследованных рек является повышение концентрации в зоне смешения (рис. 3а). Аномально высокие концентрации хлорофилла *a* указывают на интенсивное "цветение" фитопланктона в эстуариях, которое обусловлено двуслойной гидрологической структурой вод, характерной для микроприливных эстуариев, и потоком биогенных веществ от локальных источников (городов и поселков Китая и РФ). В целом, наиболее интенсивное цветение наблюдается в эвтрофированных эстуариях трансграничных рек Туманной и Раздольной, а также в эстуарии р. Артемовки, в котором было зафиксировано феноменальное падение $p\text{CO}_2$ до 25 мкатм (рН 9) летом 2011 г. Продуцируемая в верхнем слое биомасса фитопланктона осаждается на дно, где происходит ее микробиологическая деструкция, на что указывает неконсервативная зависимость концентрации силикатов от солености в местах гипоксии (рис. 3б). Разложение биомассы фитопланктона в условиях низкого водообмена приводит к наблюдаемым проявлениям неконсервативного поведения параметров карбонатной системы, РОУ и биогенных веществ. Понижение концентрации кислорода у дна сопровождается увеличением содержаний аммония, силикатов, фосфатов, общей щелочности и $p\text{CO}_2$. Результаты измерения глубины видимости диска Секки (0,25–1 м) указывают на то, что глубина фотического слоя составляет не более 3 м, т.е. придонные воды эстуариев находятся за пределами фотического слоя, поэтому приток кислорода за счет продукции органического вещества в придонном слое невозможен.

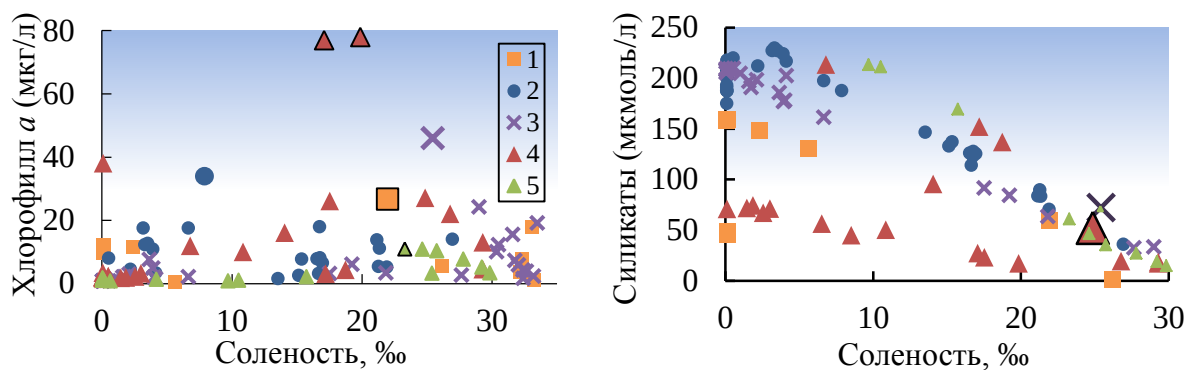


Рисунок 3 – Изменчивость концентрации хлорофилла *a* (а) и силикатов (б) от солености в эстуариях рек Туманной – 1, Раздольной – 2, Партизанской – 3, Артемовки – 4, Амба – 5.

В **главе 5** обсуждаются причины эвтрофикации и общие черты формирования гипоксии во внутренних эстуариях залива Петра Великого и во внешней эстуарии реки Туманной – юго-западном районе залива Петра Великого, где располагается Дальневосточный морской биосферный заповедник. На основании подхода применённого в работе (Михайлик др., 2011) были рассчитаны среднегодовые потоки биогенных веществ в эстуарии рек Туманной, Партизанской, Артемовки, Шкотовки, Кневичанки и Амба для 2013 г., которые в целом определяются величиной речного стока (рис 4). Концентрации биогенных веществ в эвтрофированных реках (Туманная, Раздольная Артемовка) приблизительно равны и превосходят концентрации в олиготрофных реках Партизанская, Шкотовка, Амба. Суммарный расход рек Артемовки, Шкотовки и Кневичанки в период паводка значительно превосходит расход р. Партизанской, но среднегодовой расход значительно меньший. Максимальный поток растворенного неорганического фосфора (FDIP) в сумме для рек Артемовки Шкотовки и Кневичанки выше, чем в реке Партизанкой приблизительно 9 раз, что связано с необычайно высокими концентрациями фосфатов в реке Кневичанке. Потоки азота (FDIN) с водами р. Партизанской превосходят суммарные потоки рек Артемовки Шкотовки и Кневичанки в два раза, а потоки силикатов (FDisi) сопоставимы. В данной оценке не учитывается поток биогенных веществ в Уссурийский залив реками Суходол и Петровка, который в паводок ориентировочно будет составлять половину потока р. Шкотовки.

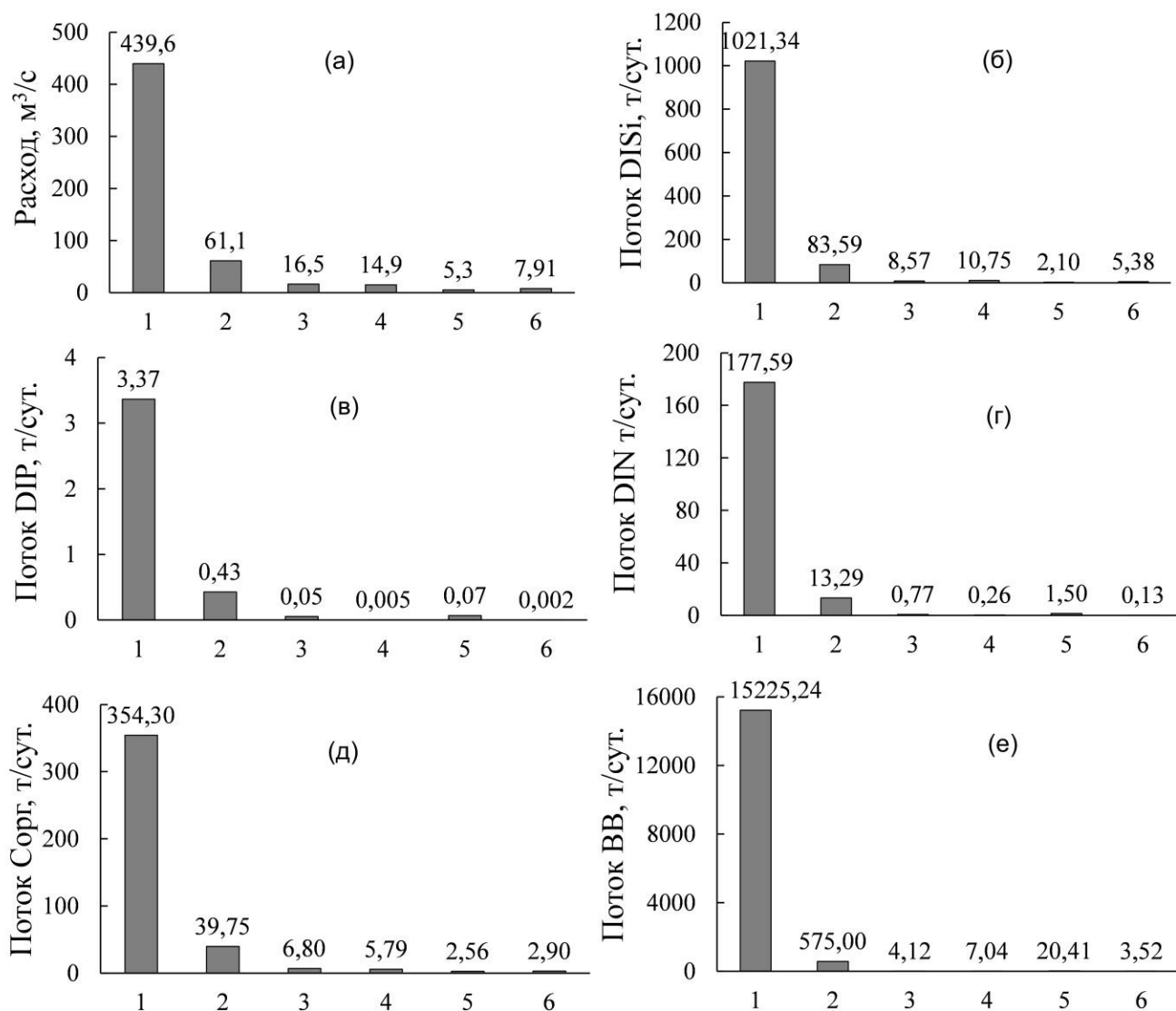


Рисунок 4 – Среднегодовой расход (а), поток биогенных веществ (б,в,г), органического углерода (д) и взвеси (е) в эстуарии залива Петра Великого в 2013 г. По оси абсцисс: 1 – р. Туманная; 2 – р. Раздольная в 2008 г. (Михайлик и др. 2011); 3 – р. Артемовка; 4 – р. Шкотовка; 5 – р. Кневичанка; 6 – р. Амба.

В целом величина годовых потоков биогенных веществ в эстуарии залива Петра Великого убывает при обходе с запада на восток (рис. 5), что обусловлено, во-первых, величиной речного стока, а во вторых антропогенной нагрузкой на водосборы.

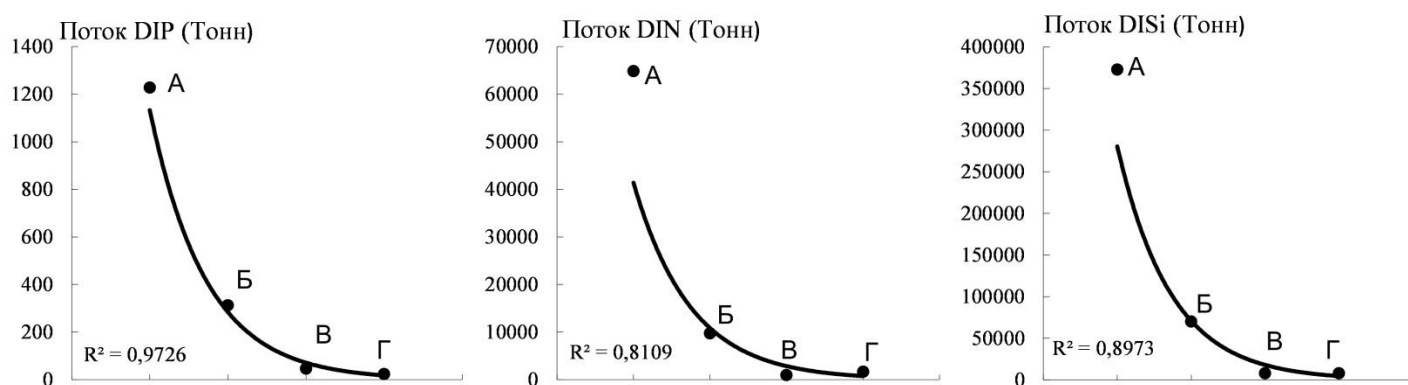


Рисунок 5 – Суммарные годовые потоки биогенных веществ с речным стоком в эстуарии в 2013 г. По оси абсцисс названия рек: А – Туманная; Б – Раздольная в 2008 г. (Михайлик и др., 2011); В – Артемовка + Кневичанка + Шкотовка; Г – Партизанская

Трансграничная река Туманная, водосбор которой в основном находится в КНР в провинции Цзилинь, на территории стремительного развития промышленности (Sun, Wang, 2013) и сельского хозяйства (Adekola, Akinyemi, 2014), имеет высокий уровень трофности, судя по данным концентрации биогенных веществ и хлорофиллу, приведенных в диссертации. Негативные последствия роста трофности реки в настоящее время прослеживаются на экосистеме приемного бассейна – юго-западном районе залива Петра Великого, где начиная с 2013 года, в районе Дальневосточного морского заповедника наблюдается сезонная гипоксия и аноксия, а также случаи замора бентоса (рис. 6).



Рисунок 6 – Изображение массовой гибели бентосных организмов вблизи о. Фуругельма, полученное с помощью подводного аппарата «SubFighter-3000» 12 августа 2013 г. сотрудниками ИБМ ДВО РАН

Воды р. Раздольной в период межени имеют высокие концентрации суммарного азота и фосфора сразу после пересечения ею границы КНР – РФ, с последующим

заметным добавлением биогенных веществ в районе г. Уссурийск (Михайлик и др., 2011). Не исключено, что, несмотря на совместную Российско-Китайскую программу по улучшению экологических условий трансграничных водных объектов (Соглашение..., 1994; Россия и Китай..., 2006) и совместный мониторинг р. Раздольной с участием ПРИМГИДРОМЕТ со стороны РФ и Управления по охране окружающей среды со стороны КНР, по мере роста промышленности и сельского хозяйства в провинции Хэйлунцзян (район водосбора реки Раздольной), трофический уровень этой реки будет возрастать, а последствия для экосистемы эстуария ухудшаться.

Сценарий формирования/разрушения гипоксии во внутренних эстуариях залива Петра Великого. В летне-осенний период в условиях межени теплые морские воды заполняют придонный слой воды эстуариев, образуя с менее теплыми речными водами пикноклин. Существенным моментом при этом является то обстоятельство, что этот пикноклин, как правило, формируется по “диффузному типу”, когда нижележащий слой является более теплым и с большей соленостью, в сравнении с вышележащим слоем. Такая граница раздела рассматривается как “жидкое дно”, над которым находится слой распресненных вод, обогащенных биогенными веществами от локальных источников, что обеспечивает благоприятные условия для “цветения” фитопланктона. Созданная в верхнем слое биомасса фитопланктона (в основном, диатомовые водоросли) осаждается на дно, где происходит ее микробиологическая деструкция и формируется гипоксия. Гипоксия наблюдается в углублениях рельефа (рис 7) с затрудненным водообменом в результате чего в них происходит накопление органического вещества. Резкое понижение концентрации кислорода у дна сопровождается аномальным увеличением содержания аммония, силикатов, фосфатов и pCO_2 и понижением pH. В период весеннего половодья или дождевых паводков происходит вытеснение зоны смешения из эстуариев в приемные бассейны, при этом речные воды в эстуариях вытесняют воды с наблюдаемой гипоксией. Ситуация с вытеснением ЗС за пределы устьевых баров в эстуариях залива Петра Великого встречается ежегодно и возможна в любое время с мая по октябрь. Продолжается это явление в эстуариях малых рек (Амба, Артемовки, Шкотовки) в течение нескольких суток, пока не пройдет пик половодья или паводка, а в эстуариях более крупных рек (Партизанской, Раздольной, Туманной) период этого явления может составлять более 2 недель. При этом область

биологического барьера маргинального фильтра формируется в приемных бассейнах (юго-западная часть залива Петра Великого, Амурский, Уссурийский заливы, залив Находка). Таким образом, аномалии гидрохимических характеристик и гипоксия во внутренней части эстуариев представляют собой явление, приуроченное к межени реки. Гипоксия в эстуариях в период ледостава является частным случаем, и обусловлена в основном микробиальной деструкцией органического вещества в условиях лимитации ФАР из-за льда, покрытого снегом, который препятствует проникновению солнечного света. Дополнительным фактором формирования гипоксии зимой служит снижение водообмена в эстуариях вследствие малого речного стока и образования льда практически до дна в районах мелководий.

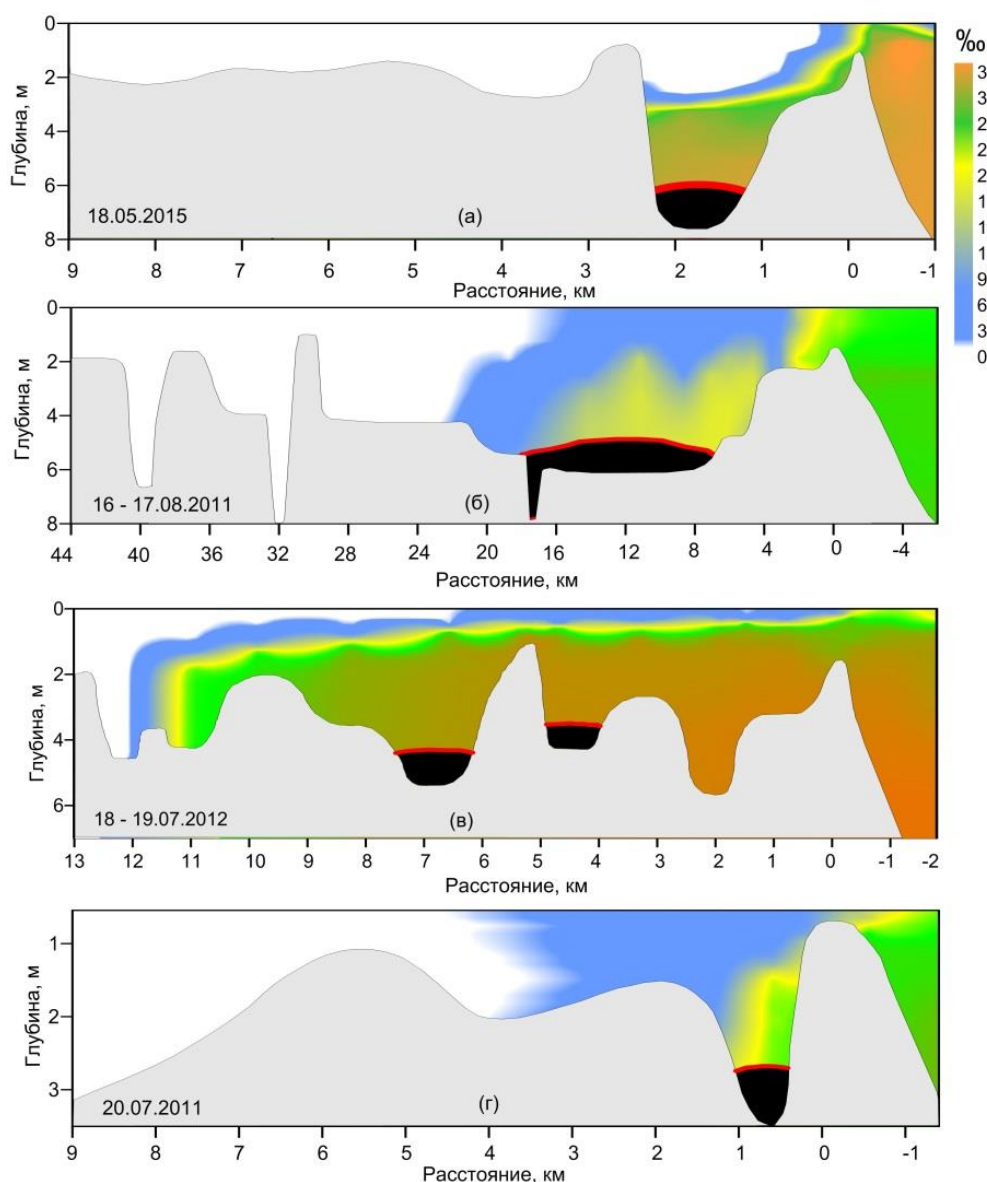


Рисунок 7 – Схематичное изображение районов с гипоксией (черный цвет) в зонах смешения эстуариев рек Туманной (а), Раздольной (б), Партизанской (в), Артемовки (г). Распределение солёности (‰) представлено по результатам CTD-зондирования. Расстояния отсчитывается от устьевых баров рек

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Обозначены районы гипоксии во внутренних эстуариях трансграничных рек Туманной и Раздольной. Формирование гипоксии связано с увеличением потока биогенных веществ, вызывающих рост трофического уровня в зоне смешения речных и морских вод и с увеличением потока легко окисляемого органического вещества с коммунальным стоком в результате роста населения КНР.

2. Открыт район гипоксии в после паводковый период в акватории юго-западного района Дальневосточного биосферного заповедника, который расположен во внешнем эстуарии р. Туманной. Формирование гипоксии связано с ростом трофического уровня из-за повышения потока биогенных веществ, со стоком с сельскохозяйственных полей КНР.

3. Обозначены районы формирования гипоксии в эстуариях рек Партизанской, Артемовки, Амба.

4. Гипоксия – результат микробиального окисления биомассы диатомей в придонном слое эстуариев в условиях ограничения ФАР.

5. Гипоксия, а также дефицит кислорода в эстуариях, сопровождается аномалией параметров карбонатной системы и биогенных веществ по сравнению с водами залива Петра Великого.

6. Гипоксия является проявлением функции биологического барьера «река-море» для биогенных веществ, положение которого определяется расходом рек. В межень биологический барьер расположен во внутренних частях эстуариев, в паводок – в приемных бассейнах.

7. Гипоксия в эстуариях формируется в углублениях рельефа, которые способствуют застойности воды и накоплению органической взвеси.

8. В период ледостава, в эстуариях, дальность проникновения зоны смешения наибольшая, а мутность вод минимальная, что создает благоприятные условия для “цветения” диатомовых водорослей. В этих условиях гипоксия формируется при наличии снежного покрова на льду, ограничивающего проникновение ФАР.

9. Разрушение гипоксии в эстуариях связано со сменой гидрологической фазы рек с межени на паводок.

Основные публикации по теме диссертации:

Статьи, опубликованные в научных изданиях из перечня ВАК

1. **Семкин П.Ю.**, Тищенко П.Я., Ходоренко Н.Д. и др. Продукционно-деструкционные процессы в эстуариях рек Артемовка и Шкотовка (Уссурийский залив) в летний сезон // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 3. С. 311–321.
2. Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., **Семкин П.Ю.** и др. Гидрохимический режим эстуария реки Партизанской // Вод. Ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 396–405.
3. Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Звалинский В.И., **Семкин П.Ю.** Скорость биохимического потребления кислорода при формировании гипоксии в Амурском заливе (Японское море) // ДАН. 2014. Т. 459. № 6. С. 750.
4. Тищенко П.Я., **Семкин П.Ю.**, Тищенко П. П. и др. Гипоксия придонных вод эстуария реки Раздольная // ДАН. 2017. Т. 476. № 5. С. 576–580
5. Стунжас П.А., Тищенко П.Я., Ивин В.В., Барабанщиков Ю.А., Волкова Т.И., Вышкварцев Д.И., Звалинский В.И., Михайлик Т.А., **Семкин П.Ю.**, Тищенко П.П., Ходоренко Н.Д., Швецова М.Г., Головченко Ф.М. Первый случай аноксии в водах Дальневосточного морского заповедника // ДАН. 2016. Т. 467. № 2. С. 218–221.
6. Тищенко П. П., Звалинский В. И., Тищенко П.Я., **Семкин П.Ю.** Первичная продукция Амурского залива (Японское море) в летний сезон 2008 г. // Биология моря. 2017. Т. 43. № 3. С. 195–202.
7. Тищенко П.Я., **Семкин П.Ю.**, Павлова Г.Ю. и др. Гидрохимия эстуария реки Туманной (Японское море) // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 192–204.
8. **Семкин П.Ю.**, Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др. Структура и динамика вод в эст. реки Партизанской (Японское море)// Вод. ресурсы. 2018. В печати.
9. **Семкин П.Ю.**, Тищенко П.Я., Тищенко П.П. и др. Особенности гидрохимии эстуариев рек Артемовка и Шкотовка (Уссурийский залив, Японское море) летом 2011 г. // Изв. ТИНРО. 2012. Т. 171. С. 267–284.
10. **Семкин 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.
11. Барабанщиков Ю.А., Тищенко П.Я., **Семкин П.Ю.** и др. Сезонные гидролого-гидрохимические исследования бухты Воевода (Амурский залив, Японское море) // Известия ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 161–178.

12. Калитина Е.Г., Михайлик Т.А., Семкин П.Ю. и др. Особенности микробиологического состава вод реки Раздольной (Южное Приморье) // Известия ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 187–197.
13. Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Семкин П.Ю., Звалинский В.И. Роль даунвеллинга/апвеллинга в формировании/разрушении гипоксии придонных вод Амурского залива (Японское море) // Известия ТИНРО. 2015 Т. 183. С. 156–165.
14. Вах Е.А. Павлова Г.Ю., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю. Основной солевой состав и редкоземельные элементы как индикаторы экологического состояния рек южного Приморья // Изв. Известия ТПУ. 2017. Т. 328. № 1. С. 39–49.
15. Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., Михайлик Т.А., Семкин П.Ю. Гидрохимический режим эстуария реки Раздольной // Вода: химия и экология. 2014. № 12 (78). С. 16–25.
16. Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Михайлик Т.А., и др. Гидрохимические исследования эстуария р. Партизанской в период летней межени // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 193. С. 143–152.
17. Shulkin Vladimir, Tishchenko Pavel, **Semkin Pavel**, Shvetsova Maria. Influence of river discharge and phytoplankton on the distribution of nutrients and trace metals in Razdolnaya River estuary, Russia. Estuarine, Coastal and Shelf Science (2017) 1–11.
18. Petr Tishchenko , Pavel Tishchenko , Vyacheslav Lobanov , Alexander Sergeev, **Pavel Semkin**, Vladimir Zvalinsky. Summertime in situ monitoring of oxygen depletion in Amursky Bay (Japan/East Sea) // Continental Shelf Research 118 (2016) 77–87.

Подписано к печати 06.06.2018 г.
Формат 60х90/16. Усл. п. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,3.
Тираж 100 экз. Заказ

ФГУП «Издательство Дальнаука»
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7
Тел. 231-21-05. E-mail: dalnauka@mail.ru
<http://www.dalnauka.ru>

Отпечатано
ООО «Сервис Плюс»
г. Владивосток, ул. Алеутская, 45А