

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**ТИХООКЕАНСКИЙ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**  
им. В. И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Семкин Павел Юрьевич  
Гипоксия эстуариев залива Петра Великого  
Специальность 25.00.28 – Океанология

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Научный руководитель  
доктор химических наук  
П.Я. Тищенко

Владивосток  
2018

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ .....	2
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ, ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА .....	13
1.1. Климат.....	18
1.2. Общая характеристика водосбора залива Петра Великого .....	20
1.3. Гидролого-гидрохимический режим залива Петра Великого.....	25
1.4. Гидрологический режим рек и приемных бассейнов .....	33
1.4.1. Река Туманная и юго-западная часть залива Петра Великого .....	33
1.4.2. Реки Раздольная, Амба и Амурский залив .....	35
1.4.3. Реки Артемовка, Шкотовка и Уссурийский залив .....	38
1.4.4. река Партизанская и залив Находка .....	40
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	43
2.1. Гидрохимические исследования .....	43
2.2. Суточные гидрометеорологические исследования .....	46
ГЛАВА 3. ДИНАМИКА ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ И СТРУКТУРА ВОД В ЭСТУАРИЯХ.....	49
3.1. Эстуарий р. Туманной .....	49
3.2. Эстуарий р. Раздольной.....	53
3.3. Эстуарий р. Партизанской .....	56
3.4. Эстуарий р. Артемовки .....	60
3.5. Эстуарий р. Шкотовки.....	62
3.6. Эстуарий р. Амба .....	64
3.7. Суточная динамика зоны смешения на примере лиманного эстуария р. Раздольной и руслового эстуария р. Партизанской .....	67
3.7.1. Приливы и циркуляция вод в эстуарии р. Раздольной.....	67
3.7.2. Внутрисуточная изменчивость солености в эстуарии р. Раздольной.....	71
3.7.3. Приливы и циркуляция вод в эстуарии реки Партизанской.....	73
3.7.4. Суточная динамика зоны смешения в эстуарии реки Партизанской .....	75
3.8. Заключение .....	79
ГЛАВА 4. ГИПОКСИЯ ЭСТУАРИЕВ .....	80
4.1. Эстуарий р. Туманной .....	80
4.2. Эстуарий р. Раздольной.....	92
4.3. Эстуарий р. Партизанской .....	99
4.4. Эстуарии рек Артемовки, Шкотовки и Амба .....	107

ГЛАВА 5. ЭВТРОФИКАЦИЯ ЭСТУАРИЕВ И ОБЩИЕ ЧЕРТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГИПОКСИИ ЭСТУАРИЕВ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО .....	118
ВЫВОДЫ.....	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	128

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- ЗС – зона смешения речных и морских вод;
- УБ – устьевой бар реки;
- ВЭ – вершина эстуария;
- ЗПВ – залив Петра Великого;
- АБС – автономная буйковая станция;
- ОВ – органическое вещество;
- ПП – первичная продукция;
- РОУ – растворенный органический углерод;
- ГВ – гуминовые вещества;
- НГВ – не гуминовые вещества;
- ФАР – фотосинтетически активная радиация;
- ЮРЗ – южный район заповедника;
- S – обозначение солености воды, ‰ (промилле);
- O<sub>2</sub> – растворенный в воде кислород;
- NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – обозначение концентрации растворенного нитритного азота (N);
- NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – обозначение концентрации растворенного нитратного N;
- NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – обозначение концентрации растворенного аммонийного N;
- Si – обозначение концентрации растворенного неорганического кремния (Si);
- DIN – обозначение общей концентрации растворенных неорганических форм N;
- DIP – обозначение общей концентрации растворенных неорганических форм фосфора (P);
- FDIN – обозначение потока растворенного неорганического N;
- FDIP – обозначение потока растворенного неорганического P;
- FDISi – обозначение потока растворенного неорганического Si;
- DIC – обозначение концентрации общего неорганического углерода;
- TA – обозначение величины общей щелочности;
- pCO<sub>2</sub> – обозначение величины парциального давления углекислого газа в воде.

## ВВЕДЕНИЕ

### 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, Nagy et al., 2004). Гипоксии подвержены и внутренние районы эстуариев рек, сравнимых по объему речного стока с реками водосбора залива Петра Великого (ЗПВ). 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 ЗПВ, 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 ЗПВ, 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 провинции Хэйлуцзян (Jiang, 2016). В эстуарии р. Раздольной неоднократно фиксировались заморы рыбы.

Малые реки водосбора ЗПВ 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 ЗПВ обобщены в работах В. И. Звалинского с коллегами (Звалинский и др., 2012; Звалинский и др., 2013).

Исследования кислородного режима эстуариев ЗПВ актуально в связи с тяжелыми последствиями гипоксии для экосистем (Zhang et al., 2010; Тищенко и др., 2016), которые в ЗПВ 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:**

Изучение продукционно-деструкционных процессов органического вещества и закономерностей формирования и разрушения гипоксии в эстуариях залива Петра Великого.

### **Основные задачи работы:**

- 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).

### **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 а) характеристик экосистем эстуариев ЗПВ.

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 ЗПВ.

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

### **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 ЗПВ), 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 Посьета).

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<sub>2</sub>) 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 ЗПВ, 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.

### **Практическая значимость**

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 ЗПВ. 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 ЗПВ 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 БПК<sub>5</sub>, и большей концентрации взвеси, которая снижает ФАР придонных вод. При снижении концентрации взвеси и величины БПК<sub>5</sub> 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.

#### **Основные 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.

### **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<sub>2</sub>, 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-XX, 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.

## **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., Недашковскому А.П., Андрееву А.Г. 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., Павловой Г.Ю., Чичкину Р.В., Швецовоу М.Г., Шкирниковоу Е.М. Также автор выражает благодарность рецензентам редакции журнала «Водные ресурсы».

## **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.

## **ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ, ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА**

Гидрологические наблюдения в ЗПВ производятся с 1860 г. Вначале это были ледовые наблюдения, а с первой четверти XX века на морской станции Владивосток, выполнялись регулярные наблюдения за колебаниями, температурой и соленостью морской воды. Сведения по гидрологии ЗПВ в работах Баталина А.М (1958), Леонова А. К. (1960), Бирюлина Г.М. и др. (1970), охватывают в основном теплую половину года. Впервые сезонная изменчивость гидрологического и гидрохимического режима ЗПВ рассмотрена в работе (Супранович, Якунин, 1973). В Амурском и Уссурийском заливах комплексные гидролого-гидрохимические исследования были выполнены Е.И. Ластовецким и В.М. Вещевой (1964), а в последующем в ЗПВ Н.Ф. Подорвановой с коллегами (1989). Гидрохимические основы процесса первичного продуцирования в прибрежной зоне Японского моря были рассмотрены в работе (Пропп, 1981). В заливе Петра Великого наблюдается рост антропогенной нагрузки (Огородникова, 2001; Вейдеман, 2001). В этой связи прибрежные комплексные исследования проводятся сотрудниками ТОИ ДВО РАН, ТИНРО, ДВНИГМИ, ИБМ ДВО РАН, ДВФУ в настоящее время.

Понятие «эстуарий» предполагает наличие зоны смешения речных и морских вод в устьевой области реки (Cameron and Pritchard, 1963; Pritchard, 1967; Михайлов, Горин, 2012). Результаты исследований процессов проникновения морских вод в эстуарий и их обмена с речными водами подробно рассмотрены и обобщены в монографиях (Симонов, 1969; Михайлов, 1997), и обсуждаются как опасное гидрологическое явление (Наставление, 1968), в том числе в мировой литературе в настоящее время (Werner et al., 2013). Общие для всех эстуариев факторы, которые определяют положение зоны смешения – расход реки, термический и солевой режим, приливы, сгонно-нагонные явления, морфометрические характеристики бассейна (Симонов, 1969; Скриптунов, 1982; Лупачев, 1984; Долгополова, Исупова, 2010; Михайлов, Горин, 2012). Исследования в период ледостава показали

существенное влияние ледяного покрова на гидрологический режим эстуария (Скриптунов, 1976). Для каждой конкретной акватории возникают локальные особенности проявления этих факторов. Особенности взаимодействия речных и морских вод, например, такие как внутренние волны или сейши рассмотрены в статье (Долгополова, Исупова, 2010). В недавней работе (Крылов, 2014) на основе метода георадиолокации показана мелкомасштабная изменчивость структуры воды в эстуарии.

Река Туманная – самая крупная река в Приморском крае, впадающая в Японское море на западной границе ЗПВ. Широкий общественный и научный интерес к эстуарию реки Туманной возник на рубеже 20-21 веков в связи с международным проектом, разработанным под эгидой ООН, о создании свободной экономической зоны (Tumen River Economic Zone - TREZ) с территорией около 100 км<sup>2</sup> (Вышкварцев, 1997; Экологическое состояние и биота..., 2000) Затем возник вариант программы развития района р. Туманной (Tumen River Area Development Programme - TRADP). Позже этот проект был опять преобразован: сначала в создание региона экономического развития (Tumen River Economic Development Area - TREDA), а потом – в “Туманган” (корейское название реки Туманная), в рамках которого предполагалось строительство порта-мегаполиса с участием КНДР, КНР и России (Экологическое состояние и биота..., 2000). Предварительным условием выполнения проекта было проведение экологических исследований. Такие исследования со стороны России были проведены в сопредельной к устью акватории России институтом биологии моря и Тихоокеанским институтом географии ДВО РАН с участием Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института (Экологическое состояние и биота..., 2000,2001,2003)

Впервые, полевые работы в р. Раздольной и её устье были проведены в 1925 г. Результаты этих работ были опубликованы через два года (Гомоюнов, 1927). В очерке автор помимо результатов своих работ подробно отметил исследования предшественников, направленных на изучение особенностей

геологического строения долины реки Раздольной. В этой работе была представлена информация о течениях, приливах, информация о температуре и солености реки Раздольной и северной части Амурского залива. В настоящее время наибольшее количество публикаций известно для эстуария реки Раздольной. К ним относятся публикации направленные на изучение вопросов биогеохимии (Лапин и др., 1990; Состояние морских экосистем., 2005; Тищенко и др., 2005а, б; Звалинский и др., 2005; Звалинский и др., 2010; Тищенко и др., 2006а; Михайлик и др., 2011; Тищенко, Михайлик, 2011; Павлова и др., 2012; Звалинский и др., 2016), экологии (Никулина, 2006; Вазова и др., 2011), ихтиологии (Колпаков, Милованкин, 2010).

В эстуариях рек Партизанской, Артемовки, Шкотовки, Суходол, Гладкой и Тесной проводились гидрохимические и гидробиологические исследования сотрудниками ТИНРО (Надточий и др., 2010; Милованкин и др., 2012; Колпаков, 2013) и ТОИ ДВО РАН (Федорец, 2010; Слободскова, 2011; Чижова 2013). В приемном бассейне реки Суходол были проведены измерения течений (Рогачев, Шлык, 2012) В этих работах в комплексе не исследовалась гидрология эстуариев и характеристики, которые могли бы выявить интенсивность продукционно-деструкционных процессов: растворенный кислород, биогенные вещества, растворенные формы органического и неорганического углерода, концентрация хлорофилла *a*, взвесь, ФАР.

В целом гидрология эстуариев Дальнего Востока России, как фактор формирования гипоксии изучена очень слабо. В настоящее время есть сведения об отдельных объектах Камчатки (Горин, 2009; Горин, 2012), Сахалина (Биота..., 2003) и материкового побережья Охотского моря (Кравцов, 1980; Гидрология., 1989). Но все эти объекты находятся под воздействием значительных приливов. Микро- и неприливно-эстуарии в основном находятся в Приморье – в наиболее освоенном с хозяйственной точки зрения регионе Дальнего Востока РФ.

Основываясь на данных ПУГМС для исследуемых рек можно выделить основные закономерности в гидрологическом режиме. Наибольший месячный

сток обычно наблюдается в мае, наибольшие расходы воды – в летние месяцы или в сентябре, наименьший сток – в январе или феврале. Принимая во внимание это, в гидрологическом режиме исследуемых эстуариев можно выделить три периода: межень в период ледостава, межень в период открытого русла и весеннее половодье или летний паводок.

Гидрохимические параметры:  $O_2$ , главные биогенные вещества (нитраты, нитриты, аммоний, фосфаты, силикаты), компоненты карбонатной системы (рН, парциальное давление  $CO_2$ ), продукционные характеристики (ФАР, концентрация хлорофилла *a*) в эстуариях и в приемных бассейнах в комплексе не изучались. В работах (Ластовецкий, Вещева, 1964; Супранович, Якунин, 1976; Подорванова и др., 1989) исследования проводились в период, когда еще не были разработаны должным образом измерения соединений азота. Измерялись только нитриты, тогда как аммонийный азот и нитраты измерены не были. В работе (Подорванова и др., 1989) соединения азота не измерялись. Необходимо отметить, что во время проведения этих работ еще недостаточно была разработана теория карбонатной системы. В связи с чем, авторами использовалась ячейка с жидкостным соединением для измерения рН, что приводит не только к теоретическим ошибкам, которые возрастают в эстуарных и прибрежных акваториях, с использованием такого способа измерения увеличивается вклад случайных ошибок (Тищенко, 2007а). На тот период также были не в достаточной степени изучены константы диссоциации угольной кислоты, не установлен вклад гуминового вещества в измеряемую щелочность. Авторами не были рассчитаны такая важная характеристика среды, как парциальное давление  $CO_2$ . Не было измерено содержание хлорофилла.

Регулярные наблюдения на сети рек ПУГМС в прошлом столетии и в настоящее время по понятным причинам не способны одновременно охватить комплекс гидрохимических параметров для такого количества водных объектов.

Вместе с тем приведенные в литературе данные цитируемых авторов представляют несомненную научную ценность, поскольку они позволяют

сопоставить современное экологическое состояние акваторий ЗПВ с тем, которое наблюдалось почти полвека назад. При интерпретации пространственных и сезонных изменений содержания кислорода большинство авторов склонялось к мнению о том, что низкие концентрации кислорода для летнего периода обусловлены, как понижением растворимости кислорода с ростом температуры, так и окислением органического вещества, при этом природа органического вещества не уточнялась. В более поздних работах авторы более определенно высказываются в пользу того, что ухудшение кислородного режима в Амурском заливе обусловлено в основном загрязнением органическим веществом сточных вод г. Владивостока (Родионов, 1984; Вейдеман и др., 2001; Огородникова, 2001; Нигматулина, 2005) или дампингом (Мишуков и др., 2009).

Следует отметить, что авторы достаточно подробных съемок Амурского и Уссурийского заливов отмечали, что на станциях с существенно пониженным содержанием кислорода в среде наблюдались повышенные содержания фосфатов и силикатов (Ластовецкий, Вещева, 1964; Подорванова и др., 1989). Однако причины таких совпадений аргументировано не объяснялись.

Существование аномальных зон гидрохимических, продукционных характеристик и компонентов карбонатной системы, а также гипоксии в общем виде было установлено в 2006 – 2008 гг. (Тищенко и др., 2008; Звалинский и др., 2008; Тищенко и др., 2011). В этих работах впервые объяснена взаимосвязь аномалий биогенных веществ, компонентов карбонатной системы и растворенного кислорода как результат микробиологического разложения фитопланктона. Обобщением этих работ стала кандидатская диссертация Тищенко П.П. (2013). Позднее, гипоксические условия были обнаружены в летний сезон в Уссурийском заливе (Семкин и др., 2012), в морском биосферном заповеднике у о. Фуругельма (Стунжас и др., 2016; Тищенко и др., 2016). Поскольку одна из причин формирования гипоксии в Амурском заливе была эвтрофикация залива р. Раздольной (Михайлик и др., 2011), то возник интерес к процессам, происходящим в эстуариях ЗПВ.

В результате широкомасштабных исследований были установлены гипоксические условия в эстуариях рек Туманной (Тищенко и др., 2018), Раздольной (Тищенко и др., 2017), Артемовки (Семкин и др., 2015), Партизанкой (Семкин и др., 2018а). Центральными вопросами оставались: 1) природа органического вещества, окисление которого приводило к гипоксии; 2) закономерности формирования аномальных зон гидрохимических характеристик воды, в частности, зон гипоксии в такой динамичной области, какой является эстуарий реки.

### **1.1. Климат**

Приморье относится к муссонной области климата умеренных широт (Алисов, 1956), который формируется под воздействием внетропической муссонной циркуляции и под влиянием термических контрастов между материком и океаном (Климат., 1983). Внетропический муссон связан с сезонным преобладанием пониженного давления над материком летом и повышенного – зимой. Преобладающее направление внетропического муссона летом – юго-восточное, зимой – северное и северо-западное (Гайко, 2005). Зимние атмосферные процессы проходят с ноября по март. В сентябре на Азиатском континенте начинает формироваться зимний азиатский антициклон (Климат., 1983). В октябре над континентом устанавливается область высокого давления. Вторым центром действия атмосферы, формирующим тип атмосферной циркуляции в холодное полугодие над дальневосточными морями, является алеутская депрессия. Наибольшего развития зимние процессы достигают в январе. В результате этих процессов в течение всей зимы в Приморье существует сухой и холодный континентальный воздух с преобладанием северных и северо-западных ветров (Свинухов, 1977). Весной азиатский антициклон начинает разрушаться, погода в эти месяцы прохладная и пасмурная, с частыми туманами и морозящими дождями. Летом взаимодействие дальневосточной депрессии с северотихоокеанским и охотским антициклонами обуславливает интенсивный перенос в летнем муссоне теплых

и влажных масс воздуха с океана на континент. Осенью происходит переход от летнего типа циркуляции к зимнему, который устанавливается в октябре.

Самые низкие значения температуры воздуха в районе Владивостока отмечаются в январе, а наиболее высокие – в июле–августе. В отдельные зимы температура воздуха может понижаться до  $-31,2^{\circ}\text{C}$ , а летом повышаться до  $33,6^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая температура составляет  $4,9^{\circ}\text{C}$ . Если рассматривать среднемесячные величины температуры воздуха, то минимальные её значения приходятся на январь ( $-12,3^{\circ}\text{C}$ ), наибольшие – наблюдаются в августе ( $19,8^{\circ}\text{C}$ ).

За год в целом ветры северных румбов составляют 48%, юго-восточных румбов – 43%. На штиль приходится 6%. Оставшиеся 3% составляет повторяемость ветров других направлений. В январе преобладают северные ветры (74%), небольшую повторяемость имеют северо-западный (8%) и северо-восточный (3%) ветра. Юго-восточный ветер имеет повторяемость 9%. Штиль наблюдается в 7% случаях. Средние скорости ветра в этот период составляют 6–9 м/с (Климат., 1983). В июле преобладающим является юго-восточный ветер (63%), значительную повторяемость имеют южный (15%), юго-западный (5%). Ветер северного направления имеет повторяемость в 8% случаев, штиль – 4%. Ещё 4% составляют ветры других направлений (Полякова, 2008). Средние скорости ветра летом составляют 5,3–5,8 м/с (Климат., 1983). Повторяемость северных ветров (СВ, С, СЗ) зимой достигает 85% и к лету уменьшается до 12%, южных (ЮВ, Ю, ЮЗ), наоборот, летом достигает 83% и к зиме уменьшается до 12%. При перестройке барического поля весной и осенью повторяемость северных и южных ветров резко изменяется. Так, повторяемость северного ветра уменьшается от 74% в январе до 26% в апреле, а повторяемость юго-восточного ветра в этот период увеличивается от 9 до 53%. Осенью наблюдается обратная картина, отмечается увеличение повторяемости северного ветра (от 8% в июне до 55% в ноябре) и уменьшается повторяемость юго-восточного ветра (от 63% в июне до 17% в ноябре) (Климат., 1983).

Относительная влажность в районе Владивостока имеет типично муссонный годовой ход с максимумом летом и минимумом зимой. В период с

апреля по июнь наблюдается наиболее интенсивный рост относительной влажности. Максимум её значений наблюдается в июле и составляет 92%. В августе относительная влажность составляет 88%, а в ноябре-декабре отмечается минимум ее значений (62%) (Климат..., 1983).

Режим осадков в районе побережья ЗПВ характеризуется ярко выраженной сезонностью (Справочник..., 1968). В месяцы максимума осадков (июль, август, сентябрь) их количество достигает 200 мм в месяц, а в период минимума (январь, февраль) падает до 5–15 мм. В течение года около 20% осадков выпадают в твердом виде. Всего же за год выпадает от 720 до 830 мм осадков (Климат..., 1983).

В годовом распределении атмосферных осадков в зависимости от их периода условно выделяют два периода: 1) холодный (ноябрь – март) период с выпадением преимущественно твердых осадков и 2) теплый (апрель-октябрь) период с преобладанием жидких осадков.

Наибольшее количество облаков наблюдается с мая по август, когда средняя повторяемость пасмурного состояния неба составляет от 65 до 82%. Наиболее пасмурными являются июнь и июль, когда повторяемость пасмурного неба по общей облачности составляет 76–82%, ясного неба – 10–14%. Наименьшая повторяемость пасмурного неба наблюдается в зимние месяцы (20–30%), минимум – в январе (Климат..., 1983).

## **1.2. Общая характеристика водосбора залива Петра Великого**

Водосбор зал. Петра Великого является наиболее развитой и населенной частью Приморского края и всего Дальнего Востока РФ, несмотря на равномерное понижение общей численности людей в Приморье с 2,3 млн. чел. с начала 90 –х гг. до 1,9 млн. на 2017 г. Доля городского населения в настоящее время составляет 77,1% (1,48 млн. человек) всего населения Приморского края. Городское население резко преобладает, прежде всего за счет г. Владивостока с 605 тыс. жителей, число которых превышает половину всех горожан. Кроме

Владивостока, на водосборе зал. Петра Великого расположены города Уссурийск (152 тыс. чел.), Артем (111 тыс. чел.), Фокино (33,8 тыс. чел.), Большой Камень (47 тыс. чел.), Находка (167 тыс. чел.) и Партизанск (49,6 тыс. чел.). Такая структура населения сложилась в последние 30 лет. Плотность населения на водосборе зал. Петра Великого в 5 раз выше, чем в Приморском крае в целом (Официальная статистика\Население (Примстат)

[http://primstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/primstat/ru/statistics/population](http://primstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/primstat/ru/statistics/population).

Обеспеченность водосбора зал. Петра Великого реками достаточно высока. Плотность речной сети достигает  $0,73 \text{ км/км}^2$  по сравнению с  $0,3 \text{ км/км}^2$  в среднем для Дальнего Востока РФ (Ресурсы пов. вод СССР, 1972; Многолетние данные., 1986). Река Туманная – крупнейшая река западного побережья Японского моря – впадает в море на юго-западной границе зал. Петра Великого (рис. 1.1).

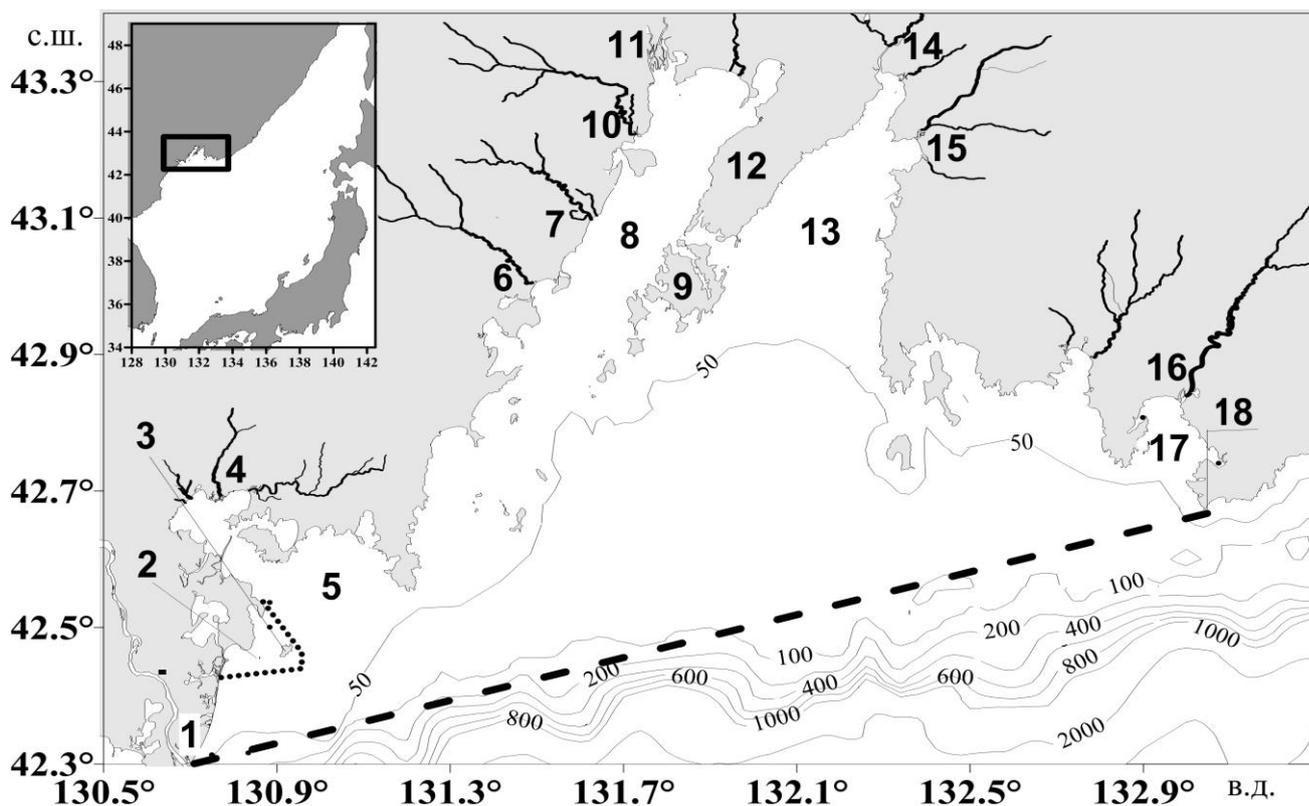


Рис. 1.1. Географическое положение ЗПВ, приемных бассейнов и эстуариев основных рек его водосбора: 1 – эстуарий р. Туманной, 2 – Дальневосточный морской заповедник, 3 – о. Фуругельма, 4 – район эстуариев рек Гладкая, Цукановка, Тесная; 5 – зал. Посъета; 6 – эстуарий р. Нарва; 7 – эстуарий реки Барабашевки; 8 – Амурский залив; 9 – о. Русский; 10 – эстуарий р. Амба; 11 – эстуарий р. Раздольной; 12 – п-ов Муравьев-Амурский; 13 –

Уссурийский зал.; 14 – эстуарии р. Артемовки и Шкотовки; 15 – эстуарии р. Суходол и Петровки; 16 – эстуарий р. Партизанской; 17 – зал. Находка; 18 – мыс. Поворотный.

Преобладание направленного на юг Приморского течения вдоль внешней границы зал. Петра Великого в основном вытесняет линзу распресненных вод реки Туманной за пределы ЗПВ (Экологическое состояние и биота..., 2000, 2001, 2000), поэтому её влияние на экологическое состояние ЗПВ эпизодично.

Р. Раздольная – вторая по величине река на водосборе зал. Петра Великого (табл. 1.1) – впадает в кутовую часть Амурского залива (рис. 1.1).

Реки Артемовка, Шкотовка и Суходол – главные водотоки, обеспечивающие поступление пресных вод в Уссурийский залив, однако их сток в сумме не превышает 10–12 % стока р. Раздольной.

Речной сток в восточную часть зал. Петра Великого обеспечивается выносом достаточно крупной реки Партизанская (рис. 1.1), лишь в 2 раза уступающей стоку р. Раздольной (табл. 1.1), а также более мелкими водотоками.

Таблица 1.1. Основные морфометрические характеристики районов ЗПВ и основных впадающих в него рек (Атлас..., 1998; Ресурсы пов. вод СССР, 1972; Многолетние данные..., 1986, данные ПУГМС)

Районы зал. Петра Великого	Площадь, км <sup>2</sup>	Главные впадающие реки	Длина реки, км	Водосбор, км <sup>2</sup>	Речной сток, км <sup>3</sup>
Юго-западная часть	1498	Туманная	549	33200	9,05
		Цукановка	29	170	0,12
		Брусья	19	160	0,04
		Гладкая	44	458	0,08
Амурский залив	997	Нарва	36	332	0,13
		Барабашевка	61	576	0,32
		Амба	63	242	0,19
		Раздольная	245	16800	2,46
Уссурийский залив	1889	Арт.+Кнев.	73 33	1460	0,29
		Шкотовка	59	714	0,22
		Суходол	49	443	0,14
Восточная часть	921	Партизанская	142	4140	1,32

Химический состав речных вод определяется совместным действием природных и социально-экономических факторов. К природным факторам относятся климатические условия, рельеф, растительность и состав пород на водосборе. Антропогенные факторы способные влиять на химический состав речного стока, это население, степень урбанизации, уровень и характер экономической активности, в том числе водопотребления и водоочистки. Во многих регионах влияние антропогенных факторов на химический состав рек является определяющим (Meubeck, 2003).

Эстуарные воды представляют собой смесь речных и морских вод. Общеизвестно, относительный состав морских вод постоянный. Наоборот, макрокомпонентный состав речных вод изменяется в широких пределах и зависит в первую очередь от климатических особенностей региона, а также от минерального состава почв и пород, слагающих бассейн реки. Приморский край расположен в зоне гумидного климата, т.е. количество выпавших атмосферных осадков превалирует над испарением. Для такой климатической зональности характерна низкая минерализация речных вод (50–200 мг/л), основными компонентами которых являются ионы кальция, магния и гидрокарбоната (Алекин, 1970). Речные воды Приморья как правило ультрапресные, лишь в реке Туманная в меженный период минерализация превышает 200 мг/л (Шулькин и др. 2009) Согласно классификации О. А. Алекина воды рек исследуемых в диссертации относятся преимущественно к группе кальция гидрокарбонатного типа (Павлова и др., 2015).

Увеличение содержания биогенных веществ в реках в связи с интенсификацией сельского хозяйства и промышленности, а также урбанизация резко увеличили скорость эвтрофикации пресноводных водоемов, что привело к резко негативным последствиям: бурному «цветению» фитопланктона, падению прозрачности воды, понижению содержания кислорода в придонных водах, резкому падению биоразнообразия фауны (Хендерсон-Селлерс, Марклэнд, 1990). Поэтому при изучении гипоксии в эстуариях и в приемных

бассейнах особое внимание следует уделить анализу региональных особенностей формирования режима биогенных веществ и их потоков в ЗПВ (Звалинский, 2012). Впервые, на основании собственных и литературных данных о концентрации биогенных веществ в речных водах Приморья была проведена оценка их потоков в ЗПВ в работе В. И. Звалинского с соавторами (Звалинский и др., 2013)

Химический состав рек южного Приморья существенно изменяется в течение года и во многом определяется антропогенной нагрузкой на водосбор (Шулькин и др., 2009). В сезонной изменчивость концентрации биогенных веществ в реках, впадающих в ЗПВ, выделяется две особенности. Первая особенность – наличие максимума концентрации в зимний период, связанного с многократным снижением расхода воды при постоянном объеме коммунально-бытовых стоков, вторая особенность - возрастание потока биогенных веществ в весенние половодья или летние дождевые паводки. Эти выводы впервые были сделаны для реки Раздольной (Шулькин, Семькина, 2005; Михайлик и др., 2011). При анализе сезонной изменчивости концентрации  $O_2$  и биогенных веществ в реках южного Приморья также обсуждается связь этих характеристик с осадками на водосборе и деятельностью живых организмов (Важова, 2017).

Химические показатели, характеризующие качество речных вод водосбора ЗПВ по данным наблюдений ПУГМС на пунктах мониторинга ГСН представлены в (таблице 1.2). Повышенное содержание природных органических веществ в реках дренирующих таежные ландшафты – наиболее вероятная причина повышенных значений ХПК в реках Приморья. Минимальный уровень ХПК наблюдается в наиболее чистых небольших горных реках юго-западной части бассейна ЗПВ. Высокие показатели ХПК, превышающие ПДК, имеют место в реках Раздольная и Кневичанка дренирующих наиболее хозяйственно освоенные и плотно населенные участки водосборов (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Химические показатели качества речных вод водосбора ЗПВ (среднее за 2001–2007 по данным ПУГМС (Шулькин 2012))

Река	ХПК мкмоль/л	БПК <sub>5</sub> мкмоль/л	Взвесь мг/л
Туманная	587,72	60,33	86,5
Юго–запад*	106,29	46,8	6,0
Раздольная	662,75	362,63	29,2
Кневичанка	815,93	190,69	29,9
Артемовка	334,50	66,9	9,6
Партизанская	337,62	79,09	12,1
<b>ПДК</b>	468,93	62,52	–

\* – Цукановка, Брусся, Нарва, Барабашевка, Амба.

Биологическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>) отражает количество органических соединений способных окисляться в ходе жизнедеятельности бактерий, обитающих в исследуемых водах. Показатель БПК превышает ПДК равную 62,52 мкмоль/л практически во всех реках, дренирующих заселенные и хозяйственно освоенные водосборы (табл. 1.2). Исключение составляет нижнее течение явно загрязненной р. Туманной, где БПК<sub>5</sub> не велико, но зато ХПК превышает ПДК. В наиболее загрязненных реках Раздольная и Кневичанка значительно повышены показатели и ХПК и БПК (табл. 1.2).

Анализ характера временной изменчивости концентрации аммонийного и нитритного азота в реках Кневичанка и Раздольная показал, что наблюдается тенденция увеличения кратности превышения ПДК за период 2005–2009гг. (Никаноров, Брызгалю, 2011).

### 1.3. Гидролого-гидрохимический режим залива Петра Великого

Залив Петра Великого является самым обширным в Японском море. Площадь, занимаемая им, составляет около 31 000<sup>2</sup> миль. Рельеф дна ЗПВ характеризуется развитым шельфом и крутым материковым склоном, нарушенным подводными каньонами (рис. 1.1.). Гидрологический режим ЗПВ определяется следующими основными факторами (Супранович, Якунин, 1976):

1) климатическими условиями района, их изменчивостью и связанными с ними сезонными и межгодовыми колебаниями атмосферной циркуляции и температуры воды;

2) распресняющим влиянием речного стока;

3) орографическими условиями залива, влияющими на интенсивный прогрев мелководья в весенне-летний период и быстрое охлаждение в начале зимы, изолированностью вторичных заливов;

4) водообменом с Японским морем;

5) различными динамическими факторами: приливами, ветровыми сгонами и нагонами, а также перемешиванием вод.

**Температура** воды в ЗПВ испытывает значительные сезонные колебания. Зимой температура воды в ЗПВ колеблется от 0 до  $-1,9^{\circ}\text{C}$ . Отрицательные значения температуры воды наблюдаются во всех заливах второго порядка. Положение изотермы  $0^{\circ}\text{C}$  примерно совпадает с изобатой 50 м. Воды открытой части моря теплее прибрежных и характеризуются положительными значениями температуры воды. Самый теплый месяц август. На поверхности в вершинах Амурского и Уссурийского заливов среднемноголетняя температура воды соответственно достигает  $22$  и  $20^{\circ}\text{C}$  в заливе Находка  $18^{\circ}\text{C}$  и в открытой части ЗПВ  $17^{\circ}\text{C}$  (Супранович, Якунин, 1976). Согласно (Ластовецкий, Вещева, 1964) в Амурском температура воды летом  $23^{\circ}\text{C}$ , абсолютный максимум достигает здесь  $28,8^{\circ}\text{C}$ . В целом весь западный берег залива Петра Великого летом характеризуется более высокими значениями температуры воды: Приморское течение поступает в залив под его восточным берегом, и в самом заливе формируется ветвь циклонического круговорота вод; в заливах второго порядка ЗПВ под воздействием речного стока и морских течений создаются свои местные циркуляции. Температурный режим в осенний и весенний сезоны определяется интенсивностью выхолаживания/прогрева и системой апвеллинг/даунвеллинг вод из открытой части моря на шельф ЗПВ (Сергеев и др., 2008; Тищенко и др., 2015; Tishchenko et al., 2016). Осенью, при развитии ветров северных румбов температура вод в придонном слое ЗПВ может

понижаться за период суток на  $15^{\circ}\text{C}$ , а степень релаксации структуры вод и ее характеристик в переходный период определяется соотношением продолжительности и интенсивности апвеллинга и даунвеллинга (Сергеев и др., 2008). В зимний сезон гидрологические условия в заливе Петра Великого определяются тремя факторами: осенне-зимняя конвекция, апвеллинг промежуточных вод и адвекция вод пониженной солености Приморским течением (Юрасов и др., 2007). Закономерности в пространственном распределении температуры ЗПВ в различные сезоны подробно изложены в работах (Данченков и др., 2003; Лучин и др., 2005).

**Соленость** воды минимальна летом и максимальна зимой, что определяется внутрigoдовыми колебаниями стока рек и осолонением при льдообразовании. Зимой соленость воды в ЗПВ составляет около 34‰, становясь одинаковой по всей глубине. Наибольшие величины отмечаются в мелководных частях залива, особенно в заливе Угловом, где соленость достигает 38‰ (Ластовецкий, Вещева, 1964). В августе поверхностные воды ЗПВ подвергаются наибольшему распреснению, при этом в вершине Амурского залива солёность воды составляет 20‰, в отдельных районах заливов Находка и Уссурийского – соответственно 30‰. В открытых районах ЗПВ соленость воды колеблется около 33‰, но уже на горизонте 5 м заметно повышается; на горизонте 10 м. соленость меняется от 32,5 до 33,5‰ а на горизонте 50 м и глубже составляет около 34‰ (.Супранович, Якунин, 1976). Закономерности в пространственном распределении солености ЗПВ в различные сезоны представлены в работах (Данченков и др., 2003; Лучин и др., 2005).

**Течения** в ЗПВ формируются в основном в результате влияния стока рек, ветра и приливов. Приморское течение вступает в ЗПВ под его восточным берегом и в самом заливе образует ветвь циклонического круговорота вод. В заливах второго порядка под воздействием речного стока и морских течений создаются свои местные циркуляции вод. Приливная компонента не превышает

0,1 м/с, в целом скорости течений в ЗПВ не превышают 0,3 м/с (Супранович, Якунин, 1976).

**Приливные колебания уровня** в ЗПВ хорошо выражены. Полусуточная приливная волна в ЗПВ входит с юго-запада и распространяется к заливам Посьет, Амурскому, Уссурийскому и Находка. Полусуточная приливная волна обегает ЗПВ за промежуток времени менее одного часа. Время наступления полных вод полусуточного прилива замедлено в закрытых бухтах и вторичных заливах, отделенных от основной части ЗПВ островами и полуостровами. Средняя величина полусуточного прилива в сизигию в ЗПВ колеблется около 20 см и мало меняется от пункта к пункту (Супранович, Якунин, 1976).

Кроме приливных явлений в ЗПВ наблюдаются и другие виды колебаний уровня моря. В ЗПВ отмечено два вида сейш. Первые имеют величину 2–3 см и период от 5 до 13 мин. Второй вид сейш с высотой колебаний уровня до 70 см и периодом до 60 мин. формируется при прохождении циклонов. Средний уровень в ЗПВ имеет ярко выраженный сезонный ход, с одним максимумом летом (в августе) и одним минимумом зимой (в январе) (Супранович, Якунин, 1976).

Тропические циклоны, сопровождаемые сильным ветром, резким падением атмосферного давления, выпадением большого количества осадков, могут быть, особенно в период максимальных приливов причиной значительного подъема уровня. Учитывая эти факторы, абсолютная амплитуда колебаний уровня в ЗПВ может достигать 160 см (Ластовецкий, Вещева, 1964).

**Волнение** в ЗПВ имеет достаточно выраженный сезонный ход, обусловленный сезонными изменениями атмосферной циркуляции над заливом. С октября по март преобладает волнение западных и северо-западных румбов, а с мая по август восточных и юго-восточных румбов. Максимальные высоты волн в различных пунктах залива неодинаковы. В закрытых бухтах наибольшие высоты волн достигают 2 м. В открытых районах максимальные высоты волн достигают 5 метров при ветрах южных румбов в летние месяцы.

**Лед** в ЗПВ начинает образовываться во второй декаде ноября вблизи устья реки Раздольной и в заливе Угловом. Начиная с первой – второй декады декабря по вторую декаду января ледяной покров в ЗПВ интенсивно увеличивается. При этом в первую очередь льдом покрываются прибрежные мелководные участки заливов Амурского, Уссурийского и Посыета. В середине января обычно весь ЗПВ покрыт льдом, а максимальное распространение ледяного покрова наступает во второй декаде февраля. Образование устойчивого припая обычно начинается в конце ноября вблизи устья реки Раздольной, в заливах Угловом, Муравьином и бухте Новгородской. В зависимости от суровости зимы, толщина неподвижного льда меняется в широких пределах. Например, у острова Речной в Амурском заливе толщина ровного льда в мягкие зимы составляет 50–55 см, в средние 70–75 см, а в суровые более чем 110 см (Супранович, Якунин, 1976).

Процессы разрушения ледяного покрова в ЗПВ начинаются задолго до начала общего весеннего ледотаяния. Это происходит в результате влияния северных ветров. Бурное таяние льда обычно наблюдается в первую и вторую декады марта. Разрушение припая протекает медленно. К концу марта и до середины апреля лед встречается отдельными пятнами и полосами. Окончательное очищение от льда обычно наступает во второй декаде апреля (Супранович, Якунин, 1976).

**Гидрохимический режим** ЗПВ, как отмечают многие авторы, формируется во многом под влиянием речного стока. Речные воды не только формируют своеобразное распределение солености и плотности воды, но и вносят в залив биогенные вещества, содержание которых в водах залива значительно выше, чем в открытой части моря. В то же время местные изменения солености и плотности воды, большое термическое расслоение, малые глубины обуславливают сложную динамику вод в заливе, которая влияет на гидрохимический режим.

**Растворенный кислород** является важнейшим индикатором качества функционирования водных экосистем: пересыщения  $O_2$  свидетельствует о

благополучных условиях для существования водных объектов, недосыщение  $O_2$  или отсутствие такового – о деградации экосистемы исследуемого водного объекта.

В связи с изменчивостью температуры воды в работе (Лучин и др., 2005) выделяется годовая гармоника в ходе сезонных изменений кислорода. В период выхолаживания процессы конвективного перемешивания, проникающие во многих районах до дна, способствуют обильному насыщению всей водной массы кислородом. В этот период концентрация  $O_2$  во всей толще вод ЗПВ от 8 мл/л и более (Супранович, Якунин, 1976).

Весной в ЗПВ концентрация  $O_2$  в поверхностном слое колеблется в диапазоне 6–7 мл/л, концентрации менее 6 мл/л отмечаются в прибрежных водах. При этом авторы справедливо связывают падение концентрации  $O_2$  с микробиологическим окислением аллохтонного органического вещества (Супранович, Якунин, 1976). Отмечается подповерхностный максимум кислорода в слое 10–15 м связанный с интенсификацией фотосинтеза (Супранович, Якунин, 1976).

Летом в связи с повышением температуры воды концентрация  $O_2$  уменьшается до 5–6 мл/л. В работе (Супранович, Якунин, 1976) авторы отмечают интенсификацию окисления органического вещества в связи с ростом температуры летом, в связи с чем наблюдается понижение  $O_2$ .

Осенью отмечается повышение концентрации  $O_2$  в мористых районах до 7 мл/л. В прибрежных районах при этом по-прежнему наблюдаются пониженные концентрации  $O_2$  на уровне 5,5–6,0 мл/л.

Распределение концентрации  $O_2$ , полученное при пространственном и временном осреднении демонстрирует относительно высокие концентрации  $O_2$  в течение всего года (Лучин и др., 2005). Однако для придонных вод заливов второго порядка ЗПВ с 70 х годов фиксируется дефицит кислорода. В работе Н.Ф. Подорвановой с соавторами (Подорванова и др., 1989) представлены пространственные распределения растворенного кислорода по материалам съемок 1976–1977 гг. в весенний, летний и осенний периоды. В работе

отмечено, что весной и осенью распределение кислорода довольно однородно. Летом насыщение воды кислородом на поверхности может повышаться до 165%, а у дна возможны понижения до 27%. Ухудшение кислородного режима Амурского залива в летний период также отмечается Н.П. Родионовым (Родионов, 1984). По его данным, в период с 1972 по 1978 гг. количество случаев падения содержания растворенного кислорода в Амурском заливе ниже 70% возросло с 7% до 12%. Повторяемость случаев падения насыщения вод кислородом ниже 30% в 1978 г. составила 2%. Автор объясняет это загрязнением акватории сточными водами г. Владивостока. Уссурийский залив подвержен антропогенному влиянию в гораздо меньшей степени (Огородникова, 2001), однако в 80-е годы прошлого столетия в придонном слое для некоторых районов залива уже отмечались концентрации кислорода близкие к гипоксическим (до 2,05 мл/л) (Подорванова и др., 1989). Общая картина изменения исторического понижения концентрации кислорода в придонных водах Амурского залива за последние 80 лет дана в диссертационной работе Тищенко П.П.(2013). В этой работе показано, что примерно в 70-е годы прошлого века в придонных водах Амурского залива в летний сезон наблюдались случаи гипоксии. Обширная область гипоксии придонных вод Амурского залива вместе с другими гидрохимическими параметрами подробно была изучена в 2007 и 2008 гг. (Тищенко и др., 2008; Тищенко и др., 2011; Tishchenko et al., 2013)

Случаи дефицита кислорода (70% и менее) в Уссурийском заливе согласно работе (Родионов, 1984) фиксировались ещё в 70-е годы. В другом подробном исследовании гидрохимических характеристик вод кутовой части Уссурийского залива (Рачков, 2006) также приводятся низкие значения содержания кислорода до 3 мл/л.

**Величина рН** в водах ЗПВ имеет определенный сезонный ход. Согласно (Супранович, Якунин, 1976) максимум (8.4) наблюдается в теплую половину года, минимумом зимой (8,1–8,3). В работе (Ластовецкий, Вещева, 1964) дана более детальная сезонная изменчивость величины рН для Амурского и

Уссурийского заливов. Согласно этим данным, наибольшие величины рН наблюдаются весной и осенью (8,2), особенно во время цветения фитопланктона, наименьшие зимой, в условиях интенсивной респирации. В летнее время в результате увеличения речного стока величина рН имеет наименьшие значения (7,9). Летом тенденция увеличения рН с севера на юг повторяется, но максимальные значения наблюдаются в середине залива на поверхности. Самые малые величины рН (7,90–7,93) отмечаются в придонном слое в области круговой циркуляции вод.

В настоящее время существует несколько шкал, методик и стандартов для измерения рН природных вод (Тищенко, 2007а,б). Авторы работ (Ластовецкий, Вещева, 1964; Супранович, Якунин 1976; Подорванова и др., 1989) не указывают в какой шкале рН проводились измерения. По-видимому, измерения проводились в шкале National Bureau Standard (NBS). Пространственные и сезонные изменения рН Амурского залива подробно изучались в работах Тищенко и др., 2008; Тищенко и др., 2011; Tishchenko et al., 2013, которые были обобщены в диссертации Тищенко П.П. (2013).

**Биогенные вещества** в ЗПВ благодаря воздействию речного стока имеют характерное пространственно-временное распределение. В ряде работ отмечается общая тенденция увелечения соединений азота, фосфора, кремния, силикатов в прибрежной части залива в результате воздействия речного стока (Ластовецкий, Вещева, 1964; Супранович, Якунин, 1976; Лучин и др., 2005; Тихомирова, 2013). В работе (Супранович, Якунин, 1976) отмечается характерная вертикальная структура, согласно которой наблюдается падение концентрации биогенных веществ с глубиной до 50 м, а далее увеличение в связи с разложением взвешенного биогенного материала в условиях достаточного насыщения кислородом.

Особенность гидрологического режима в ЗПВ – развитие осенне-зимнего апвеллинга под действием северо-западных ветров в период с сентября по февраль, при этом поверхностные воды из кутовой части ЗПВ перемещаются в мористую часть, а навстречу им по склону поднимаются холодные и более

соленые воды из Японского моря (Жабин и др., 1993; Юрасов, 2007). В исследованиях (Воронков, 1941) при изучении внутригодовой и межгодовой изменчивости гидрохимического режима Уссурийского залива, на основе 13 станций было показано, что одним из ключевых факторов изменчивости гидрохимического режима залива являются сгонно-нагонные явления и неразрывно связанные с ними процессы подъема и опускания вод. В 2007 и в 2008 гг. были обнаружены высокие содержания фосфатов, силикатов и аммония в придонных водах Амурского залива в летний сезон (Тищенко и др., 2008; Тищенко и др., 2011; Tishchenko et al., 2013). Осенью (октябрь) 2008 г. были обнаружены высокие концентрации нитратов в придонных водах Амурского залива, содержание которых обусловлено апвеллингом промежуточных вод Японского моря (Тищенко и др., 2011; Tishchenko et al., 2013).

#### **1.4. Гидрологический режим рек и приемных бассейнов**

##### ***1.4.1. Река Туманная и юго-западная часть залива Петра Великого***

Река Туманная (китайское название – Тумыньцзянь, корейское – Туманган, в старой русской географической литературе – Туманганг, до 1974 г. – Тюмень-Ула, в англоязычной литературе – Tumen или Dumen River) берет начало на плоскогорье Чанбайшань с восточного склона потухшего вулкана Пектусан. На всем протяжении, за исключением последних 17 км до устья, р. Туманная является пограничной рекой между КНДР и КНР. На последнем участке, перед впадением в Японское море, по р. Туманной проходит граница между Россией и КНДР. Это самая крупная река в Приморском крае, впадающая в Японское море на западной границе ЗПВ (рис. 1.1.). Большая часть бассейна реки Туманной расположена в гористой местности, что обусловило выраженный горный характер реки (Экологическое состояние и биота..., 2000).

Общая площадь водосбора реки до створа г. Куанхэ (Quanhe), расположенном в 50 км до устья составляет 33168 км<sup>2</sup> (Wei et al., 1999). Длина

реки – 505,4 км, основные притоки с левого берега – реки Гая, Буэрхатон, Хайлань и Хунчунь (Yin X., Yin C, 1998). По данным гидрографической станции в г. Куанхэ, среднегодовой расход реки составляет 215 м<sup>3</sup>/с (Wei et al., 1999). Благодаря муссонному климату расход реки существенно зависит от сезона.

Как правило, максимальный расход наблюдается летом в период паводков, когда, согласно разовым наблюдениям ПУГКС в районе г. Хасан, расход может достигать 7570 м<sup>3</sup>/с (2000 г) в конце декабря этого же года расход воды составлял 24,3 м<sup>3</sup>/с. Зимой наблюдается устойчивая межень.

Годовой ход температуры воды в западной части ЗПВ согласно данным с ближайшей ГМС «Посьет» имеет минимум в январе-феврале и максимум в августе (Ластовецкий, Якунин, 1981). Прогрев воды начинается в марте, наиболее интенсивное увеличение температуры воды наблюдается в апреле-мае. В августе температура воды поверхностного слоя в прибрежных районах западной части ЗПВ колеблется в пределах 17–26°C. Охлаждение вод начинается в конце августа. В сентябре температуры воды в среднем повсеместно уменьшается до 11–20°C, в октябре до 5–7°C, в ноябре до 2–5°C. Равномерное понижение температуры воды в осенние месяцы сопровождается переходом через 0°C 1 декабря (Супранович, Якунин, 1976).

В особенность термического режима в западной части ЗПВ вносят апвеллинги. Апвеллинги наблюдаются с весеннего по осенний сезон и постоянно проявляются у мысов и островов, например у о-ва Фуругельма (Григорьева, Кучерявенко, 1995). В результате апвеллинга в прибрежную зону происходит подток холодных вод, которые проникают в систему внутренних бухт. Согласно исследованиям, проведенным в б. Миносок в период с весны по осень апвеллинг наблюдается до 8 раз (Григорьева, 2013). Летом короткопериодные притоки холодных вод особенно заметны.

Сезонный ход солености воды в юго-западной части ЗПВ характеризуется минимумом летом и максимумом зимой, что определяется внутригодовыми колебаниями речного стока. По прибрежным наблюдениям на ГМС Посьет минимум солености около 30‰ наблюдается в июле – августе, а максимум,

свыше 34‰ по всей толще вод, наблюдается в ноябре – декабре. В теплый период года соленость с глубиной значительно увеличивается. С апреля по сентябрь на горизонте 10 м соленость составляет 33,5‰ (Супранович, Якунин, 1976).

Приливные колебания носят неправильный полусуточный характер. Средняя величина сизигийного прилива в ЗПВ колеблется от 15 см до 20 см (Подорванова, 1989). Сравнительно низкая величина прилива (20 см) в западной части ЗПВ позволяет отнести эстуарий реки Туманной к микроприливному эстуариям (Davies, 1964).

#### ***1.4.2. Реки Раздольная, Амба и Амурский залив***

Р. Раздольная (Суйфун) начинается на территории Китая (северная Маньчжурия) и входит в пределы РФ вблизи с. Полтавка. Впадает в куттовую часть Амурского залива ЗПВ (рис. 1.1.) На территории РФ в бассейне реки расположены ряд крупных поселков с населением до 8 тыс. чел. (пос. Раздольное), и город Уссурийск с населением 158 тыс. чел.

В верховьях ширина долины реки составляет несколько сот метров. В пределах заболоченной нижней части водосбора долина расширяется до 10–15 км, а река делится на ряд рукавов, значительная часть которых находится в стадии заиленных стариц. Ширина реки 150–200 м, глубины в верховьях 1–2 м, в нижнем течении 3–6 м, средние скорости течения 20–30 см/с (Карасев, 1982). В нижнем течении реки глубины могут достигать 10 м (Гомоюнов, 1927). Площадь водосбора р. Раздольной 16830 км<sup>2</sup>, на территории России 7300 км<sup>2</sup>, протяженность на этом участке равна 192 км. Среднегодовой расход воды за период 1963–1970 в створе п. Тереховка в 70 км от устья составляет 73,8 м<sup>3</sup>/с, (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972).

В водном режиме согласно данным (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972) можно выделить устойчивое весеннее половодье, которое обычно начинается в конце апреля – начале мая и заканчивается в конце мая и летне-

осенние дождевые паводки, в период которых расход воды заметно выше, чем для половодий. Наибольший среднемесячный расход для мая за период с 1963 по 1970 – 244 м<sup>3</sup>/с, а для августа и сентября 782 и 661 м<sup>3</sup>/с соответственно. При этом в створе п. Тереховка абсолютная максимальная величина расхода реки в период летне-осенних паводков может достигать 1930 м<sup>3</sup>/с (1968 г.) (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972), 2740 м<sup>3</sup>/с (31.08.2015 г. (ПУГМС)). В зимние месяцы наблюдается устойчивая межень со среднемесячным расходом 2–4 м<sup>3</sup>/с, расход может снижаться до 0,3 м<sup>3</sup>/с (период 1963–1970). Летом, в отсутствие циклонов, также выделяется межень. В маловодные годы среднемесячные расходы воды с июня по август составляют 19,8 – 21,9 м<sup>3</sup>/с (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972).

Средняя дата прохождения температуры воды весной через 0,2°С в районе поста в п. Тереховка – 6-ое апреля. После этого температура воды равномерно растет достигая среднемесячных значений 23,1°С в августе. Максимальная температура воды, зафиксированная на посту в п. Тереховка – 27,2°С. Средняя дата прохождения температуры воды осенью через 0,2°С – 18-ое ноября. (Многолетние данные..., 1986).

Ледостав начинается в конце ноября – декабре. Сходит лёд в марте.

Р. Амба берёт начало в юго-западной части Борисовского плато, течёт на юго-восток и впадает в бухту Песчаную, расположенную на западном побережье Амурского залива (рис. 1.1.). Река протекает по горно-холмистой местности. Верхняя, наиболее высокая часть ее бассейна, представлена отрогами гор Цинлунтай и Плоского хребта; водораздельные гребни и вершины гор поднимаются здесь до 600–740 м. В низовьях река выходит из гор в пределы волнистой Приморской равнины.

На протяжении нескольких последних километров (перед впадением в море) река протекает по широкой, пойменной и заболоченной долине и сильно меандрирует. Ширина ее достигает 50–70 м, глубина составляет 1,5–1,7 м. Площадь водосбора реки до створа в п. Занадворовка, расположенном в 28 км от устья реки, составляет 242 км<sup>2</sup>. Среднегодовой расход реки 3,33 м<sup>3</sup>/с

(ресурсы поверхностных вод СССР, 1972). Весеннее половодье наблюдается лишь в отдельные годы; в большинстве случаев оно слабо выражено с наибольшим среднемесячным расходом в мае  $7,37 \text{ м}^3/\text{с}$ . В летне-осенние месяцы наблюдаются паводки с наибольшим среднемесячным расходом воды  $24,7 \text{ м}^3/\text{с}$ . Максимальный расход в период летнего паводка может достигать  $290 \text{ м}^3/\text{с}$  (1968 г.) (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972). В период зимней межени средний расход  $0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ , может снижаться до  $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ . Летняя межень выражена слабо и имеет характер кратковременных (5–10 дней) межпаводковых понижений уровня. Устойчивая летне-осенняя межень наблюдается лишь в маловодные годы, когда ее продолжительность составляет 42–55 дней, а среднемесячный расход при этом составляет  $0,54 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Средняя дата прохождения температуры воды весной через  $0,2^\circ\text{C}$  в районе поста в п. Занадворовка 29-ое марта. После этого температура воды равномерно растет достигая среднемесячных значений  $18,4^\circ\text{C}$  в августе. Максимальная температура воды, зафиксированная на посту в п. Занадворовка –  $24,6^\circ\text{C}$ . Средняя дата прохождения температуры воды осенью через  $0,2^\circ\text{C}$  – 4-ое декабря. (Многолетние данные..., 1986). Лед образуется в конце в начале декабря. Вскрытие реки происходит в конце марта.

Амурский залив, располагаясь в северо-западной части ЗПВ является наиболее ограниченным заливом второго порядка. С запада он ограничен берегом материка, а с востока гористым полуостровом Муравьев-Амурский и островами Русский, Попова, Рейнеке, Рикорда. Южная граница Амурского залива проходит по линии, соединяющей мыс Брюса с островами Циволько и Желтухина. В направлении с юго-запада на северо-восток залив простирается на 70 км. Ширина его изменяется от 10 до 22 км (Лоция..., 1996). Максимальные глубины Амурского залива не превышают 50 м на крайнем южном участке при средней глубине 15 м (Григорьев, Зуенко, 2005).

В зимний период максимальные значения солености достигают 35‰ (Тищенко и др., 2011), при этом происходит интенсивное охлаждение вод и льдообразование. Летний сезон характеризуется минимальной соленостью на

поверхности. В северной части залива соленость может понижаться до 3‰ (Подорванова и др., 1989).

### ***1.4.3. Реки Артемовка, Шкотовка и Уссурийский залив***

Река Артемовка берет начало на юго-западном склоне горы Пржевальского (южная часть горной системы Сихотэ-Алиня), течет в южном направлении и после впадения в нее самого крупного ее притока – р. Кневичанки впадает в бух. Муравьиную, которая расположена в кутовой части Уссурийского залива (рис. 1.1.). Крупнейший из расположенных в бассейне реки Артемовки населенный пункт – г. Артем (население – более 100 тыс. человек). Длина Артемовки – 73 км, площадь водосбора до створа в п. Штыково в 13 км от устья – 894 км<sup>2</sup>. Ширина реки в районе истока равна нескольким метрам, к устью она увеличивается до 250 м, преобладающая глубина – от 0,4 до 0,6 м. В 1978 году в верховьях реки построено Артемовское водохранилище, площадь его водосбора составляет 488 км<sup>2</sup>, площадь зеркала около 11 км<sup>2</sup>. Водоохранилище используется для водоснабжения городов Владивосток, Артем, пос. Шкотово.

Среднегодовой расход составляет 8,49 м<sup>3</sup>/с (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972). Однако станция наблюдения ПУГМС расположена выше основного притока Артемовки – р. Кневичанки, влияние которой на общий расход Артемовки не учитывается. В водном режиме реки Артемовки наблюдается весеннее половодье в период с апреля по май, с наибольшим среднемесячным расходом в мае 48,3 м<sup>3</sup>/с. В летние паводки наибольший среднемесячный расход воды составляет 76,0 м<sup>3</sup>/с. Абсолютная величина расхода в период летнего паводка может достигать 224 м<sup>3</sup>/с (1968 г.) а на пике весеннего половодья 119 м<sup>3</sup>/с (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972). В период зимней межени средний расход 0,53 – 0,68 м<sup>3</sup>/с, наименьший среднемесячный расход за период 1963–1970 составляет 0,18 м<sup>3</sup>/с. Среднемесячный расход в период летней межени составляет 1,07 м<sup>3</sup>/с.

Средняя дата прохождения температуры воды весной через 0,2°C в районе поста в п. Штыково – 02-ое апреля. После этого температура воды равномерно

растет достигая среднемесячных значений  $19,4^{\circ}\text{C}$  в августе. Максимальная температура воды, зафиксированная на посту в п. Штыково –  $25,0^{\circ}\text{C}$ . Средняя дата прохождения температуры воды осенью через  $0,2^{\circ}\text{C}$  – 25-ое ноября. (Многолетние данные., 1986). Лед образуется в конце в начале декабря. Вскрытие реки происходит в конце марта.

Река Шкотовка берет начало на северо-западном склоне хребта Большой Воробей (южная часть Сихотэ-Алиня), течет в южном направлении и впадает тоже в бух. Муравьиную Уссурийского залива. В бассейне реки расположено несколько мелких населенных пунктов. Длина реки – 59 км, площадь водосбора реки до створа в п. Шкотово в 2,9 км от устья реки –  $706 \text{ км}^2$  (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972).

Среднемноголетний расход реки за период 1963–1970 составляет  $6,24 \text{ м}^3/\text{с}$  (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972). В весеннее половодье в мае наибольший среднемесячный расход за период 1963–1970 составляет  $30,3 \text{ м}^3/\text{с}$ , а для периода паводков летом  $37,5 \text{ м}^3/\text{с}$  в августе.

Абсолютная максимальная величина расхода реки в период летне-осенних паводков достигает  $127 \text{ м}^3/\text{с}$  (1968 г.), а на пике весеннего половодья  $73,9 \text{ м}^3/\text{с}$  (ресурсы поверхностных вод СССР, 1972).

Средняя дата прохождения температуры воды весной через  $0,2^{\circ}\text{C}$  в районе поста в п. Шкотово – 21-ое марта. После этого температура воды равномерно растет достигая среднемесячных значений  $19^{\circ}\text{C}$  в августе. Максимальная температура воды, зафиксированная на посту в п. Штыково –  $24,3^{\circ}\text{C}$ . Средняя дата прохождения температуры воды осенью через  $0,2^{\circ}\text{C}$  – 29-ое ноября. (Многолетние данные., 1986). Ледостав устанавливается в начале декабря. Сходит лед в марте.

Уссурийский залив занимает северо-восточную часть залива Петра Великого. С северо-запада он ограничен полуостровом Муравьев-Амурский, островом Русский и островами, лежащими к юго-западу от него. С востока залив ограничен материковым берегом и островом Аскольд. Границей залива на юге считается линия, соединяющая южные оконечности островов

Желтухина и Аскольд. Наибольшая ширина залива на входе достигает 57 км. (Лоция, 1996).

В залив впадает множество рек и ручьёв. Наиболее значимые из них - реки Артёмовка и Шкотовка, впадающие в б. Муравьиная, и реки Суходол и Петровка, впадающие в б. Суходол.

Глубины в заливе с приближением к его вершине постепенно уменьшаются. У входа в Уссурийский залив глубины составляют 60–70 м, далее уменьшаются до 35 м в средней части залива и до 2–10 м в вершине (Навигационная Карта «Северная часть Уссурийского залива»).

Максимальные значения солёности воды в южной глубоководной части зал. Петра Великого в течение года варьируют от 33,5 до 34,0‰ (Лучин и др., 2005). По направлению к кутовой части Уссурийского зал. солёность воды существенно снижается в зависимости от интенсивности речного стока. Амплитуда приливо-отливных колебаний уровня в акватории Уссурийского залива может достигать 50 см (Ластовецкий, Вещева, 1964).

#### ***1.4.4. река Партизанская и залив Находка***

Река Партизанская (до 1972 г. Сучан) берет свои истоки на южных отрогах хребта Сихотэ-Алинь (Приморский край) и впадает в северную часть залива Находка (Японское море) вблизи одноименного города (рис. 1.1.). Река и ее притоки имеют горный характер в верхнем течении и полугорный в нижнем течении: быстрое течение, каменисто-галечное дно, пороги и перекаты.

Площадь водосбора реки – 3120 км<sup>2</sup> в створе г. Партизанск (Многолетние данные., 1986), и 4140 км<sup>2</sup> в устьевом створе (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1972); длина составляет 142 км. Среднегодовой расход реки за период с 1958 по 1980 гг. равен 31,6 м<sup>3</sup>/с и 41,9 м<sup>3</sup>/с в створе г. Партизанск и в устьевом створе, соответственно (Многолетние данные., 1986).

В водном режиме реки Партизанской выделяется три фазы: зимняя межень, весеннее половодье и летне-осенние паводки. Половодье обычно начинается в марте – апреле, достигает своего пика в апреле – начале мая, а

заканчивается в конце мая – начале июня. В устье реки максимальный суточный расход на пике половодья может превышать  $450 \text{ м}^3/\text{с}$  (здесь и далее расчеты характеристик речного стока ориентировочные рассчитанные по данным ближайшего к устью поста). В течение всего теплого периода возможны дождевые паводки, особенно интенсивные в августе – сентябре. В большинстве случаев годовые максимумы паводков превышают наибольшие расходы половодья и составляют около  $650 \text{ м}^3/\text{сек}$ , но иногда достигают  $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ . Летняя и осенняя межень обычно многоводная и прерывистая, а иногда отсутствует. В этот период минимальные расходы воды в устьевом створе составляют в среднем около  $11,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а в отдельные годы они могут понижаться до  $4,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Зимняя межень более устойчива: в период ледостава минимальные расходы воды понижаются в среднем до  $3,0 \text{ м}^3/\text{с}$ , а в отдельные годы до  $1,0 \text{ м}^3/\text{с}$  (Многолетние данные..., 1986).

Средняя дата прохождения температуры воды весной через  $0,2^\circ\text{C}$  в районе поста в г. Партизанске – 2-ое апреля. После этого температура воды равномерно растет до  $19,3^\circ\text{C}$  в конце июля – начале августа. Максимальная температура воды, зафиксированная на посту в г. Партизанске –  $27,4^\circ\text{C}$ . Средняя дата прохождения температуры воды осенью через  $0,2^\circ\text{C}$  – 2-е декабря (Многолетние данные..., 1986). Средняя дата начала ледостава – 7 и 12 декабря в с. Молчановка и в г. Партизанске, соответственно. Река освобождается ото льда 5–10 апреля (Многолетние данные..., 1986).

Залив Находка является заливом второго порядка ЗПВ, располагаясь в его восточной части. В годовом ходе минимум температуры воды на поверхности в заливе Находка наблюдается в январе – феврале, максимум в августе. Согласно данным с ГМС Поворотный ( $18,5 \text{ км}$  от устья) в период с 1918 по 1964 гг. средняя дата прохождения температуры воды весной через  $0^\circ\text{C}$  31-ое марта. После этого температура воды равномерно растет до середины августа. На ближайшей к устью ГМС в г. Находка средняя температура воды в июле и августе за период с 1933 по 1970 гг.  $17,85$  и  $20,54^\circ\text{C}$  соответственно. Максимальная за указанный период среднемесячная температура воды в

августе на посту в г. Находка – 26,8°C. Равномерное понижение температуры воды в осенние месяцы сопровождается переходом через 0°C 1 декабря (Супранович, Якунин, 1976).

Сезонный ход солености воды в заливе Находка характеризуется минимумом летом и максимумом зимой, что определяется внутригодовыми колебаниями стока реки Партизанской. Для кутовой части залива Находка с 15 июня по 30 сентября характерная соленость 26–28‰. По прибрежным наблюдениям на ГМС Поворотный минимум солености около 30‰ наблюдается в июле – августе а максимум, свыше 34‰ по всей толще вод, наблюдается в ноябре – декабре. В теплый период года соленость с глубиной значительно увеличивается. С апреля по сентябрь на горизонте 10 м соленость составляет 33,5‰ (Супранович, Якунин, 1976).

Приливные колебания носят неправильный полусуточный характер. Средняя величина сизигийного прилива в ЗПВ колеблется от 15 см до 20 см (Подорванова и др., 1989). Сравнительно низкая величина прилива (20 см) в акватории залива Находка позволяет отнести эстуарий реки Партизанской к микроприливным эстуариям (Davies, 1964).

Скорость течения в заливе Находка в среднем не превышает 20 см/с. Вблизи устья реки Партизанской скорость стокового течения в период паводка реки достигает 180 см/с (Лоция, 1996).

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гипоксия природных вод во многих случаях является индикатором нарушения устойчивости экосистем. Для понимания устойчивости экосистемы, необходимо исследование многих ее характеристик, таких как гидролого-гидрофизические (температура, соленость, динамика вод), гидрохимические (концентрации биогенных веществ, кислорода, органического углерода и разных форм неорганического углерода), гидробиологические (освещенность, хлорофилл *a* и фитопланктон, бактериопланктон). Ниже приведены методики изучения всех этих факторов, за исключением, концентраций и видового состава фитопланктона и бактерий, которые изучались по литературным данным.

В ходе гидрохимических исследований пробы воды отбирали с двух горизонтов – поверхностного и придонного. В эстуариях, положение станций для отбора проб выбралось исходя из дальности проникновения морских вод в реку, характера зоны смешения, и распространения речных вод в море, так чтобы конечные станции на профиле вдоль максимальных глубин реки отражали характеристики речных и морских вод без смешения. Речная граница ЗС выделялась по соложению изолинии 1‰, внутреннюю и внешнюю часть эстуария определяли относительно устьевого бара реки (Михайлов, 1997). Общее количество станций в том или ином эстуарии в конкретную гидрологическую фазу было от 7 до 19.

### 2.1. Гидрохимические исследования

В пробах определялись следующие гидрохимические параметры: соленость, рН, общая щелочность (ТА – Total Alkalinity), концентрация  $O_2$ , главных биогенных веществ (силикаты, фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний), С орг, гумусового вещества, содержание хлорофилла *a*. Измерения рН, концентрации  $O_2$ , фильтрация на хлорофилл проводили в день отбора проб, другие измерения проводились на следующий день.

Для расчета параметров карбонатной системы *in situ* на каждой станции проводилось CTD-зондирование профилографами SBE 19plus или Rinko profiler, оснащенными датчиками температуры, электропроводности, хлорофилла *a*, освещенности, мутности и O<sub>2</sub>, данные с которых также анализировались.

Измерение солености в пробах проводили в лабораторных условиях солемером Guildline Portasal, модель 8410. Точность измерений в соответствии с паспортными данными прибора составляла  $\pm 0,003\%$ .

Величину pH измеряли по новому потенциометрическому методу, разработанному П.Я. Тищенко для морских (Тищенко и др., 2001) и эстуарных вод (Тищенко и др., 2002). Ошибка измерений, не превышала  $\pm 0,003$  ед. pH (Тищенко, 2007а,б).

Анализ проб на щелочность проводили прямым титрованием в открытой ячейке соляной кислотой (0,02N) со смешанным индикатором (метиловый красный + метиленовый голубой) (Бруевич, 1944). Воспроизводимость титрования составляла  $\pm 2,6$  мкмоль/кг. Точность метода соответствует его воспроизводимости (Павлова и др., 2008).

На основании измерений pH и TA был проведен расчет других компонентов карбонатной системы –  $pH_{in situ}$ , концентрации растворенного неорганического углерода *DIC* и парциального давления углекислого газа ( $pCO_2$ ). Общепринятый детальный расчет карбонатной системы морской воды изложен в работах (DOE, 1994; Dickson et al., 2007). Главные элементы новизны подходов использованных в данной работе состоят в двух обстоятельствах. Во-первых, при расчетах использовались константы диссоциации угольной кислоты, которые экспериментально измерялись в диапазоне соленостей 1,5–40‰ и диапазоне температур 0–30°C. Во-вторых, содержание щелочности корректировалось на присутствие гуматов и хлорофилла в исследуемых пробах (Тищенко и др., 2005а, 2006б).

Определение биогенных веществ проводили по стандартной методике (Методы., 1988; Современные методы., 1992) с использованием фотометра КФК-3. Относительная ошибка определения силикатов составляла не более 2%

при содержании последних 100 мкмоль/кг. Относительная ошибка определения нитритов составляла 15% при содержании ~ 0,1 мкмоль/кг. Относительная ошибка определения нитратов составляла 2% при содержании 20 мкмоль/кг.

На основании подхода, применённого в работе Т.А. Михайлик др., (2011) для расчета потоков биогенных веществ рекой Раздольной в 2008 году, были рассчитаны суточные, среднегодовые и суммарные годовые потоки биогенных веществ со стоком рек Туманной, Партизанской, Артемовкой, Шкотовкой, Кневичанкой и Амба для 2013 г. В расчетах использовались измеренные концентрации биогенных веществ, в разные гидрологические фазы рек и данные ежедневных, среднесуточных расходов рек предоставленные Прим. Гидромет. службой для 2013 года. В р. Туманной измерения расхода воды ведутся только на китайской гидрологической станции в г. Quanhe. Для расчета среднесуточных величин расхода реки Туманной использовалась зависимость этого расхода от расхода р. Раздольная, полученная на основании пяти измерений расхода воды после прохождения тайфуна Булавин в 2000 г. (рис 2.1.), сделанных службой ПУГМС в пос. Хасан, расположенного на расстоянии 14 км от устьевого створа реки Туманной.

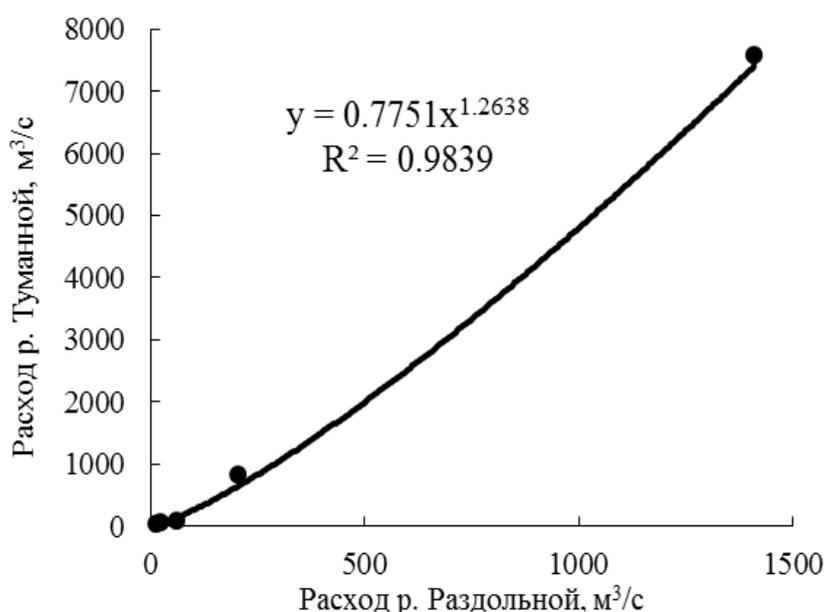


Рис. 2.1. Соотношение расхода реки Туманной (результаты работ ПУГМС в п. Хасан) и Раздольной после прохождения тайфуна булавин в 2000 г. На основании представленного уравнения рассчитывается расход реки Туманной для расчета потоков биогенных веществ в 2013 г.

Растворенный кислород определяли модифицированным методом Винклера, (Carpenter, 1965), с точностью  $\pm 0,005$  мл/л.

Концентрацию хлорофилла *a* и гуминов измеряли спектрофотометрическим методом на спектрофотометре Shimadzu 3600. Ошибка метода составляла менее 10% (Звалинский и др., 2010). Содержание Сорг определялось на анализаторе модели TOC-VCPN SSM-5000A фирмы «Shimadzu». Методика определения хлорофилла *a*, С орг и гуминовых веществ приводится в работе (Марьяш и др., 2010).

## **2.2. Суточные гидрометеорологические исследования**

В 2014 г. были проведены внутрисуточные гидрометеорологические исследования в эстуариях рек Раздольной, Партизанской, Артемовки и Шкотовки в зимний и летний сезоны. Летние исследования в эстуарии реки Партизанской были проведены в июне 2015 г. Полевые работы включали следующий комплекс измерений: внутрисезонные и внутрисуточные наблюдения за уровнем воды в разных точках эстуария, а также в Амурском заливе и в открытой части ЗПВ; внутрисуточные измерения течений; STD – зондирование вдоль зоны смешения через каждые три часа в течение суток; наблюдения за метеоусловиями и волнением.

В эстуарии реки Раздольной зимой полевые работы проводились 23.01–24.01.2014, летом в период 09.06–10.06.2014. В эстуарии реки Партизанской зимой полевые работы проводились 18.02–19.02.2014 и осенью, в период 14.09–19.09.2015. В эстуарии реки Артемовки зимой в период 26.02–27.02.2014, летом в период 26.06–27.06.2014. В эстуарии реки Шкотовки зимой и летом соответственно в период 10.03–11.03.2014 и 25.09–26.09.2014.

В период зимних съемок эстуарии рек были покрыты льдом толщиной 50–70 см. В этом случае исключается влияние ветра на циркуляцию и структуру вод в эстуарии. Для оценки распространения приливной волны в акватории Амурского залива и в эстуарии реки Раздольной использовались данные

долгопериодных измерений давления с трех автономных буйковых станций (АБС). Измерение давления на АБС 1 (район изобаты 100 м, координаты: 42° 30,720' с.ш., 131° 47,820') производилось с помощью гидрологического зонда RBR XRX – 620 (Канада) в течение зимнего сезона. Измерения на АБС 2 и АБС 3 производились с помощью систем Water Quality Monitor (WQM) компании WET Labs (США). В Амурском заливе станция располагалась на расстоянии 10 км от устьевого бара на глубине 20 м (координаты 43° 10.910' с.ш., 131° 50.300' в.д.). АБС 3 располагалась на расстоянии 15 км от устьевого бара выше по реке на глубине 6 м (координаты 43° 24.064' с.ш., 131° 48.517' в.д.). Измерения давления с помощью WQM в Амурском заливе производились в течение всего года с интервалом 4 часа, за исключением летнего сезона, когда интервал составлял 1 час, реке измерения проводились в зимний сезон с интервалом 1 час. Летом за уровнем наблюдали с помощью измерительной рейки. В ходе суточных экспедиционных работ во всех эстуариях уровень фиксировали непосредственно в районе постановки измерителей течений по измерительным рейкам.

Измерения течений проводились с помощью заякоренной АБС, которая состояла из четырёх электромагнитных измерителей течений Infiniti-EM (Япония), последовательно соединенных между собой. С помощью системы растяжек и буёв обеспечивали жёсткость постановки АБС. Станция располагалась в наиболее глубоководном месте створов исследуемых эстуариев. Глубины измерялись в процессе предварительного подробного промера эхолотом. Разрешение и погрешность измерителей составляют соответственно 0,02 см/с и  $\pm 1$  см/с по скорости, и 0,01° и  $\pm 2^\circ$  по направлению. Измерения производились в течение двух – трех суток в зимний и летний сезоны. Отчет приборов производился каждую секунду в течение одной минуты, после чего в измерениях следовала 10-ти минутная пауза. Каждый минутный цикл измерений был усреднен, в результате на график были нанесены усредненные данные скорости и направления течений каждого цикла измерений течений с интервалом в 10 минут.

Зондирование проводилось вдоль профиля наибольших глубин эстуария с использованием профилографа SBE 19 plus. Зонд оснащался датчиками температуры, электропроводности, мутности, концентрации хлорофилла а. Измерения проводились на разрезе, проходящем через область смешения, через каждые три часа в течение одних суток. Зимой по льду передвигались на автомобиле. На выполнение каждого разреза затрачивалось приблизительно 2 часа. Летом, для оперативного выполнения профиля, работали с бортов двух моторных лодок с использованием двух идентичных профилографов SBE 19 plus (с одной лодки выполняли работы в верхней части эстуария, с другой лодки выполняли нижнюю часть эстуария). Обе части разреза начинали синхронно выполнять через каждые три часа. Время выполнения всего разреза составляло 1 час.

## ГЛАВА 3. ДИНАМИКА ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ И СТРУКТУРА ВОД В ЭСТУАРИЯХ

### 3.1. Эстуарий р. Туманной

Река Туманная впадает в Японское море на западной границе ЗПВ (рис. 3.1) водотоком с шириной в устьевом створе коло 250м. Вдоль русла проходит государственная граница между РФ и КНДР.

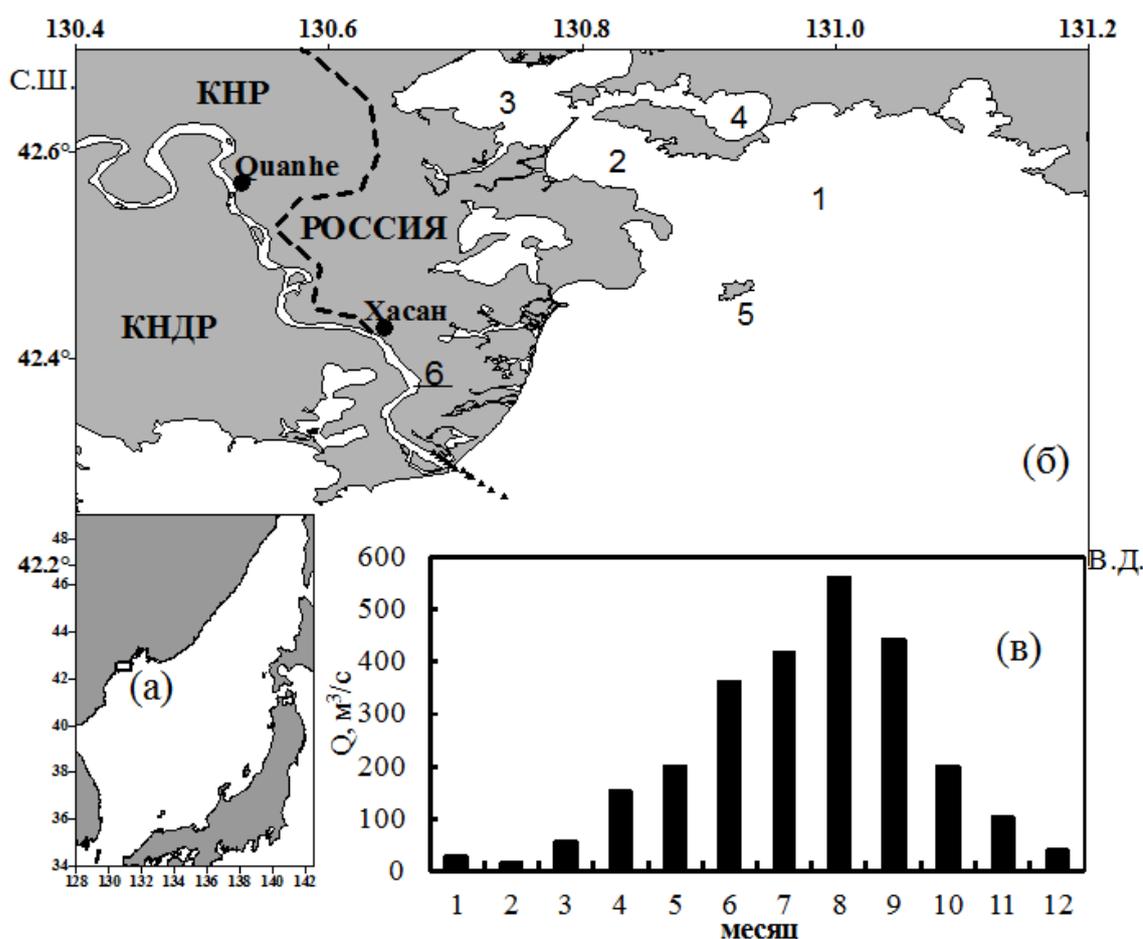


Рис. 3.1. (а) – Японское море, прямоугольником отмечен район исследования; (б) – треугольниками показано расположение гидрохимических станций, выполненных в эстуарии р. Туманной 18 мая и 22 октября 2015 г.; точками отмечены гидрохимические станции, выполненные в заливе Посьета и прилегающих акваториях. 1 – открытая часть залива Посьета, 2 – б. Рейд Паллада, 3 – б. Экспедиции, 4 – б. Новгородская, 5 – о. Фуругельма, 6 – р. Туманная. Пунктиром показана сухопутная граница между Россией и Китаем; (в) – среднемесячный расход р. Туманной на основе результатов гидрологической станции в Quanhe (Wei et al., 1999).

Результаты зондирования температуры и солёности позволили установить, что речная граница ЗС выделяема по изогалине 1‰ (Михайлов 1997) распространяется на три километра выше по течению от бара реки (рис. 3.2). Также были определены положения фронтальных зон и глубина халоклина.

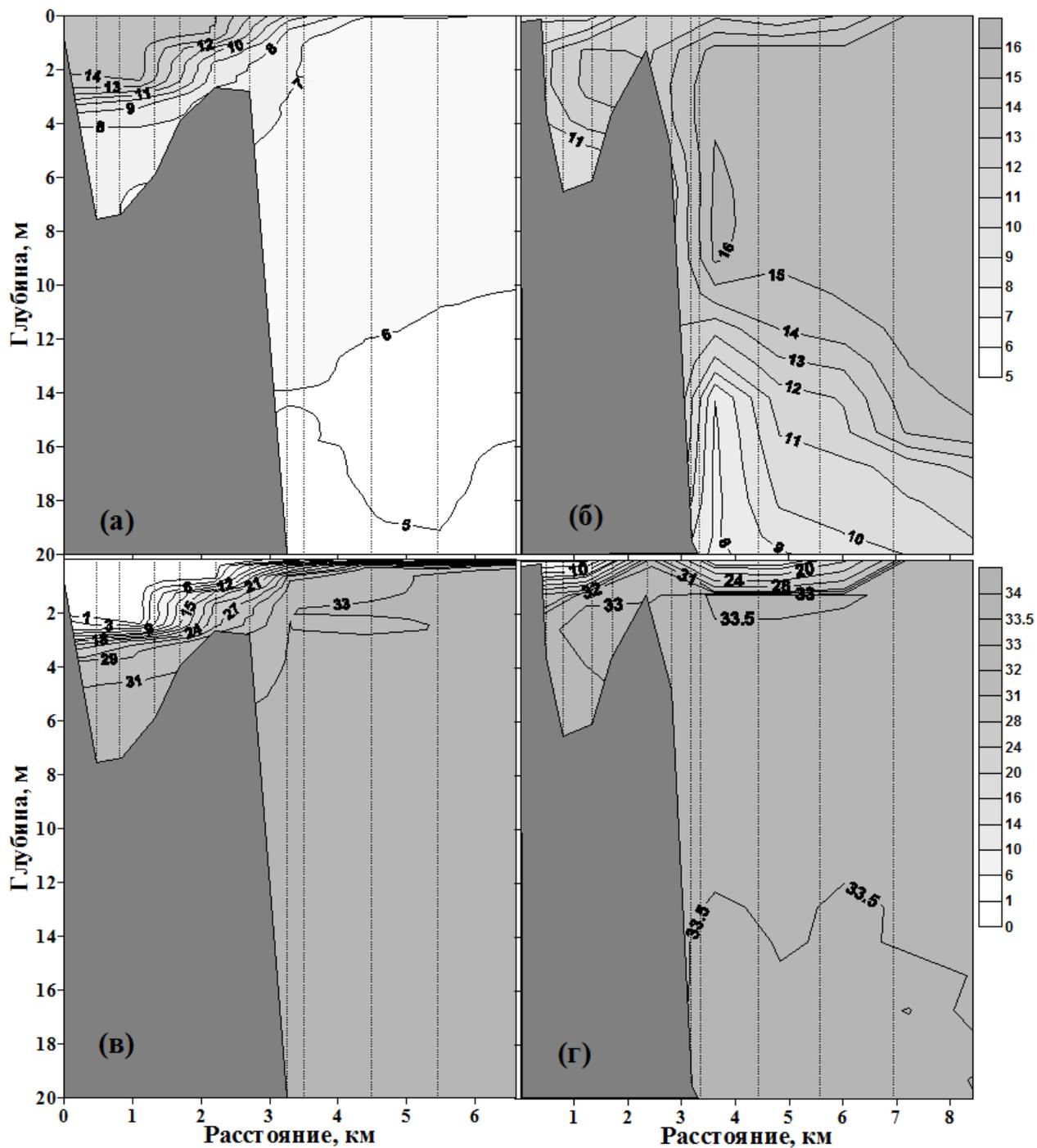


Рис. 3.2. Распределение гидрологических характеристик по данным зондирования в профиле наибольших глубин р. Туманной. (а, б) – Температура ( $^{\circ}\text{C}$ ), (в, г) – Соленость ( $\text{‰}$ ). (а, в) – май, 2015 г.; (б, г) – октябрь, 2015 г. Река слева.

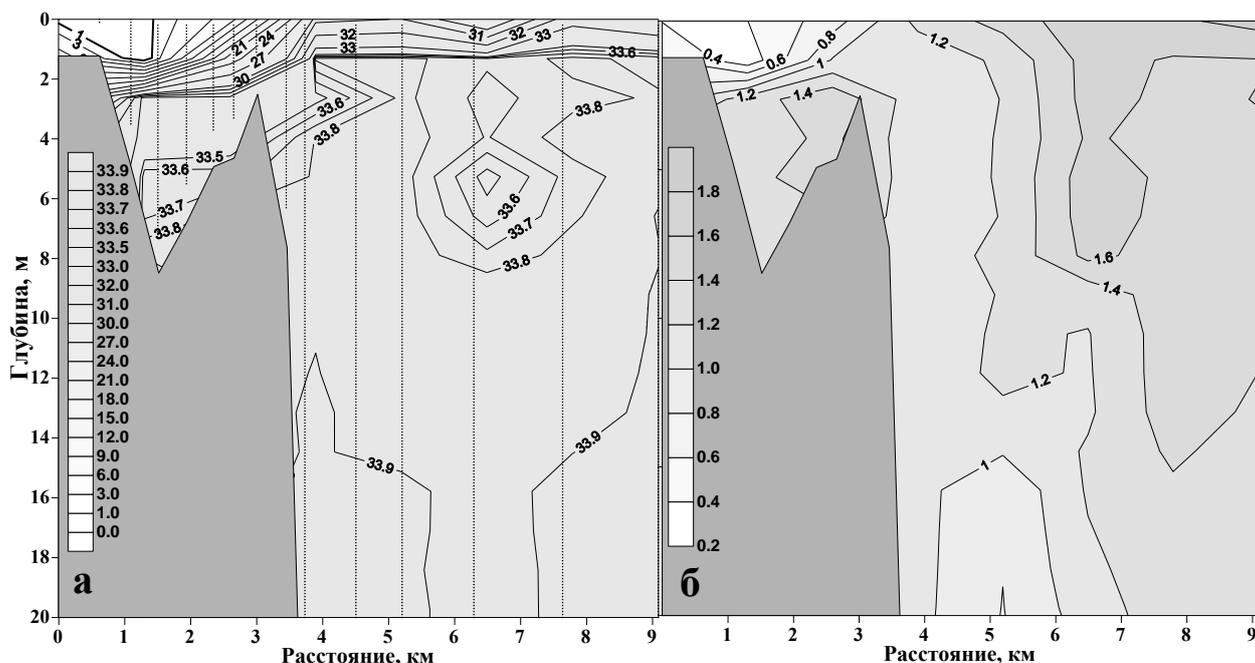


Рис. 3.3. Распределения солености (а) и температуры (б) по данным зондирования на разрезе р. Туманная – ЗПВ (река - слева). 21 марта 2016 г.

Данные  $T$ ,  $S$  – зондирования (рис. 3.2, 3.3) позволили примерно оценить объем пресной воды во внутренней части эстуария – около  $6 \times 10^6 \text{ м}^3$  (глубина 2,5 м, ширина 800 м, длина 3 км). Зная среднегодовой расход реки ( $215 \text{ м}^3/\text{с}$ ; Wei et al., 1999), можно по известному соотношению (Priya et al., 2012) рассчитать время, необходимое для полной замены пресных вод во внутренней части эстуария (время “жизни” пресных вод):

$$T_f = V / Q. \quad (3.1)$$

Здесь  $T_f$  – время “жизни” пресных вод в эстуарии (flushing time),  $V$  – объем пресных вод,  $Q$  – расход реки. Из соотношения (1) следует, что величина  $T_f = 7,8$  час для среднего расхода воды, равного  $215 \text{ м}^3/\text{с}$ . Расход воды сильно зависит от сезона (рис. 1в). При минимальном расходе в зимний сезон “время жизни” увеличивается в 10 раз, т.е. до 3-х суток. В паводок оно сокращается до 2,5 часов.

Более детальные гидролого-гидрохимические исследования нижнего течения и эстуария р. Туманной были проведены в 2017 году. Работы выполнялись со стороны п. Хасан 15,16 февраля, 25,26 апреля и 19,20 июля. В октябре эстуарий реки изучался со стороны моря (использовалась надувная лодка для отбора проб воды, которые анализировались на борту НИС

”Академик Опарин”). В этом случае максимальное проникновение ЗС от бара р. Туманной вверх по течению составляет около 4,5 км в зимний сезон (рис. 3.4).

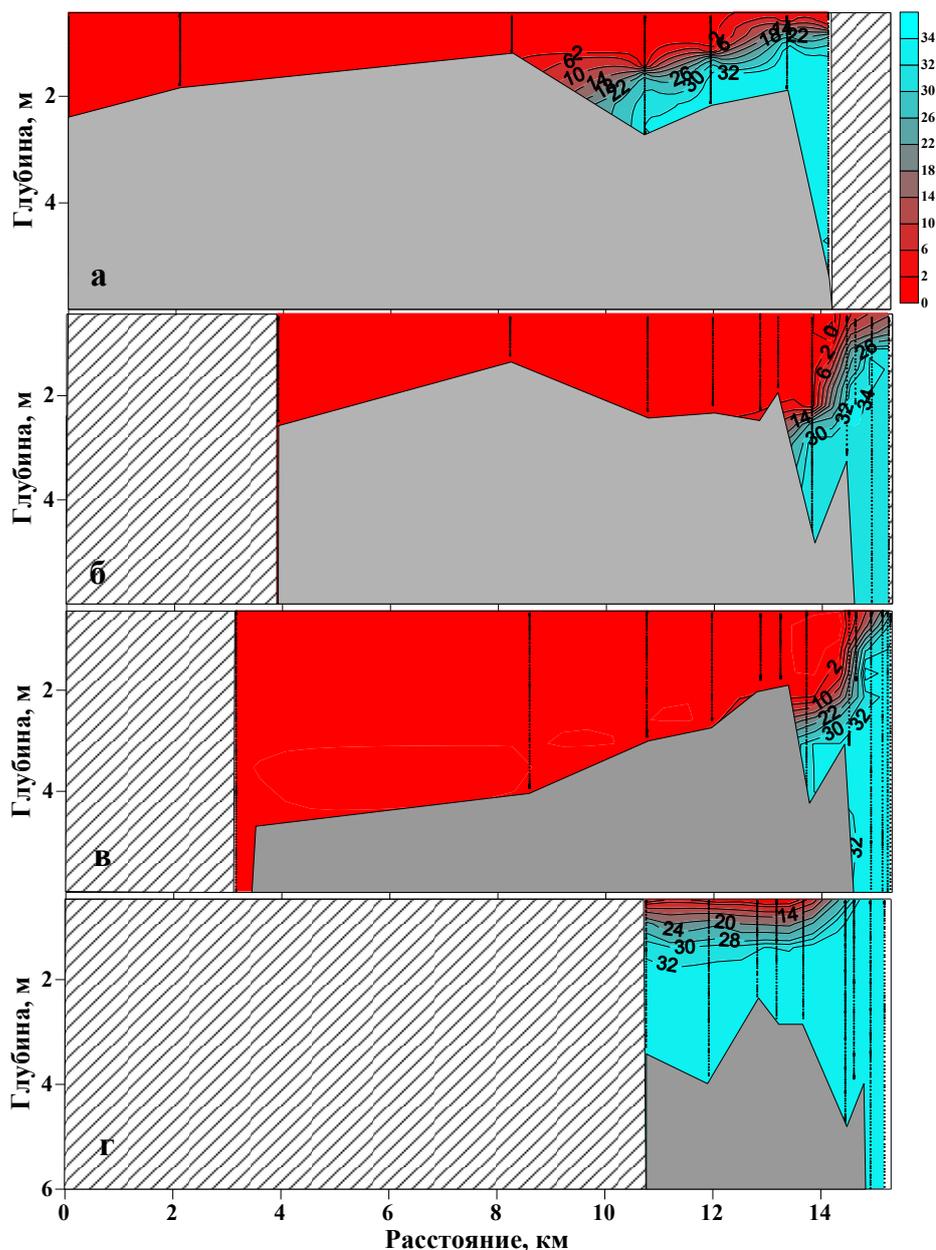


Рис.3.4. Изменчивость солености воды (‰), вдоль профиля наибольших глубин эстуария р. Туманной в разные сезоны 2017 г.: а – 15, 16 февраля; б – 25, 26 апреля; в – 19, 20 июля ; г – 28 октября.

Существенное проникновение ЗС вод произошло в октябре, к сожалению, верхняя граница проникновения морских вод не была установлена. В соответствии с профилем солености (рис. 3.2-3.4) эстуарий р. Туманной можно отнести к русловому типу (Михайлов, 2012). Для такого типа эстуария объемы поступления морской воды в эстуарную область намного меньше объемов поступления пресной воды (Долгополова, Исупова 2010).

### 3.2. Эстуарий р. Раздольной

Зависимость положения зоны смешения от расхода воды в паводковый и меженный режимы для эстуария реки Раздольной впервые было показано в работе В. И. Звалинского с соавторами (Звалинский и др., 2005). Величины расходов воды р. Раздольной на даты полевых измерений и дальность проникновения ЗС, определяемая по предельному положению изогалины 1‰, представлена в табл. 3.1. Работы в январе 2014 г. были выполнены в зимнюю межень при расходе реки 6 м<sup>3</sup>/с. При этом наблюдалась наибольшая дальность (30 км) проникновения ЗС от устьевого бара. Весной, 2011 г. пик половодья был зафиксирован 19 мая (расход реки 730 м<sup>3</sup>/с), наши исследования проводились на спаде половодья при расходе 393–222 м<sup>3</sup>/с (табл. 3.1.). ЗС в этот период была полностью вытеснена в Амурский залив. В августе 2011 г. наблюдения выполнялись в условиях межени при расходе реки 22,0 м<sup>3</sup>/с, граница ЗС наблюдалась на расстоянии 22 км от устьевого бара реки.

Таблица 3.1. Расходы воды в с. Тереховка и дальность проникновения зоны смешения от устьевого бара реки.

Период исследований	Расход реки, м <sup>3</sup> /с	Расстояние от устьевого бара до речной границы зоны смешения, км
23.01.2014 (ледостав)	6,0	28,0
25–30.05.2011	393,0–222,0	0,0
16–17.08.2011	22,7	22,0

Структура ЗС в русле эстуария в разные сезоны представлена на рис. 3.5.

Для большей части ЗС вертикальный градиент солености составлял около 12‰ на 1 м. Зимой, поверхность эстуарного барьера с соленостью 1–8‰ (Михайлов, Горин, 2012) имеет максимальное протяжение и занимает все пространство от устьевого бара до вершины ЗС. То есть речные воды в эстуарии натекают на слой осолоненных вод. Это возможно благодаря малой турбулентности речного потока в период низкой водности и отсутствию ветрового перемешивания в условиях ледостава.

В период открытого русла протяженность эстуарного барьера становится меньше, а наклон изогалин существенно возрастает. И чем больше расход реки, тем меньше размеры эстуарного барьера в эстуарии, а в паводковый период эстуарный барьер вытеснен на пределы устьевого бара реки (рис. 3.5.). Следовательно, ситуация с вытеснением ЗС за пределы устьевого бара встречается ежегодно и судя по данным расхода (рис. 3.5.), возможна в любой месяц с апреля по октябрь. Продолжается это явление, как видно из наших данных, полученных в мае 2011, более двух недель.

Согласно современной классификации (Михайлов, Горин, 2012) данный эстуарий можно отнести к лиманному типу с сильной стратификацией вод (Долгополова, Исупова, 2010).

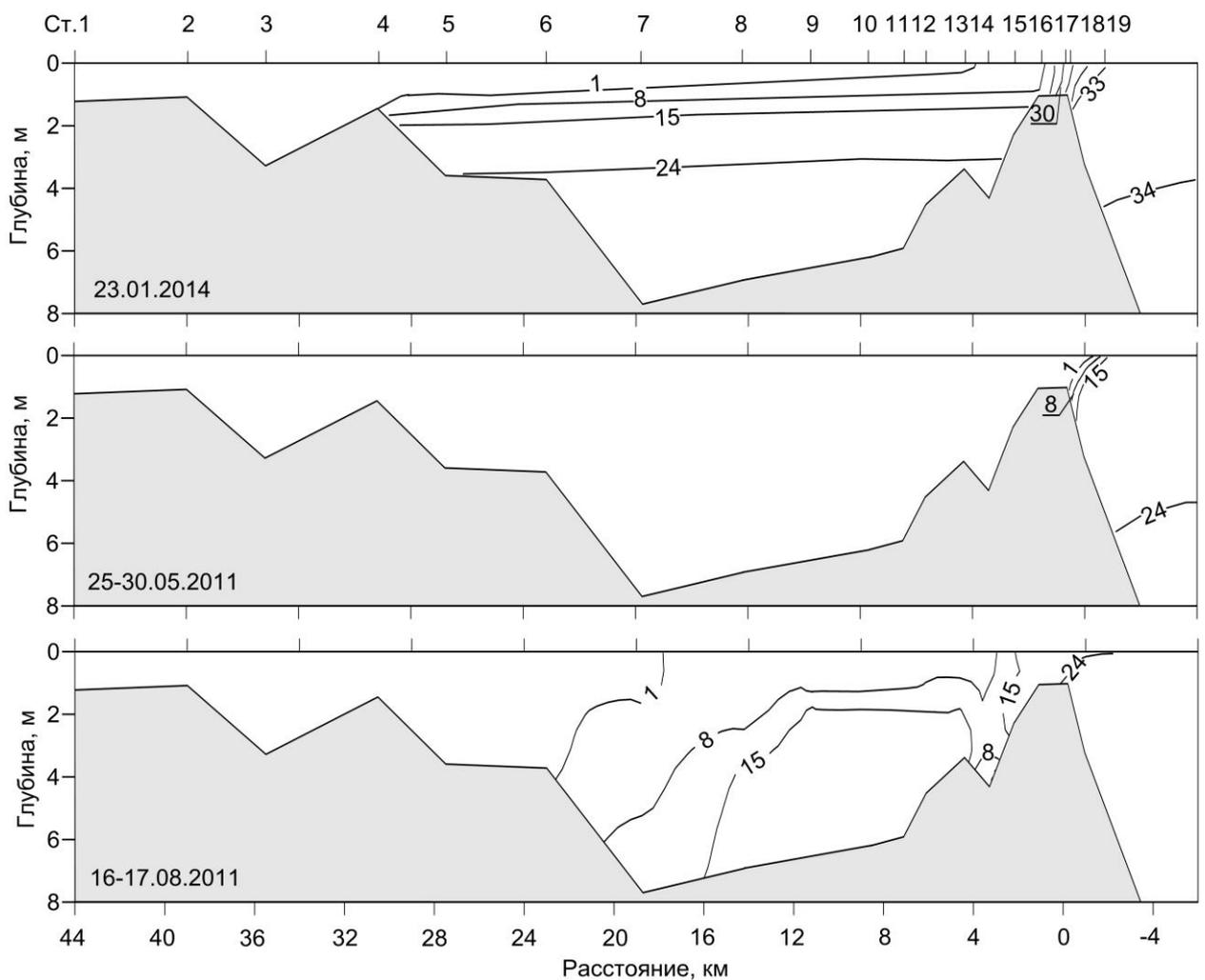
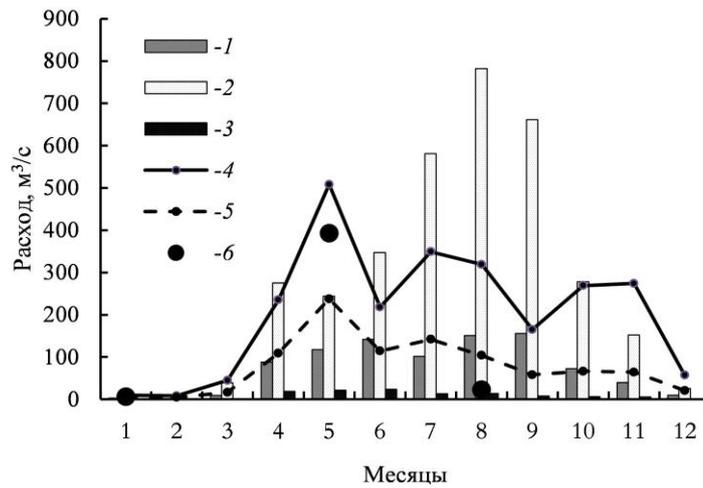


Рис. 3.5. **а** – Средние (1), максимальные (2) и минимальные (3) за многолетний период (1963–1970 гг.) величины среднемесячных расходов воды в п. Тереховка (Многолетние данные., 1986); 4, 5 соответственно максимальные и минимальные величины среднемесячных расходов воды с 2008 по 2014 гг. **б** – изменчивость солености воды (‰) в продольном профиле эстуария р. Раздольной. 23 января 2014 г., расход реки –  $6 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 25–30 мая 2011 г., расход реки –  $393\text{--}222 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 16–17 августа 2011 г., расход реки –  $22 \text{ м}^3/\text{с}$ . Слева – река, справа – море. Расстояния от гребня устьевых бара реки.

### 3.3. Эстуарий р. Партизанской

Величины расходов воды р. Партизанской на даты полевых измерений были приблизительно рассчитаны по данным ближайшего к эстуарию стокового поста в с. Молчановка. Работы в феврале 2016 г. были выполнены в зимнюю межень при расходе реки 7,7 м<sup>3</sup>/с. Весной, 2012 г. пик половодья наблюдался 10 мая (расход реки 84,45 м<sup>3</sup>/с), наши исследования проводились на спаде половодья при расходе 73,67–65,9 м<sup>3</sup>/с (табл. 3.2.). В июле 2012 г. наблюдения выполнялись в межень при расходе реки 20,1 м<sup>3</sup>/с. Суточные наблюдения в феврале 2014 г. были выполнены при повышенном расходе реки, 11,9 м<sup>3</sup>/с (среднемноголетний расход реки в феврале 3,6 м<sup>3</sup>/с). Измерения в сентябре 2015 г. проведены при расходе реки 30,0 м<sup>3</sup>/с (среднемноголетний расход для сентября 69,3 м<sup>3</sup>/с).

Дальность проникновения ЗС, определяемая по предельному положению изогалины 1‰, представлена в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Расходы воды в замыкающем створе р. Партизанская и дальность проникновения зоны смешения от устьевых бара реки.

Период исследований	Расход реки, м <sup>3</sup> /с	Расстояние от устьевых бара до речной границы зоны смешения, км
28.02.2016 (ледостав) 18–19.02.2014	7,77	12,5
(ледостав) 18–19.07.2012	11,90	10,5
18–19.07.2012	20,11	11,0
15–16.09.2015	30,00	9,5
18–19.05.2012	73,67–65,9	5,0

Наибольшая дальность (12,5 км) проникновения ЗС от устьевых бара наблюдалась в период зимней межени в 2016, наименьшая (5 км) в период весеннего половодья в 2012 году. В феврале 2016 г. распространение ЗС было ограничено галечным перекатом, на расстоянии 12,7 км от устьевых бара (рис. 1) Выше этого переката уклон реки значительно больше, чем ниже переката, дно реки галечное, ниже – песчанное или илистое, а течение реки резко

снижается. Этот перекал можно считать вершиной эстуария, которая, как будет показано ниже, является верхней границей приливных колебаний.

Данные табл. 3.2. показывают практически линейную зависимость дальности проникновения ЗС от расхода реки, за исключением периода съемки в феврале 2014 г., когда речная граница ЗС находилась ниже по течению реки, чем в условиях большего расхода в летнюю межень. Это может объясняться ограничением проникновения осолоненных вод на перекалах в период ледостава.

Структура ЗС в русле эстуария в разные сезоны представлена на рис. 3.6.

Для большей части ЗС вертикальный градиент солености достигал 30‰ на 1 м. Зимой, поверхность эстуарного барьера с соленостью 1–8‰ (Михайлов, Горин, 2012) имеет максимальное протяжение и занимает все пространство от устьевого бара до вершины ЗС. То есть речные воды в эстуарии натекают на клин осолоненных вод. Это возможно благодаря малой турбулентности речного потока в период низкой водности и отсутствию ветрового перемешивания в условиях ледостава.

В период открытого русла протяженность эстуарного барьера становится меньше, а наклон изогалин существенно возрастает. И чем больше расход реки, тем меньше размеры эстуарного барьера (рис. 3.6). То есть в период повышенного речного стока смешение речных и морских вод интенсифицируется из-за более высокой турбулентности. Этому способствует ветровое перемешивание.

Следует отметить, что в данной работе наблюдения проведены при невысоком речном стоке. Однако полученная зависимость дальности проникновения и структуры ЗС от расхода реки хорошо согласуется с модельными и натурными результатами, полученными японскими учеными в аналогичном эстуарии реки Юра (Японское море) со средним годовым расходом речной воды 51,5 м<sup>3</sup>/с (Funahashi, 2013). Согласно модельным расчетам, для эстуария р. Юра, при расходе свыше 250 м<sup>3</sup>/с ЗС будет вытеснена за пределы устьевого бара, что наблюдается в период зимних половодий (Kasai,

2010; Watanabe, 2014). Приняв линейную зависимость между расходом реки и дальностью проникновения ЗС, как это представлено в [24], из наших данных следует, что ЗС реки Партизанской будет вытеснена за пределы устьевого бара при расходе около  $120 \text{ м}^3/\text{с}$ . Расход  $120 \text{ м}^3/\text{с}$  больше среднемесячных величин (рис. 3.6.), но в несколько раз меньше среднемаксимальных расходов половодья и дождевых паводков. Следовательно, ситуация с вытеснением ЗС за пределы устьевого бара встречается ежегодно и судя по данным (рис. 3.6.) возможна в любой месяц с апреля по ноябрь. Продолжается это явление, скорее всего, несколько суток, пока не пройдет пик половодья или паводка.

Согласно современной классификации (Михайлов, Горин, 2012) данный эстуарий можно отнести к русловому типу с сильной стратификацией вод (Долгополова, Исупова, 2010).

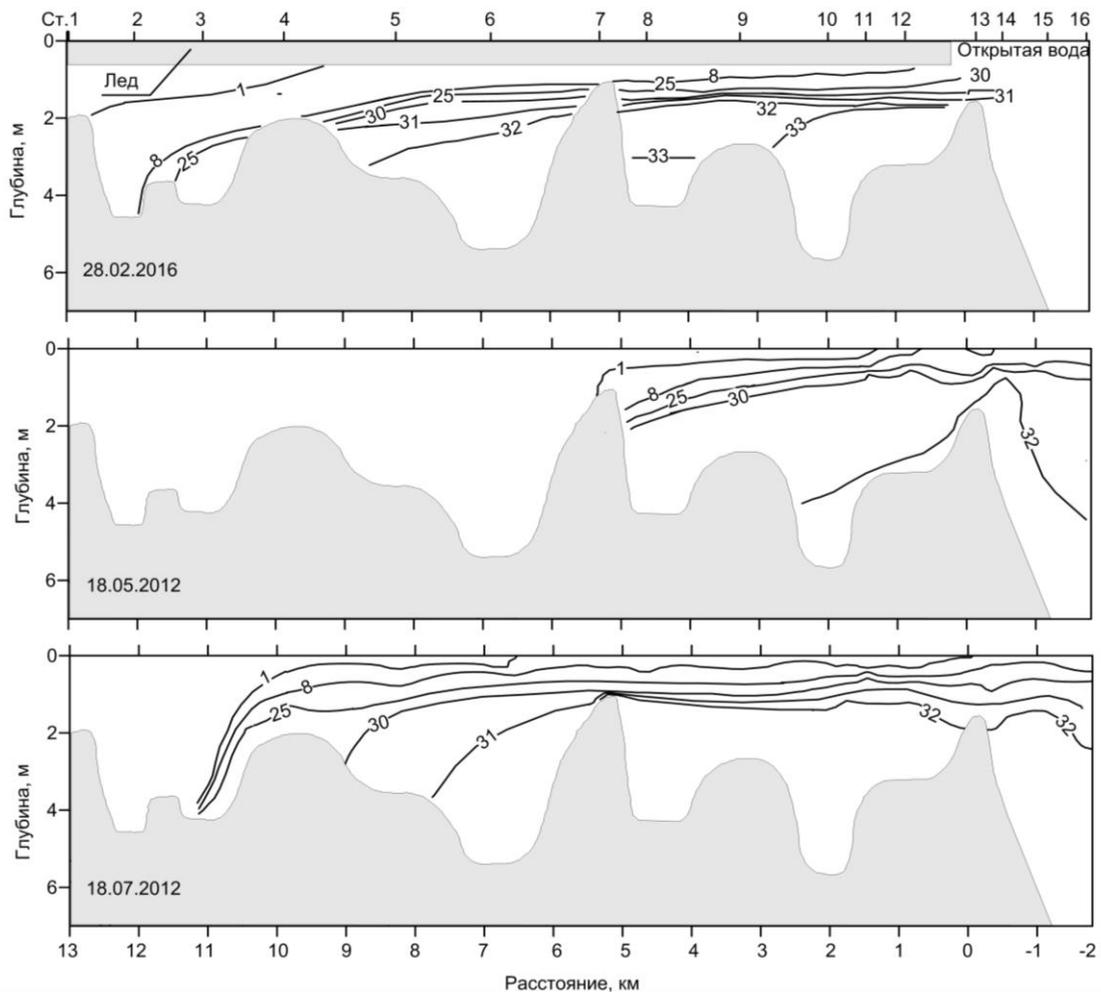
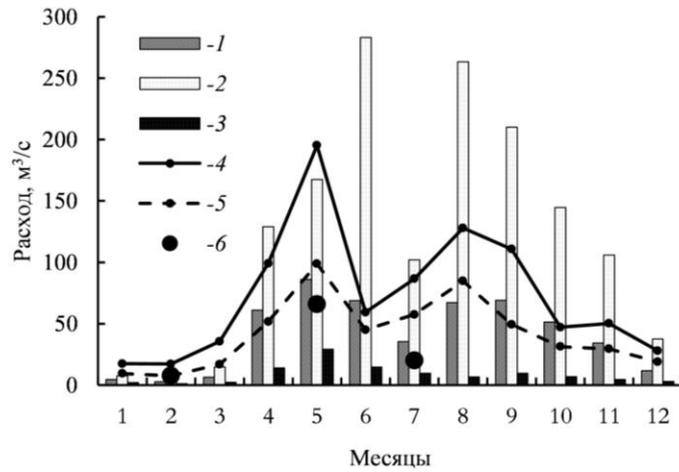


Рис. 3.6. **а** – Средние (1), максимальные (2) и минимальные (3) за многолетний период с 1958 по 1980 гг. величины среднемесячных расходов воды в устье р. Партизанской (Многолетние данные..., 1986); 4, 5 соответственно максимальные и минимальные величины среднемесячных расходов воды с 2008 по 2014 гг. **б** – изменчивость солености воды (‰) в продольном профиле эстуария р. Партизанская. 28 февраля 2016 г., расход реки – 7,77 м<sup>3</sup>/с; 18–19 мая 2012 г., расход реки – 65,9 м<sup>3</sup>/с; 18–19 июля 2012 г., расход реки – 20,1 м<sup>3</sup>/с. Слева – река, справа – море. Расстояния от гребня устьевых бара реки.

### 3.4. Эстуарий р. Артемовки

Величины расходов воды р. Артемовки на даты полевых измерений и дальность проникновения ЗС, определяемая по предельному положению изогалины 1‰ представлена в табл. 3.3. Работы в марте 2011 г. были выполнены в зимнюю межень при расходе реки 0,66 м<sup>3</sup>/с. Весной 2011 г. пик половодья был зафиксирован 19 мая (расход реки 20 м<sup>3</sup>/с), наши исследования проводились на спаде половодья при расходе 11,9 м<sup>3</sup>/с (табл. 3.3.). 3. В июле 2011 г. наблюдения выполнялись в условиях межени при расходе реки 6,33 м<sup>3</sup>/с, граница ЗС наблюдалась на расстоянии 4,5 км от устьевого бара реки.

Таблица 3.3. Расходы воды р. Артемовки в п. Штыково и дальность проникновения зоны смешения от устьевого бара реки.

Период исследований	Расход реки, м <sup>3</sup> /с	Расстояние от устьевого бара до речной границы зоны смешения, км
01.03.2011 (ледостав)	0,66	8,0
04.05.2011	11,9	2,0
18.07.2011	6,33	4,5

Структура ЗС в русле эстуария в разные сезоны представлена на рис. 3.7. В эстуарии р. Артемовки наиболее ярко соленостный фронт проявился в период летней межени. При этом в средней части эстуария на расстоянии 4,2 км соленость воды равномерно увеличивалась от 0,1 до 6,0‰. Граница фронта со стороны реки находилась в районе ст. 5, а с мористой стороны – в районе ст. 15. Изменение солености в районе фронта между станциями 5 и 19 (расстояние 400 м) на горизонте 1,5 м составляло около 18‰.

Соленость воды на мористой границе фронта – 25–26‰ на горизонте 1 м (район ст. 15), а в придонном слое в углублении перед баром на глубине 3,4 м (ст. 19) – 24,9‰. Эта соленость близка к солености в районе мористой границы галоклина. Согласно современной классификации (Михайлов, Горин, 2012) данный эстуарий можно отнести к лиманному типу с сильной стратификацией вод (Долгополова, Исупова, 2010).

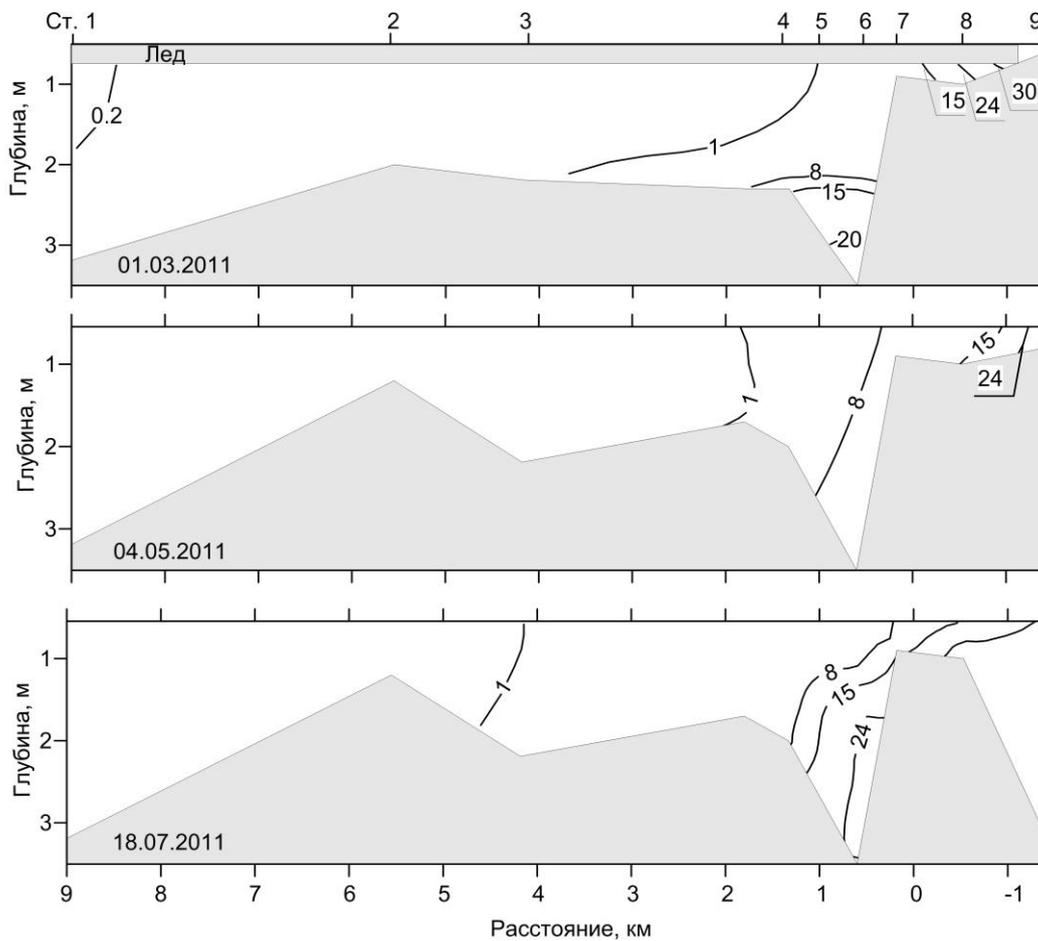
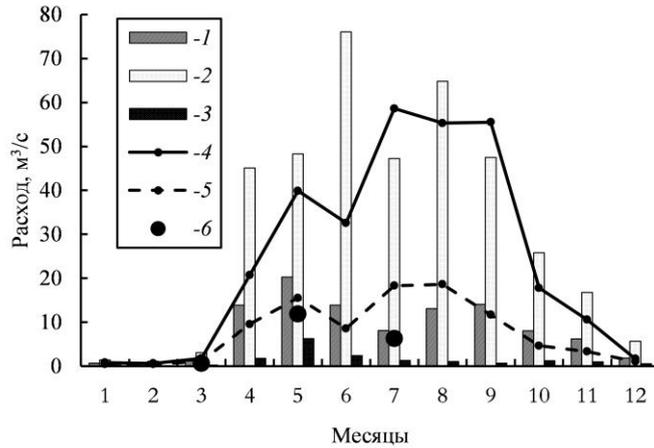


Рис. 3.7. **а** – Средние (1), максимальные (2) и минимальные (3) за многолетний период с 1963 по 1970 гг. величины среднемесячных расходов воды на посту в п. Штыково (Многолетние данные..., 1986); 4, 5 соответственно максимальные и минимальные величины среднемесячных расходов воды с 2008 по 2014 гг. **б** – изменчивость солености воды (‰) в продольном профиле эстуария р. Артемовки. 01 марта 2011 г., расход реки – 0,66 м<sup>3</sup>/с; 04 мая 2011 г., расход реки – 11,9 м<sup>3</sup>/с; 18 июля 2011 г., расход реки – 6,33 м<sup>3</sup>/с. Слева – река, справа – море. Расстояния от гребня устьевгоу бара реки.

### 3.5. Эстуарий р. Шкотовки

Величины расходов воды р. Шкотовке на даты полевых измерений и дальность проникновения ЗС, определяемая по предельному положению изогалины 1‰, представлена в табл. 3.4. Работы в марте 2014 г. были выполнены в зимнюю межень при расходе реки 0,75 м<sup>3</sup>/с. Весной 2011 г. пик половодья был зафиксирован 21 мая (расход реки 50,4 м<sup>3</sup>/с), наши исследования проводились до начала весеннего половодья при расходе 6 м<sup>3</sup>/с (табл. 3.4.). 3. В июле 2011 г. наблюдения выполнялись в условиях межени при расходе реки 5,24 м<sup>3</sup>/с. Дальность проникновения ЗС в эстуарий при имеющемся расходе воды не изменялась.

Таблица 3.4. Расходы воды в п. Шкотово и дальность проникновения зоны смешения от устьевого бара реки.

Период исследований	Расход реки, м <sup>3</sup> /с	Расстояние от устьевого бара до речной границы зоны смешения, км
10.03.2014 (ледостав)	0,75	1,7
03.05.2011	6,0	1,7
19.07.2011	5,24	1,7

Для эстуария р. Шкотовки (рис. 3.8) соленостный фронт во-первых, относительно растянут по разрезу “река–море”, во-вторых, его положение значительно смещено в направлении бух. Муравьиной по сравнению с положением фронта в эстуарии р. Артемовки. Особенности эстуариев рек Шкотовка и Артемовка – повышенная соленость воды в углублении речной части эстуария перед баром. В период летних съемок вода с повышенной соленостью в придонном горизонте была более прогрета (21,0 °С) по сравнению с вышележащим слоем (16,8 °С). Устойчивая стратификация вод при этом создавалась за счет положительного вклада солености в плотность воды, который превосходил отрицательный температурный вклад в стратификацию.

Согласно современной классификации (Михайлов, Горин, 2012) данный эстуарий можно отнести к лиманному типу с сильной стратификацией вод (Долгополова, Исупова, 2010).

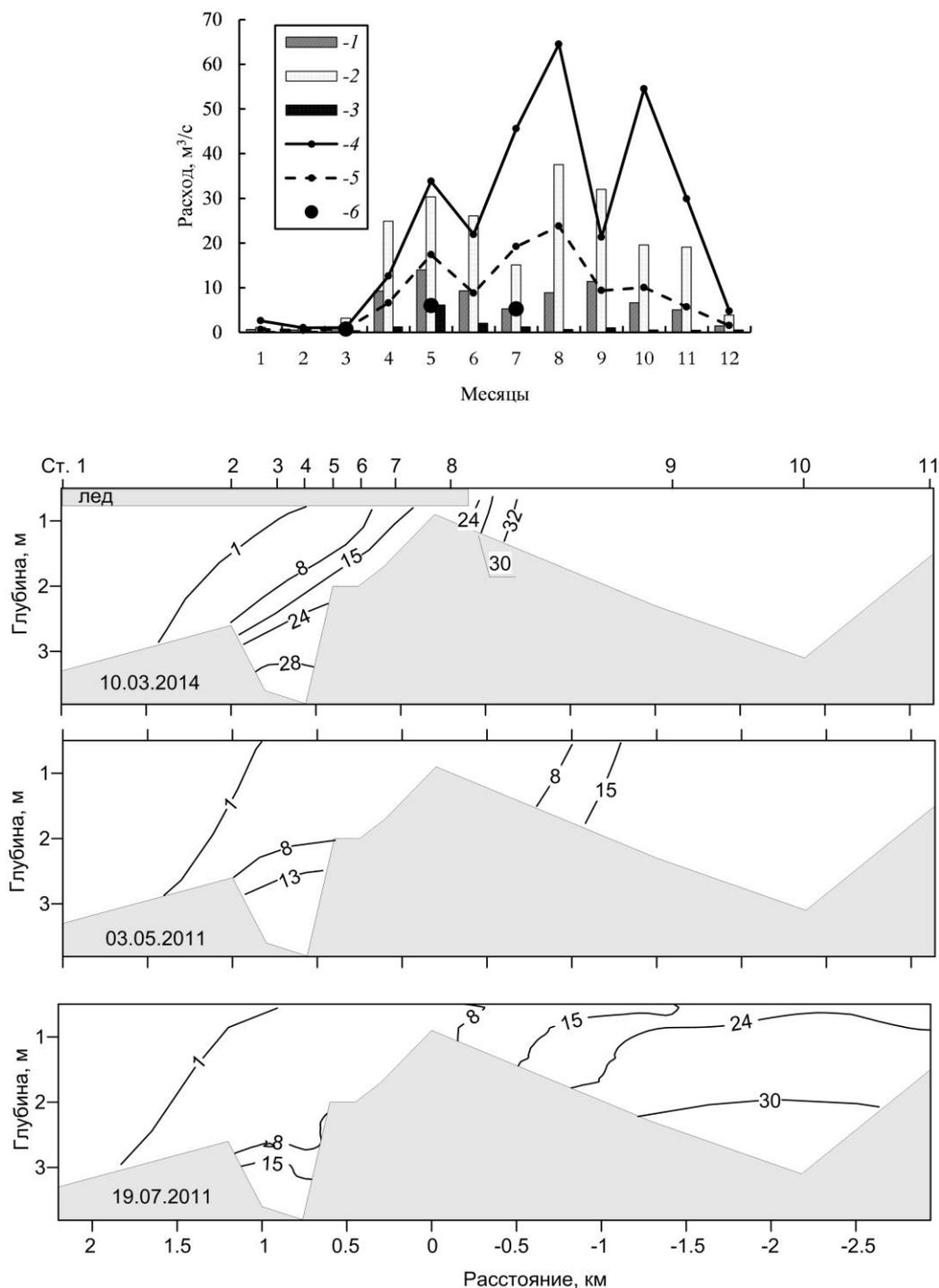


Рис. 3.8. а – Средние (1), максимальные (2) и минимальные (3) за многолетний период с 1963 по 1970 гг. величины среднемесячных расходов воды на посту в п. Шкотово (Многолетние данные..., 1986); 4, 5 соответственно максимальные и минимальные величины среднемесячных расходов воды с 2008 по 2014 гг. б – изменчивость солености воды (‰) в продольном профиле эстуария р. Шкотовки. 10 марта 2014 г., расход реки – 0.75 м³/с; 03 мая 2011 г., расход реки – 6 м³/с; 19 июля 2011 г., расход реки – 5.24 м³/с. Слева – река, справа – море. Расстояния от гребня устьевых бара реки.

### 3.6. Эстуарий р. Амба

Величины расходов воды р. Амба на даты полевых измерений и дальность проникновения ЗС, определяемая по предельному положению изогалины 1‰, представлена в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Расходы воды в п. Занадворовка и дальность проникновения зоны смешения от устьевого бара реки.

Период исследований	Расход реки, м <sup>3</sup> /с	Расстояние от устьевого бара до речной границы зоны смешения, км
17.01.2012 (ледостав)	0,28	5,0
20.09.2012	25,9	0,0
24.07.2012	6,03	2,2

В поле пространственного распределения солености в эстуарии реки Амба во все сезоны года выделяется три области: район с речными водами без влияния на них морских вод (соленость 0–1‰), зона смешения, и область морских вод с без влияние реки (соленость в разные сезоны 30–33‰). Наибольшие градиент солености в эстуарии реки Амба (до 25‰ на 0,5 м) характерен для периода летней съемки (рис. 3.9а). В период осенней съемки (рис. 3.9б), в условиях наибольшего расхода реки, фронтальная область была полностью вытеснена за пределы устьевого бара. То есть в данном случае ЗС наблюдалась на участке устьевого взморья. Градиент солености в районе устьевого взморья был на уровне 25‰ на 1 м. Для зимнего сезона характерно наибольшее распространение ЗС в речную часть. В зимний сезон, наибольшее проникновение морских вод связано с малым расход реки. На периодическое проникновение морских вод в эстуарий реки Амба в результате приливов могут указывать области с солоноватыми водами (24‰) в районе станций 5, 6 в периоды летний и зимний съемок.

Характерной особенностью в районе устьевого взморья в летний и осенний сезоны является выклинивание изогалин к поверхности (район станций

8, 9 летом и 10, 11 осенью), вызывая в целом деформацию поля солености в данном районе. Данная структура является результатом поднятия вод повышенной солености по склону в результате компенсационного потока (подсоса) формирующегося под действием вовлечения морской воды речными водами. Данное явление неоднократно упоминается в литературе, например (Симонов, 1969; Bowden et al., 1975; Waiters et al., 1985; Долгополова, 2011). Согласно современной классификации (Михайлов, Горин, 2012) данный эстуарий можно отнести к русловому типу с сильной стратификацией вод (Долгополова, Исупова, 2010).

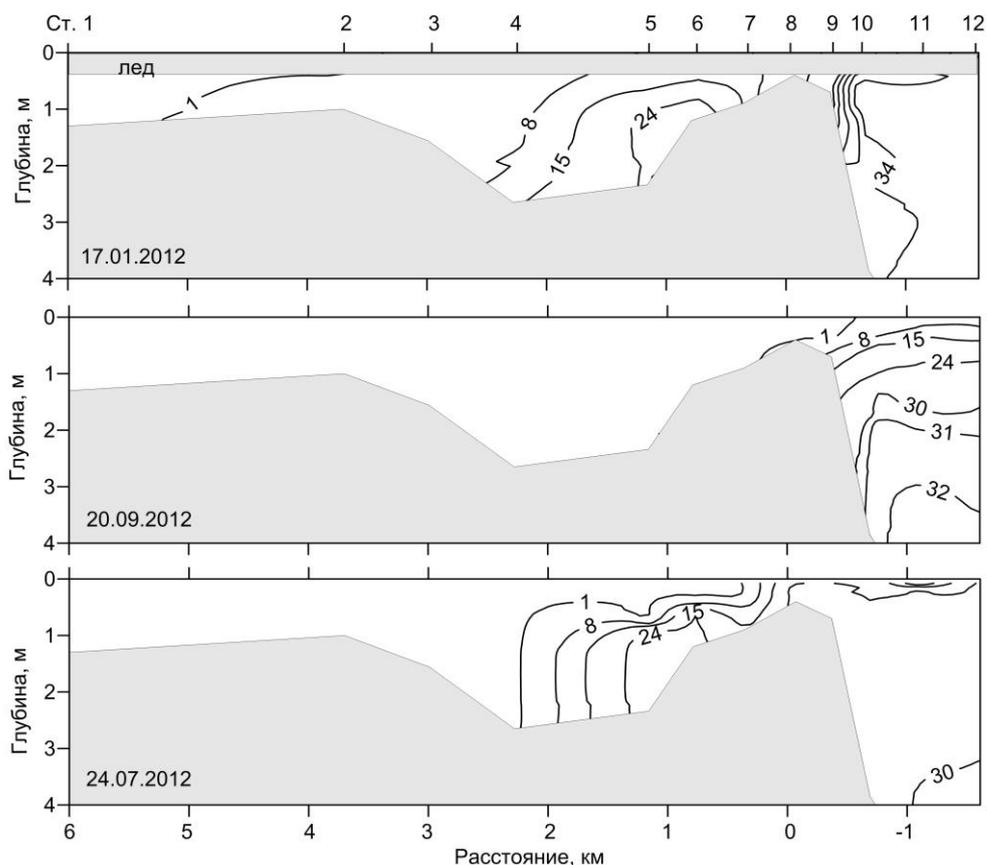
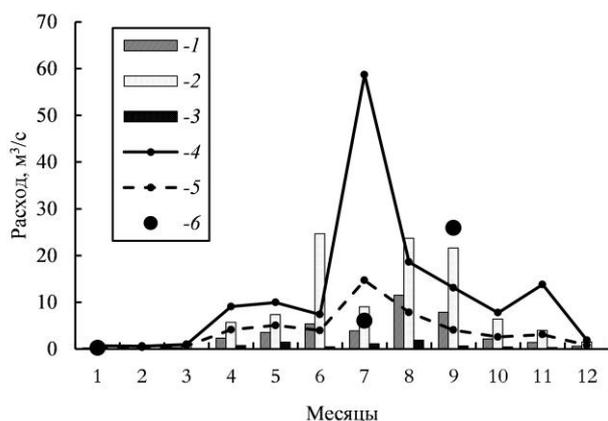


Рис. 3.9. **а** – Средние (1), максимальные (2) и минимальные (3) за многолетний период с 1963 по 1970 гг. величины среднемесячных расходов воды на посту в п. Занадворовка (Многолетние данные..., 1986); 4, 5 соответственно максимальные и минимальные величины среднемесячных расходов воды с 2008 по 2014 гг. **б** – Сезонная изменчивость солёности воды (‰) в продольном профиле эстуария р. Амба. 17 января 2012 г., расход реки – 0,28 м<sup>3</sup>/с; 20 сентября 2012 г., расход реки – 25,9 м<sup>3</sup>/с; 24 июля 2012 г., расход реки – 6,03 м<sup>3</sup>/с. Слева – река, справа – море. Расстояния от гребня устьёвого бара реки.

### **3.7. Суточная динамика зоны смещения на примере лиманного эстуария р. Раздольной и руслового эстуария р. Партизанской**

#### ***3.7.1. Приливы и циркуляция вод в эстуарии р. Раздольной***

Максимальная высота приливной волны в центральной части Амурского залива в период зимней съемки составляла 22 см (рис. 3.10а). Продолжительность приливного подъема и падения уровня была около 6 ч. Максимальная высота приливной волны в верхней части эстуария была 19 см. При этом фаза волны смещалась на 2 часа от фазы волны в Амурском заливе (расстояние между измерителями – 27 км). Для зимнего сезона особенность изменчивости амплитуд уровня моря заключается в том, что в точке постановки измерителей течений уровень воды практически не изменялся. В основной период внутрисуточных исследований амплитуда колебаний непосредственно выше лимана была менее 1 см по-видимому в связи с тем, что ледяной покров приводит к диссипации энергии приливной волны. При этом энергия приливной волны может передаваться через грунтовый водоносный слой в верхнюю часть эстуария (Robinson, Barry, 2007, Santos et al., 2012), где снова наблюдаются колебания уровня, сравнимые по высоте с приливами в Амурском заливе (рис. 3.10а).

В период летней съемки (09.06–10.06.2014) продолжительность приливного подъема и падения была от 5 до 7 часов (рис. 3.10б.). Наибольшая высота приливной волны в центральной части Амурского залива, в точке измерения течений и в верхней части эстуария достигала 22 см. Разница в фазах волн между устьевым баром и районом верхнего эстуария составляла приблизительно 10–15 мин. Сдвиг фазы уровня для летнего сезона объясняется растущим трением на пути приливной волны при входе в устьевой участок реки (Михайлов, Даценко, 1973).

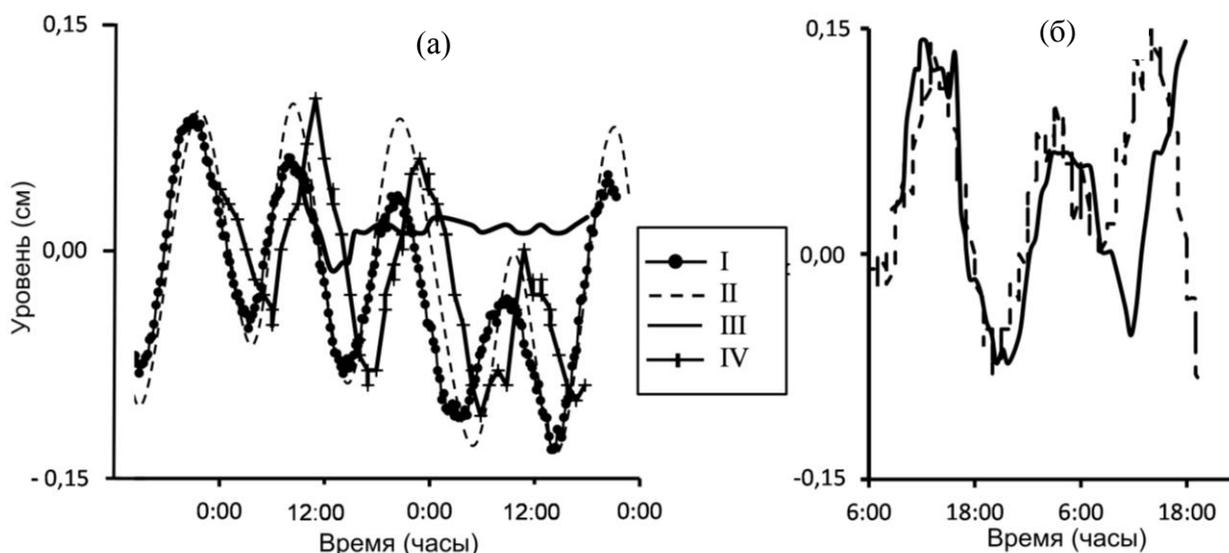


Рис. 3.10 Относительные колебания уровня моря зимой (а) в период с 23.01 по 24.01.2014 и летом (б) в период с 09.06 по 10.06.2014 по данным АБС и по данным измерительной рейки: I- открытая часть ЗПВ ( $42^{\circ} 30.720'$  с.ш.,  $131^{\circ} 47.820'$ ), II- центральная часть Амурского залива ( $43^{\circ} 10.910'$  с.ш.,  $131^{\circ} 50.300'$  в.д.), III- район АБС с измерителями течений ( $43^{\circ} 20.202'$  с.ш.,  $131^{\circ} 48.134'$  в.д.), IV- верхняя часть эстуария ( $43^{\circ} 24.064'$  с.ш.,  $131^{\circ} 48.517'$  в.д.).

Измерения течения зимой были начаты в отливную фазу в Амурском заливе, которая наблюдалась с 09:00 до 15:00. Благодаря смещению фаз, падение уровня воды в верхней части эстуария происходило в период с 11:00 до 17:00. После приливной фазы, вторая отливная фаза в Амурском заливе наблюдалась с 21:00 до 04:00, после этого уровень воды возрастал до 09:00. Окончание измерения течений пришлось на отливную фазу в Амурском заливе.

За период наблюдений отчетливо прослеживаются два временных интервала по 6 часов с направлением течения на  $180^{\circ}$  (в сторону моря) и два временных интервала с той же длительностью с направлением течения в сторону реки (рис. 3.11а.).

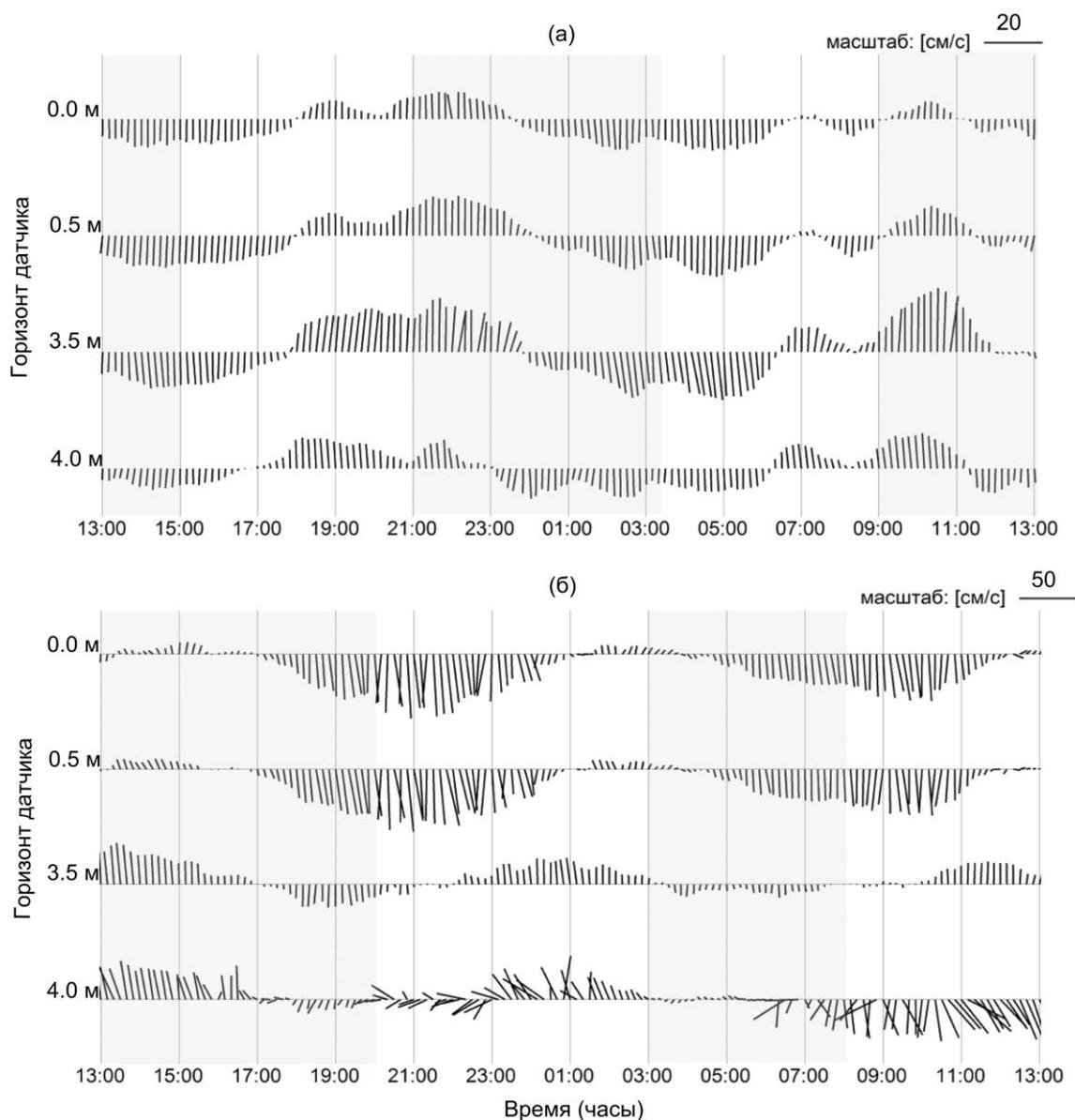


Рис. 3.11. Внутрисуточная изменчивость скорости и направления течений зимой (а) в период с 23.01 по 24.01.2014 и летом (б) в период с 09.06 по 10.06.2014 на четырех горизонтах. Серым цветом выделен период отлива, белый фон - период прилива в Амурском заливе по данным АБС.

Для поверхностного слоя воды течение изменялось с приливного на отливное и, наоборот, с опозданием приблизительно на 3 часа от моментов полной или малой воды в Амурском заливе. В придонном слое смена направления течения происходила через два часа после полной или малой воды в Амурском заливе. В отливную фазу максимальная скорость течений для горизонтов 0,7 и 3,5 составляла 14 и 16 см/с, соответственно. В приливную фазу максимальная скорость для этих же горизонтов достигала 14 и 22 см/с.

Летом начало измерения течений пришлось на момент смены полной воды на отливную фазу в Амурском заливе. Эта фаза продолжалась до 20:00, после чего наблюдался рост уровня. После приливной фазы, вторая отливная фаза наблюдалась с 03:00 до 08:00. Закончились измерения в период приливной фазы. Уровень воды в месте постановки АБС сохранялся на максимальной отметке в период с 13:00 до 17 00, после чего снижался до минимальной отметки, которая наблюдалась в период с 22:00 до 23:00. Далее уровень в точке АБС возрастал до 03:00 после чего снижался до 10:00. В целом рост и падение уровня в месте постановки АБС наблюдались с опозданием приблизительно на 2 часа от фазы волны в Амурском заливе. Как и в случае зимних исследований, для поверхностного слоя вод (горизонт 0,2 и 0,7 м) в течение суток наблюдались два периода с направлением течения на  $180^\circ$  (в сторону моря) и два периода с направлением течения на  $0^\circ$  (в сторону реки) (Рис. 3.11б). Однако период отливного течения составлял более 8 ч, а период приливного течения менее 4 часов. Максимальная скорость приливных течений для слоя речных вод была 10 см/с. Скорость отливного течения для слоя речной воды достигала 54 см/с в 21:30 и 41 см/с в 09:30, то есть приблизительно через 1,5 часа после малой воды в Амурском заливе. Уровень воды, при этом, в месте постановки АБС в этот момент был наименьший.

Для слоя морской воды на горизонте 3,5 м наблюдались отливные и приливные течения сравнимые по длительности (4–5 ч). Приливное течение сменялось на отливное течение для данного горизонта одновременно со сменой направления течений в поверхностном слое (в 17:00 и в 03:00). Отливное течение изменялось на приливное течение приблизительно через 1,5–2 часа после смены фазы малой воды на фазу роста уровня моря в Амурском заливе (в 21:30 и 10 00) При этом смена направления течения морских вод в районе АБС происходила синхронно с началом роста и падения уровня в месте АБС.

Максимальная скорость приливных течений для горизонтов 3,5 и 4 м составляла 40 и 36 см/с, соответственно, в 13:20–13:30 (09.06.2014). Отливные течения в слое 3,5 м достигали 20 см/с.

### ***3.7.2. Внутрисуточная изменчивость солености в эстуарии р.***

#### ***Раздольной***

На рис. 3.12. представлена внутрисуточная изменчивость солености в продольном профиле с интервалом в три часа в зимний и летний сезоны. Для обоих сезонов морские воды с соленостью свыше 24‰, как правило, наблюдались на мористых станциях в районе лимана, у бара и за баром. Основная часть исследуемого района зимой была заполнена солоноватыми водами с соленостью 20–24‰. В тоже время, в верхней части эстуария на ст. 2 отмечается повышение солености у дна до 25,2‰ на разрезах, выполненных в 15 00 23 января и 24 января, что может быть вызвано потоком грунтовых вод повышенной солености. Этот поток играет значимую роль в процессах обмена водами и веществом между сушей и морем (Фролов, Хубларян, 1986; Burnett et al., 1990; Taniguchi et al., 2002; Moore, 2010; Santos et al., 2014). В целом положение зоны смешения в течение суток не менялось.

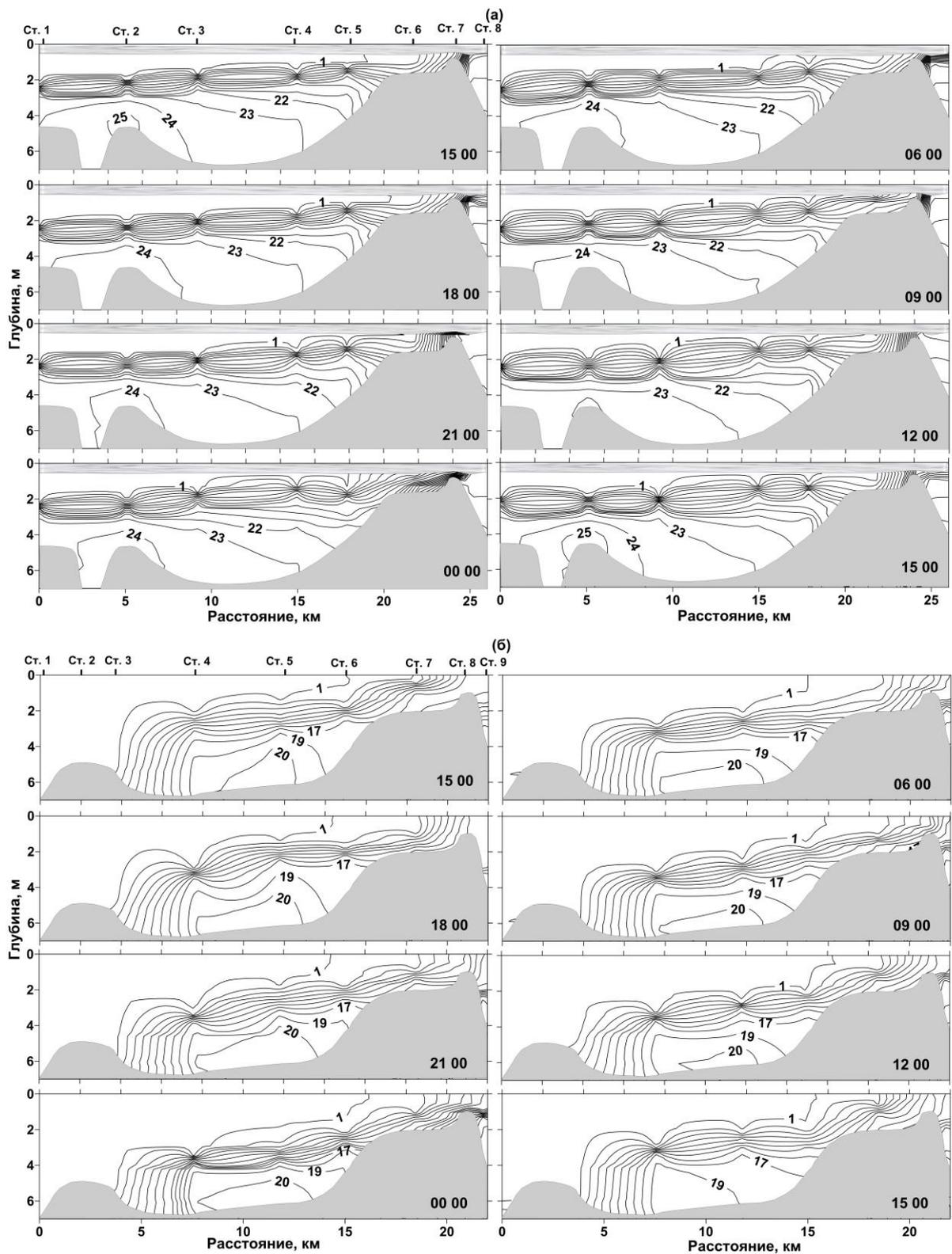


Рис. 3.12. Внутрисуточная изменчивость солёности в период ледостава (а) с 23.01 по 24.01.2014 и в летний период (б) с 09.06 по 10.06.2014. Слева река, справа море. Зондирование на разрезе выполнено с интервалом три часа. Указанное время соответствует началу выполнения разреза со стороны реки.

### ***3.7.3. Приливы и циркуляция вод в эстуарии реки Партизанской***

18–19 февраля 2014 г., согласно данным метеостанции в г. Находка, температура воздуха в течение суток была отрицательной, в диапазоне от -3,6 до -11,8°C. Направление ветра было преимущественно северных румбов со средней скоростью 2–6 м/с, с порывами до 15 м/с в светлое время суток. 15–16 сентября 2015 г. температура воздуха была от 12,0 до 25,5°C. Направление ветра изменялось с СВ в ночные часы, на противоположное – ЮЗ в дневные часы. Средняя скорость ветра в обоих направлениях была в диапазоне 1–4 м/с ([www.pogodaiklimat.ru](http://www.pogodaiklimat.ru)).

Величина прилива в створе постановки АБС (рис. 3.13.) на даты съемок в период ледостава и в период открытого русла составляла 11 см, а в заливе Петра Великого (по предвычислениям) соответственно 11 и 12 см ([www.esimo.oceanography.ru](http://www.esimo.oceanography.ru)).

Коэффициент прилива для данного места составлял в феврале и в сентябре соответственно около 1,0 и 0,9 ( $K_{\text{пр}}=V_{\text{т}}/V_{\text{м}}$ , где  $V_{\text{т}}$  – величина прилива в данной точке,  $V_{\text{м}}$  – величина прилива в море). Таким образом, приливная волна распространялась практически без уменьшения величины до этого района эстуария в холодный и теплый сезон. Наблюдения уровня воды в трех точках эстуария в сентябре 2015 (рис. 4), показали, что приливные колебания уровня распространяются до галечного переката, расположенного на расстоянии 12,7 км от устьевого бара, с небольшим отставанием волны по фазе. Судя по резкому изменению характера руслового рельефа, выше этого места приливные и нагонные колебания уровня воды не распространяются.

При измерениях в период ледостава, в условиях низкого речного стока, в поверхностном горизонте наблюдалась регулярная смена направления течения в зависимости от фазы приливов (рис. 3.13.). Во время прилива, течение в поверхностном слое со скоростью до 22 см/с было ориентировано в направлении реки. В отлив и в малые воды течение в поверхностном горизонте со скоростью до 21 см/с было направлено в сторону моря. Течение у дна со скоростью до 18 см/с вне зависимости от фазы приливов было направлено в

сторону реки. Направление течения у дна сменялось на противоположное (в сторону моря) в короткие промежутки времени продолжительностью 10–20 мин, при этом скорость не превышала 10 см/с.

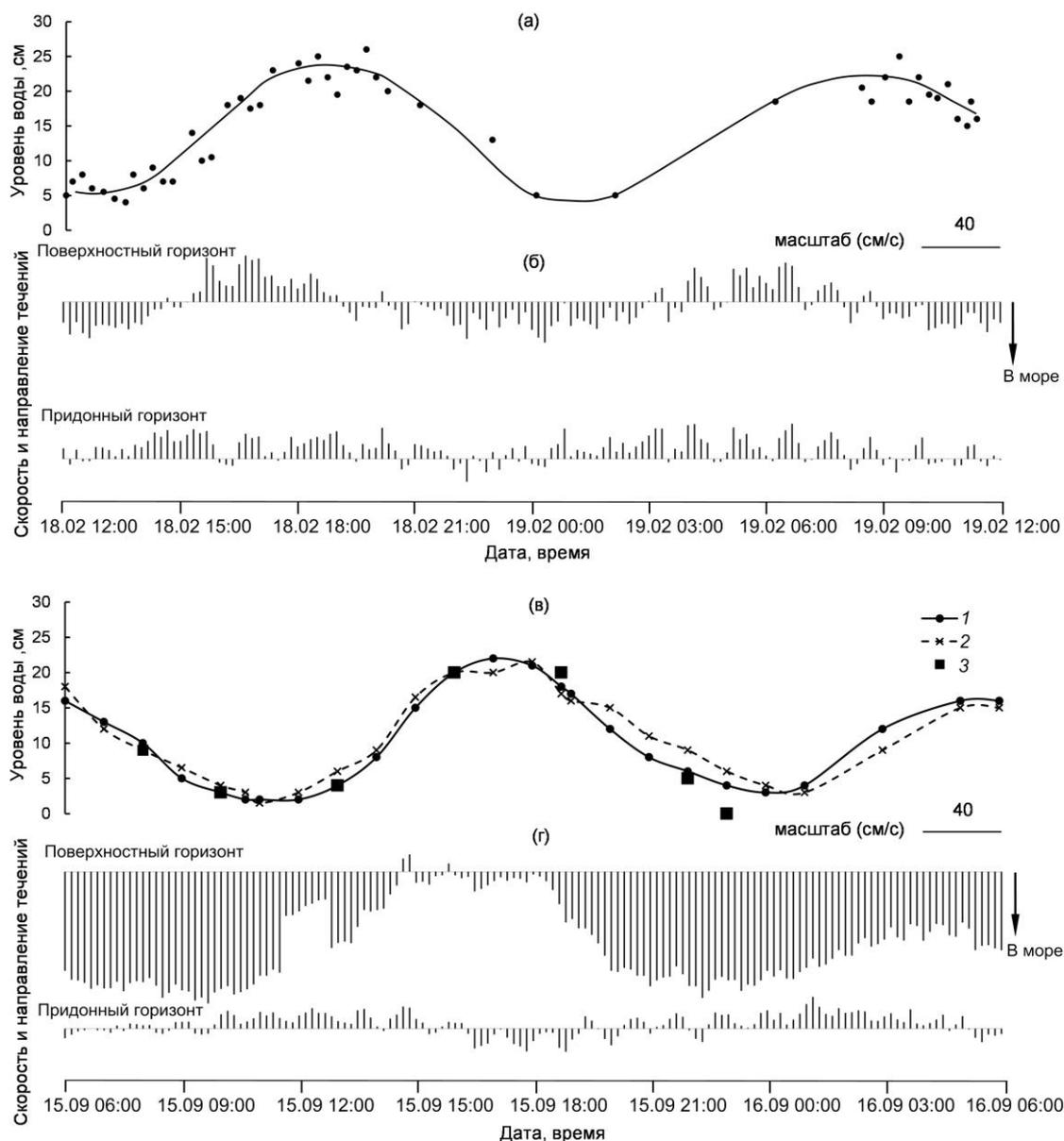


Рис. 3.13. Уровень, величина и направление течения воды в районе АБС в феврале 2014 г. (а, б) и в сентябре 2015 г. (в, г). 1, 2, 3 – изменчивость уровня воды в створах, удаленных на 1,8, 3,3 и 11,1 км от устьевго бара реки, соответственно (ст. 11, 9, 3).

В теплый сезон, в условиях более высокого стока реки, течение в поверхностном горизонте со скоростью до 67 см/с было ориентировано в направлении моря почти для всего периода наблюдений (рис. 3.13г). В полные

воды скорость этого течения снижалась до 2–3 см/с. При совпадении нагонного ветра со средней скоростью 4 м/с с приливной фазой, течение со скоростью до 10 см/с в поверхностном горизонте на короткие периоды в 15:00 –16:00 было направлено в сторону реки. В придонном горизонте в полные воды и в отлив течение было либо прямым со скоростью до 12 см/с, либо знакопеременным. В малые воды и в прилив оно было обратным со скоростью до 18 см/с.

Из полученных результатов видно, что в период повышенного речного стока при открытом русле скорость течения на поверхности выше, в сравнении с зимним сезоном (рис. 3.13.). В теплое время года течение у дна часто меняет свое направление, а скорость течения направленного в реку меньше, в сравнении с зимним временем.

Наблюдаемая двухслойная циркуляция вод, характерна для русловых эстуариев с небольшими приливами и объясняется эффектом вовлечения (Симонов, 1969; Михайлов, 1997). Судя по полученным результатам в данной точке в период ледостава и открытого русла при расходе реки 11,9 и 30,0 м<sup>3</sup>/с соответственно, скорость течения у дна, одинаковая, однако это течение более устойчиво во времени в период ледостава.

#### ***3.7.4. Суточная динамика зоны смешения в эстуарии реки***

##### ***Партизанской***

##### ***Период ледостава***

На рис. 3.14 представлена суточная изменчивость солености воды в ЗС по результатам измерений 18–19 февраля 2014 г.

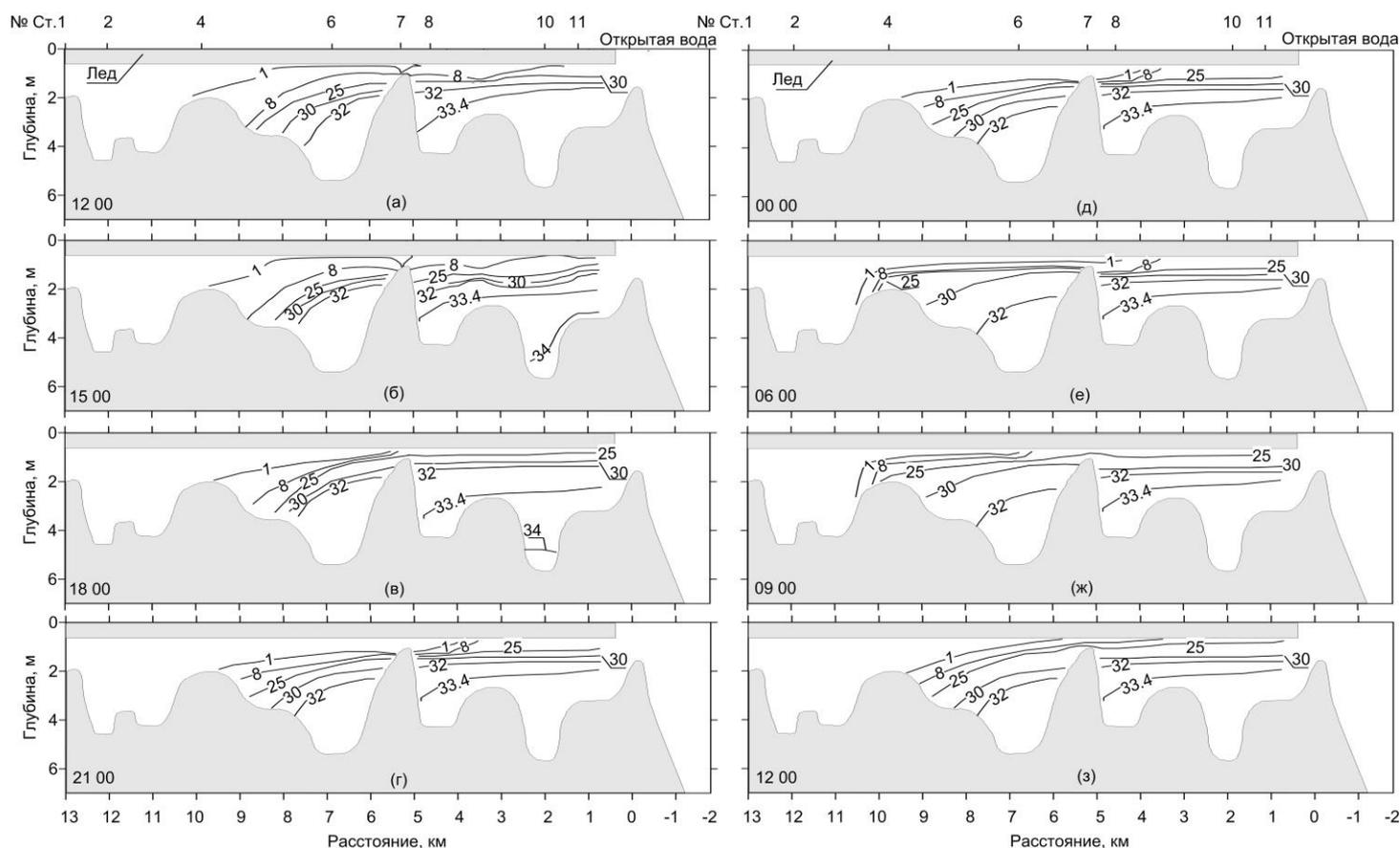


Рис.3.14. Суточная изменчивость солености воды (‰) в продольном профиле эстуария р. Партизанская при расходе реки  $11,9 \text{ м}^3/\text{с}$  (18.02–19.02.2014 г.) Слева – река, справа – море. Время местное. (а) – малые воды (МВ), (б) – МВ + 3 ч., (в) – МВ + 6 ч, г – полные воды (ПВ) + 2,5 ч., (д) – ПВ + 5,5 ч., (е) – МВ + 5 ч., (ж) – ПВ, (з) – ПВ + 3ч.

В период работ морские воды с соленостью 33,4‰ распространялись на расстояние до 5 км вверх по руслу реки от устьевого бара. Речная (верхняя) граница ЗС, выделяемая по изогалине 1‰, в течение суток незначительно изменяла свое положение. В отлив, граница ЗС находилась ниже песчаного переката, расположенного в 9,5 км от устьевого бара, в районе ст. 4, соленость воды у дна в этом районе снижалась до 0,5‰. В полную воду, ЗС поднималась до переката и выше него, при этом соленость воды у дна на перекате повышалась до 23,1‰. Аналогичное увеличение солености, связанное с приливом, наблюдалось на песчаном перекате в районе ст. 7. В малую воду соленость воды у дна на ст. 7 снижалась до 1,8‰, а в полную воду повышалась до 28,0‰.

Особенность в суточной динамике ЗС – появление вод с соленостью выше 34‰ в 15:00 в придонном слое на ст. 10, 11. Воды с такой соленостью не фиксировались в прилив, а наблюдались в отлив, при наибольшей скорости сгонного ветра со средней скоростью 6 м/с и порывами до 15 м/с над заливом Находка. Скорость ветра, измеренная нами непосредственно в месте постановки АБС, достигала 18 м/с. При ослаблении ветра и смене его направления приток вод с высокой соленостью прекратился. В 18:00 в районе ст. 10 еще наблюдались воды с соленостью более 34‰, затем соленость придонной воды снизилась. Таким образом, сгонный ветер может вызывать компенсационный поток вод с соленостью свыше 34‰ в направлении реки, усиливая эстуарную циркуляцию. Эти воды проникали на расстояние до 2,5 км от устьевого бара и достигали плеса в районе ст. 10. При ослаблении ветра соленость придонной воды в этом плесе снижалась до фоновых значений 33,4‰.

#### *Период открытого русла*

В период открытого русла 15–16 сентября 2015 морские воды с соленостью 32‰ проникали так же, как и зимой на расстояние до 5 км вверх по руслу реки от устьевого бара. Речная (верхняя) граница ЗС, выделяемая по изогалине 1‰, примыкала к перекату в районе ст. 4 на расстоянии 9,5 км от устьевого бара (рис. 3.15).

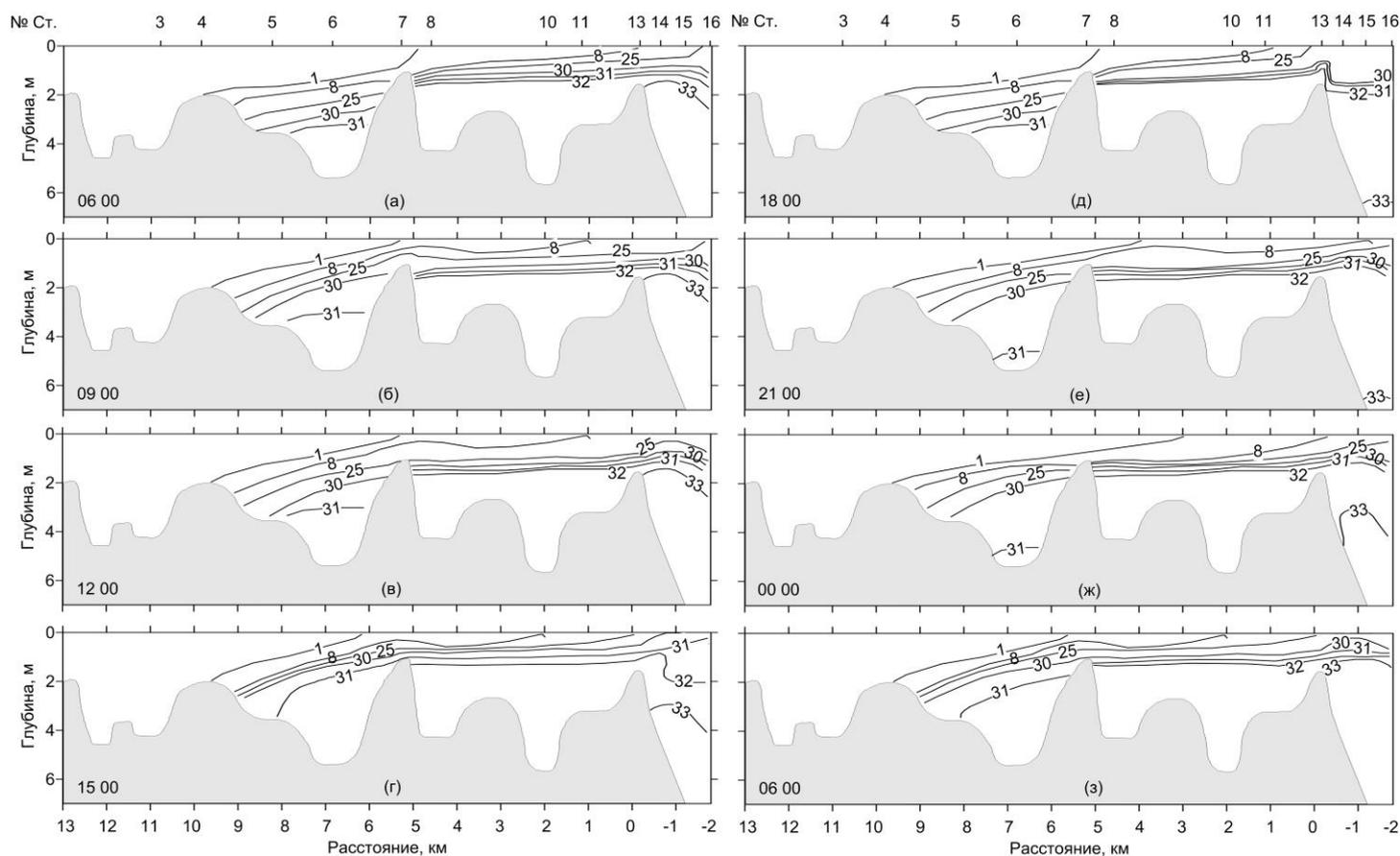


Рис. 3.15. Изменчивость солености воды (‰) в эстуарии с интервалом 3 часа при расходе  $30,0 \text{ м}^3/\text{с}$  в период с 15.09 по 16.09.2015. Слева – река, справа – море. Время местное. (а) – полные воды (ПВ) + 1 ч., (б) – ПВ + 4 ч., (в) – малые воды (МВ) + 1 ч., (г) – МВ + 4 ч., (д) – ПВ + 1 ч., (е) – ПВ + 4 ч., (ж) – МВ., (з) – ПВ.

На самом перекате в исследуемый период наблюдались речные воды с соленостью  $0,07\text{‰}$ , поскольку расход реки в период этих исследований был приблизительно в 2,5 раза больше, чем для периода февральской съемки.

Существенное изменение солености, связанное с приливом, как и в период съемки в феврале, наблюдалось на песчаном перекате в районе ст. 7. Минимальная соленость в отлив составляла  $2,2\text{‰}$ , а максимальная соленость  $30,8$  и  $29,4\text{‰}$  наблюдалась в приливную фазу 15 сентября в 15:00 и в момент, близкий к полным водам 16 сентября в 06:00. Повышенная соленость  $22,6$  и  $29,7\text{‰}$  на данном перекате наблюдалась также, в отливную фазу 15 сентября в 09:00 и спустя три часа в момент, близкий к малым водам в 12:00. Судя по поднятию изогалины  $33,1\text{‰}$  на разрезах в 09:00 и в 12:00 в мористой части эстуария усилился компенсационный поток над устьевым взморьем, что характерно для эстуариев (Симонов, 1959, 1969; Bowden, Hamilton, 1975; Guo,

Valle-Levinson, 2007; Долгополова, Исупова, 2011) . То есть в данном случае эстуарная циркуляция проявилась более выражено по сравнению с циркуляцией в период ледостава. Вероятно, компенсационный поток способствовал проникновению ЗС в район переката на ст. 7. В этом случае, оба процесса – поднятие галоклина в приливную фазу и развитие компенсационного потока при увеличении стока до определённого предела, пока не будет вытеснена ЗС, способствуют проникновению осолоненных вод через перекал в ст. 7.

### **3.8. Заключение**

Согласно современной классификации эстуарии рек Туманная, Партизанская, Амба можно отнести к русловому типу с приглубым устьевым взморьем с двухслойной циркуляцией и сильной стратификацией вод. Эстуарии реки Раздольной, Артемовки, Шкотовки можно отнести к лиманным эстуариям с двухслойной циркуляцией и сильной стратификацией вод.

Решающим фактором проникновения морских вод в речное русло является морфометрическая характеристика устьевого участка: падение реки, глубина русла, наличие лимана, глубина в районе устьевого бара реки. Наибольший эффект на дальность проникновения зоны смешения в эстуариях ЗПВ оказывает расход рек. В течение года на пике половодья или паводков зона смешения вытесняется из эстуария в приемные бассейны.

Приливы и сгонно-нагонные ветры оказывают влияние на изменчивость солёности внутри зоны смешения, при этом суточная изменчивость дальности проникновения зоны смешения не наблюдается.

Интенсивность эстуарной циркуляции увеличивается с повышением расхода реки и развитием сгонного ветра, вследствие более интенсивного вовлечения морских вод в придонный слой эстуария.

## ГЛАВА 4. ГИПОКСИЯ ЭСТУАРИЕВ

### 4.1. Эстуарий р. Туманной

Интерес к р. Туманной и ее эстуарию обусловлен потенциальной возможностью ее участия в эвтрофикации юго-западной акватории залива Петра Великого, которая привела к гипоксии Дальневосточного морского биосферного заповедника (Стунжас и др., 2016; Тищенко и др., 2016).

В самой глубокой части эстуария р. Туманной (глубина 8 м) в придонном слое в мае 2015 г. были обнаружены гипоксийные условия (концентрация  $O_2 = 41$  мкмоль/кг). На момент майской экспедиции расход р. Туманной был  $264$  м<sup>3</sup>/с, а для октября –  $167$  м<sup>3</sup>/с. Из известного соотношения  $T_f = V/Q$ , где  $T_f$  – время “жизни” пресных вод в эстуарии,  $V$  – объем пресных вод,  $Q$  – расход реки (Priya et al., 2012), можно получить “время жизни” речных вод в эстуарии равное 6,3 и 10,0 часов для мая и октября, соответственно. Для такого типа эстуария и для такого короткого “времени жизни” речных вод в эстуарии следует ожидать консервативное поведение всех гидрохимических параметров, поскольку речная вода транзитом проходит эстуарий и впадает в море. Более того, в большей степени консервативное поведение следовало бы ожидать в весенний сезон, поскольку “время жизни” речных вод в этот сезон короче. Действительно, для поверхностных горизонтов обеих съемок зависимость концентрации растворенных веществ от солености близка к линейной. Однако, в придонных горизонтах майской экспедиции поведение карбонатных характеристик, растворенного кислорода, органического углерода и биогенных веществ является существенно неконсервативным (рис. 4.1, 4.2). Помимо расхода реки, важной причиной, которая может объяснить особенности гидрологической структуры эстуария и различия в интенсивности биогеохимических процессов в реке и в эстуарии, является направление ветра.

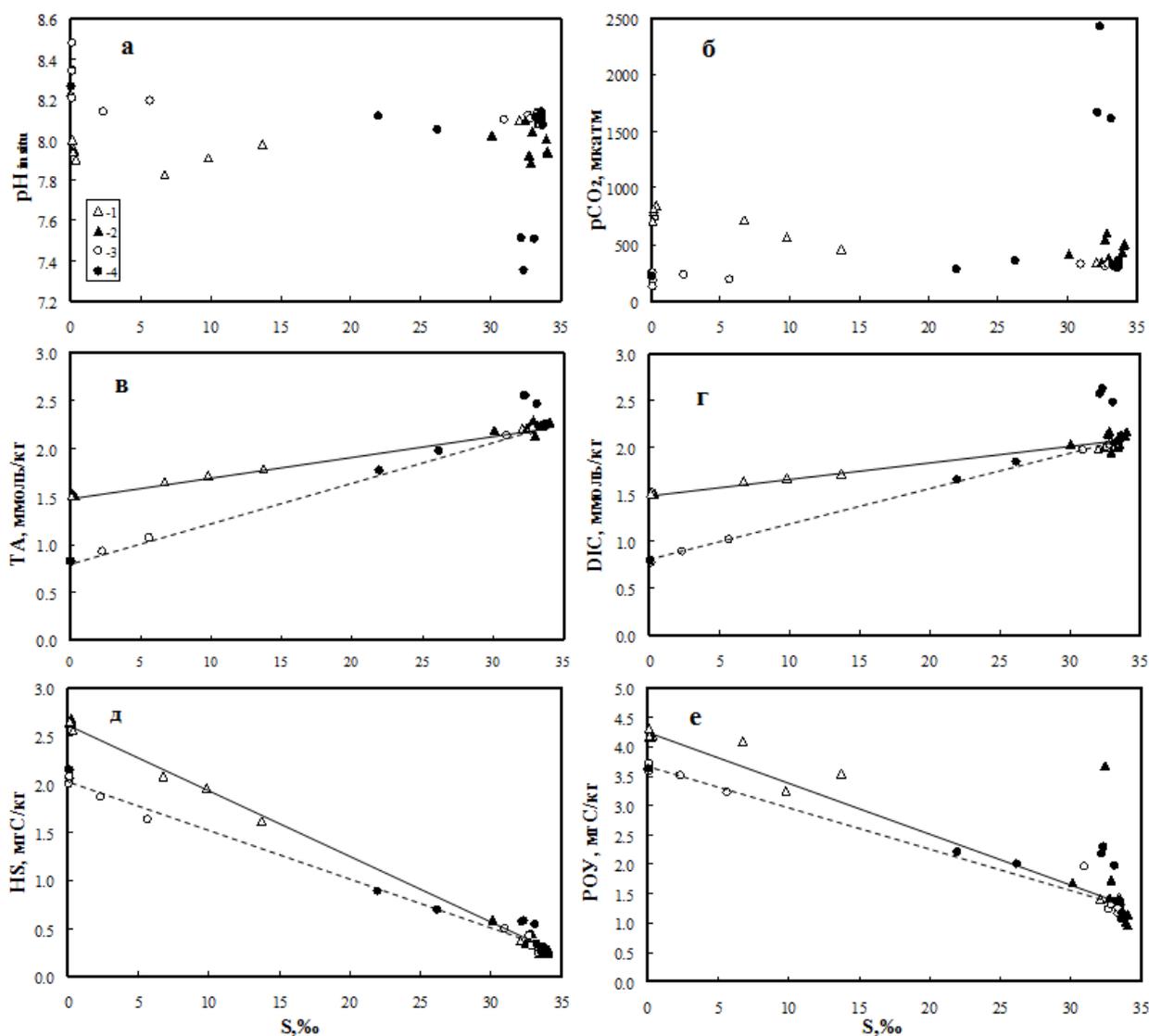


Рис. 4.1. Распределение параметров карбонатной системы и растворенного органического углерода в эстуарии р. Туманной, как функция солёности: (а) –  $\text{pH}_{\text{in situ}}$ ; (б) – парциальное давление углекислого газа (мккатм); (в) – общая щёлочность (ммоль/кг); (г) – растворённый неорганический углерод (DIC) (ммоль/кг); (д) – концентрация гумусового вещества (HS) (мгС/кг); (е) – концентрация растворённого органического углерода (мгС/кг). 1, 3 – поверхностные горизонты; 2, 4 – придонные горизонты. Кругом обозначены результаты измерений, полученные в мае; треугольником обозначены результаты измерений, полученные в октябре 2015 г.

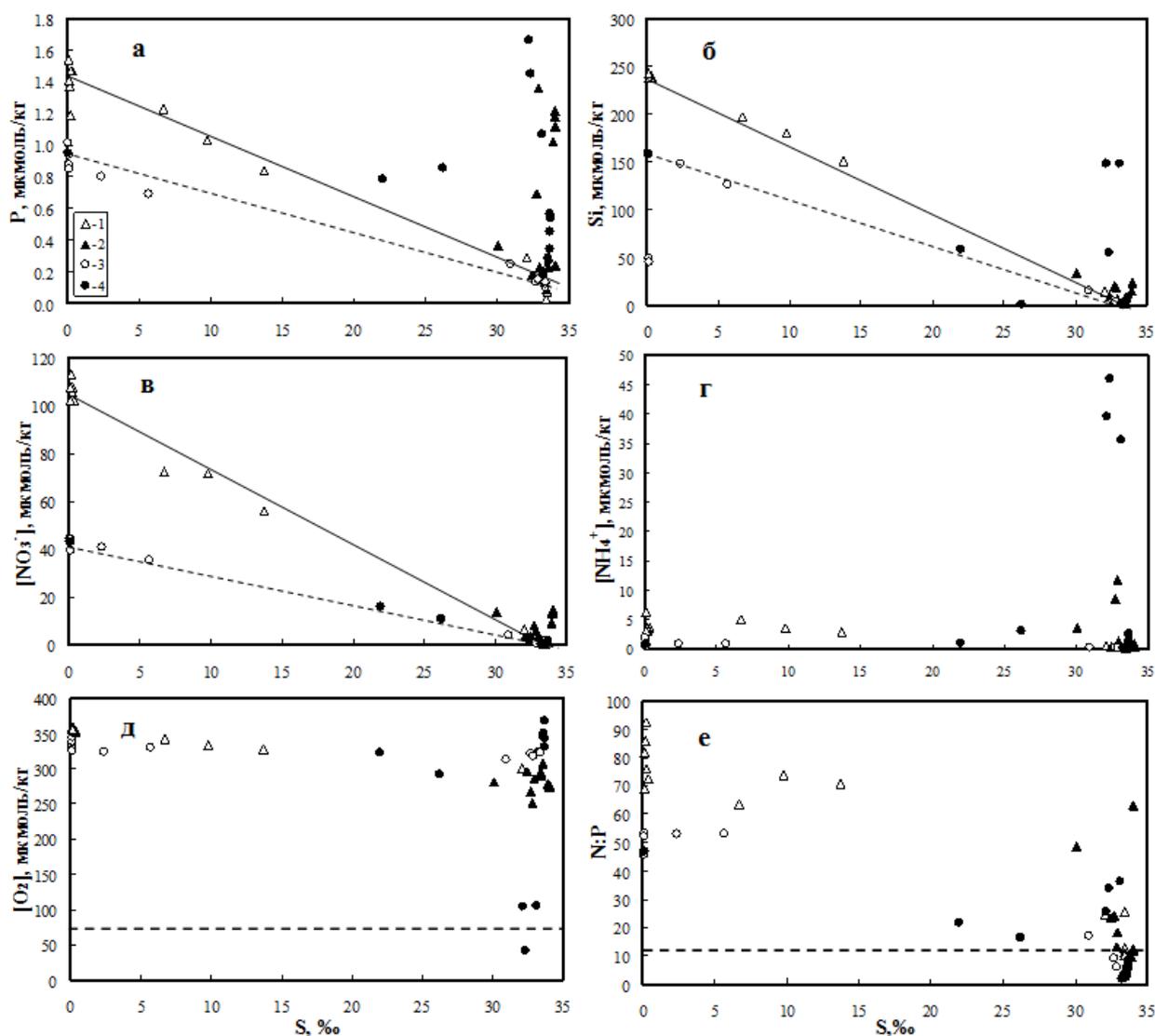


Рис. 4.2. Распределение концентраций биогенных веществ, растворенного кислорода и азот-фосфорного отношения (N:P) в эстуарии р. Туманной в зависимости от солёности: (а) – концентрация фосфатов (мкмоль/кг); (б) – концентрация растворенного кремния (мкмоль/кг); (в) – концентрация нитрат ионов (мкмоль/кг); (г) – концентрация ионов аммония (мкмоль/кг); (д) – концентрация растворенного кислорода (мкмоль/кг); (е) – мольные (N:P). 1, 3 – поверхностные горизонты; 2, 4 – придонные горизонты. Кругом обозначены результаты измерений, полученные в мае; треугольником – в октябре 2015 г. Пунктиром на рис. (д) отмечена область гипоксии ( $O_2=76$  мкмоль/кг). Пунктиром на рис. (е) отмечена величина (N:P) для Японского моря, равная 12,65.

Благодаря муссонному, климату доминирующие направления ветра меняются дважды в году: весной (конец февраля, начало марта) и осенью (конец августа, начало сентября) (Гайко, 2005). В весенне-летний период доминирует южное и юго-восточное направление ветра. Это направление является “нагонным” по отношению к эстуарию р. Туманной и к самой реке, поскольку последние 40 км перед впадением в Японское море река имеет юг-

юго-восточное направление. Нагонный ветер вдоль долины реки формирует гидрологическую структуру эстуария, отличную от осеннего сезона (рис. 3.2). В осенний сезон доминируют ветра северного, северо-западного направления, которые являются “сгонными” по отношению к речным водам. Несмотря на большой расход реки, в мае наблюдается меньшая мутность речных вод, более высокая концентрация хлорофилла, высокие значения рН и низкие значения рСО<sub>2</sub> (рис. 4.1), что можно объяснить нагонными ветрами в этот сезон, поскольку скорость течения речных вод снижается, происходит седиментация крупной взвеси и уменьшение мутности. Эти физические процессы интенсифицируют фотосинтез – рН возрастает, концентрации биогенных веществ в реке уменьшаются.

”Цветение” фитопланктона в весенний сезон является главной причиной наблюдаемого неконсервативного поведения гидрохимических параметров в придонном слое эстуария. Высокие концентрации хлорофилла (до 20 мкг/л) в верхнем слое эстуария весной (рис. 4.3) указывают на такую возможность. Вероятно “цветение” фитопланктона в верхнем распресненном слое эстуария с последующей седиментацией образовавшейся биомассы в нижний слой и ее дальнейшее микробиологическое разложение обуславливают неконсервативность гидрохимических характеристик в придонном слое. В сравнении с макроприливными эстуариями, где концентрация взвешенного вещества достигает 1000-10000 мг/л, в микроприливных эстуариях концентрация взвешенного вещества, которая обеспечивает необходимые световые условия для фотосинтеза (Monbet, 1992), не столь велика, в диапазоне 100–200 мг/л, а для эстуария р. Туманной – 110 мг/л (рис. 4.3).

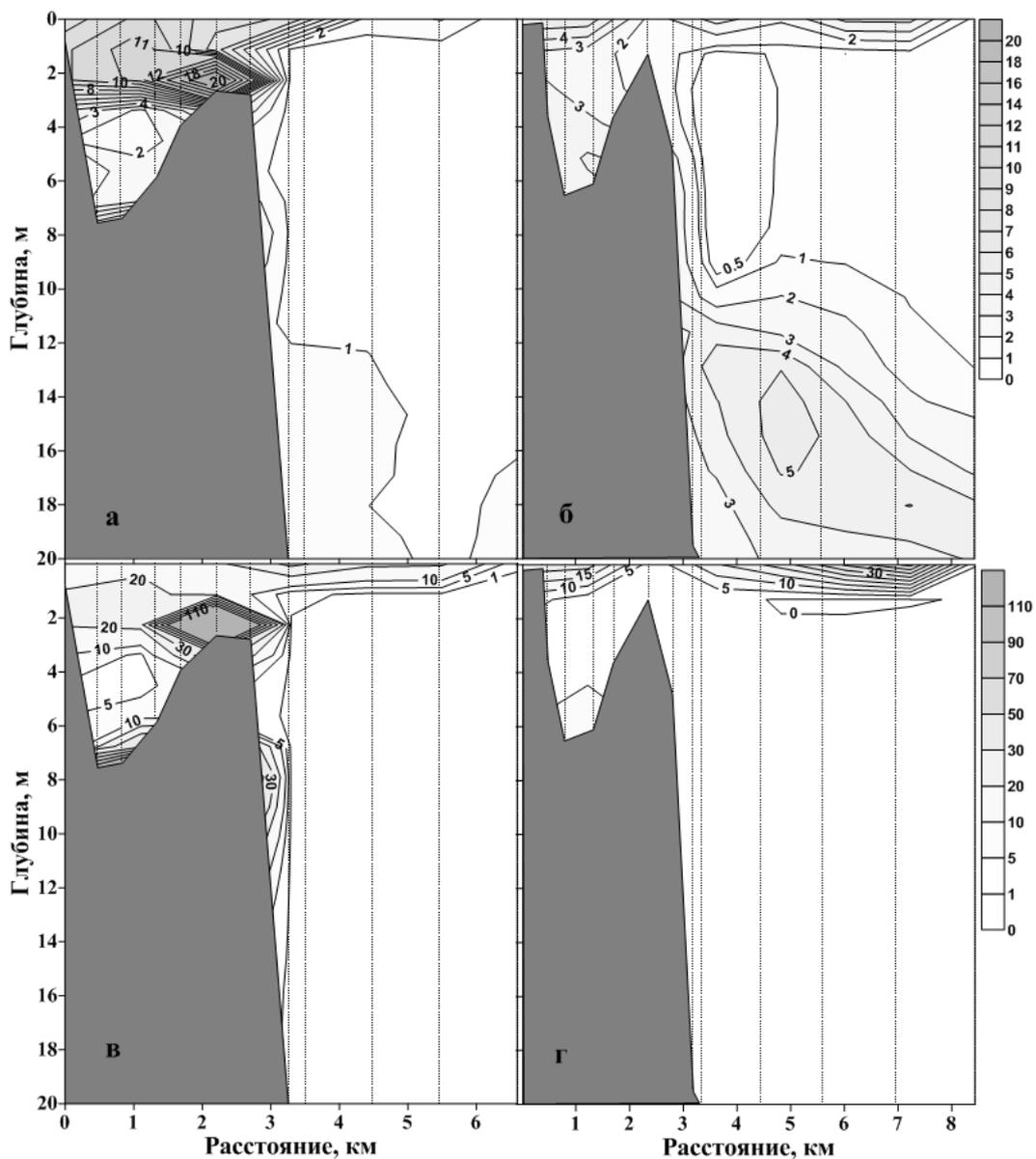


Рис. 4.3. Распределение гидролого-гидрохимических характеристик по данным зондирования на разрезе р. Туманная – ЗПВ, (а, б) – Хлорофилл “а” ( $\text{мг/м}^3$ ), (в, г) – мутность (FTU), (а, в) – май, 2015 г., (б, г) – октябрь, 2015 г.

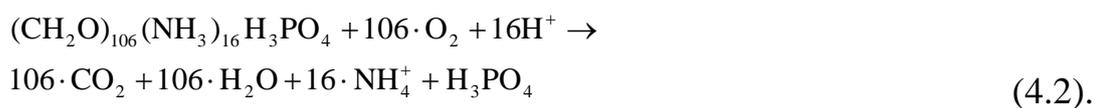
Следует отметить, что “цветение” фитопланктона в эстуарии – не единственный механизм поставки биомассы органического вещества в придонный слой. Другим механизмом может быть гибель речного вида фитопланктона в момент смешения речных и морских вод. Зона смешения находится непосредственно над глубокой частью эстуария. Речной вид фитопланктона в морских водах гибнет и подвергается лизису, что приводит к повышенным концентрациям РОУ (Dagg et al., 2008). Этим объясняется повышенные концентрации РОУ в придонном слое эстуария (рис. 4.1e).

Причиной формирования придонной гипоксии в эстуарии р. Туманной в мае 2015 года является поглощение кислорода в результате деструкции органического вещества автохтонного происхождения. Основанием для такого вывода служит наблюдаемый высокий уровень содержания хлорофилла: до 20 мкг/л в эстуарии и до 10 мкг/л в реке (рис. 4.3). Этот факт указывает на интенсивное "цветение" фитопланктона в эстуарии, которое обусловлено двуслойной гидрологической структурой вод, характерной для микроприливных эстуариев (Михайлов, 1997). Такой тип гидрологической структуры предполагает, что обмен придонных (морских) вод между эстуарием и морем существенно меньше водообмена верхнего слоя вод (Долгополова, Исупова, 2010). Разложение биомассы фитопланктона в условиях низкого водообмена будет приводить к наблюдаемым проявлениям неконсервативного поведения компонентов карбонатной системы, РОУ и биогенных веществ. Созданная в верхнем слое биомасса фитопланктона осаждается на дно, где происходит ее микробиологическая деструкция и формируется гипоксия. Понижение концентрации кислорода у дна сопровождается увеличением содержания аммония, силикатов, фосфатов, ТА и рСО<sub>2</sub>. Эти факты дополнительно свидетельствуют о том, что придонная гипоксия формируется вследствие микробиологического разложения органического вещества в условиях низкой ФАР. Результаты измерения глубины видимости диска Секки (0,5–0,7 м) в мае указывают на то, что глубина фотического слоя составляет 1,5–2 м.

Пути разложения органического вещества разнообразны и зависят, главным образом, от типа и величины концентрации присутствующих в среде окислителей и видов микроорганизмов. В условиях высокой концентрации кислорода происходит аэробное окисление органического углерода, которое сопровождается потреблением кислорода и выделением углекислого газа. Используя стехиометрию Редфилда (Redfield A.C., et al., 1963) для органического вещества, этот процесс формально можно представить следующей схемой:



В процессе аэробного разложения органического вещества образуются двуокись углерода, азотная и фосфорная кислота. Иначе говоря, DIC увеличивается в результате поступления углекислого газа в среду, а TA уменьшается. Однако из полученных в работе результатов следует (рис. 4.1), что в эстуарии р. Туманной происходит одновременное увеличение TA и DIC, а также появляется ион аммония. Необходимо отметить, что содержание кислорода в придонном слое низкое. В условиях ограниченного содержания кислорода, например, на границе раздела вода/осадок, микробиологическое окисление органического вещества происходит в отсутствие нитрификации (An., Gardner, 2002):



Тот факт, что уменьшение концентрации кислорода в придонных горизонтах сопровождается положительными аномалиями в концентрациях фосфат-ионов и ионов аммония, а также параметров карбонатной системы (DIC, TA,  $\text{pCO}_2$ ), указывает на возможность протекания микробиологического процесса согласно схеме (4.2). Действительно, положительные аномалии TA количественно близки положительным аномалиям концентраций  $\text{NH}_4^+$ -ионов (рис. 4.1, 4.2), что также можно объяснить реакцией (4.2). Для придонных горизонтов существуют положительные аномалии кремния (рис. 4.2), которые указывают на основной источник органического вещества – диатомеи и/или флагелляты (Lisitzin, 1985; Treppke et al., 1996). В ходе экологических исследований юго-западной части ЗПВ установлено, что диатомеи являются доминирующим видом фитопланктона в этом районе (Экологическое состояние..., 2000).

Реакциями (4.1) и (4.2) не исчерпывается всё многообразие путей разложения органического вещества, поскольку они не объясняют наблюдаемые изменения азот/фосфорных отношений (N:P) в зависимости от

солености (рис. 4.2е). Установлено, что для Японского моря N:P=12,65 (Тищенко и др., 2007в), это значение отмечено пунктирной линией на рис. 4.2г.). Высокие значения N:P в реке в определенной степени обусловлены обеднением речной воды фосфатами вследствие связывания их взвешенными частицами, содержащими оксиды и оксигидроксиды железа, которые поставляются в реку металлургическим комбинатом, расположенным в Мусане (Zhu et al., 1998). Шлейф мутной воды распространяется от комбината на 30 км, его можно увидеть на спутниковых снимках. Известно, что фосфаты легко сорбируются минеральной взвесью, содержащей оксиды и оксигидроксиды железа (Froelich, 1988). Очевидно, что при смешении речных и морских вод следовало бы ожидать линейное уменьшение N:P от ”речных” значений (50 – в мае и 85 – в октябре, рис. 6е) до величины 12,65, характерной для Японского моря. Особенно этого следовало ожидать для осенней съемки, поскольку наши исследования в октябре проводились после начала осеннего апвеллинга, т.к. в этот период времени шельф залива Петра Великого был частично заполнен промежуточными водами Японского моря. Однако в обеих экспедициях в эстуарии обнаружены образцы воды, N:P которых были существенно ниже значения 12,65. По-видимому, наряду с реакцией (4.2) происходит частичное анаэробное микробиологическое окисление  $\text{NH}_4^+$ -ионов – ANAMMOX (anoxic ammonium oxidation), которое приводит к денитрификации (Thamdrup, Dalsgaard, 2002):



Следует также отметить, что наименьшие величины N:P относятся к области ”цветения”. Для этой области характерно резкое уменьшение концентрации  $\text{NO}_3^-$  ионов в обеих экспедициях. Основная причина – перемешивание речных вод с морской водой, содержащей следовые концентрации  $\text{NO}_3^-$  ионов. В этой же области происходит извлечение нитратов и фосфатов в результате ”цветения” фитопланктона (весенняя экспедиция). В то же время может происходить поступление фосфатов в водную среду в результате их десорбции с речной взвеси. Экспериментально установлено, что

при попадании речной взвеси в морскую среду происходит десорбция фосфат-ионов (Froelich, 1988; Deborde, et al., 2007). Десорбция фосфатов из взвеси будет приводить к уменьшению N:P, что можно ошибочно рассматривать как денитрификацию. Из полученных нами данных невозможно установить действительную причину уменьшения N:P. Вероятно, возможны оба процесса – денитрификация (реакция (4.3)) и десорбция фосфатов с речной взвеси.

Как отмечалось выше, интерес к р. Туманной и ее эстуарию обусловлен потенциальной возможностью ее участия в эвтрофикации юго-западной акватории залива Петра Великого. Из полученных в работе характеристик эстуария р. Туманной следует, что “время жизни” речных вод в эстуарии короткое, поэтому основная речная водная масса, содержащая растворенные в ней вещества, проходит эстуарий транзитом в открытую часть Японского моря.

Интенсификация потоков биогенных веществ в юго-западную часть ЗПВ может быть причиной возникновения сезонной гипоксии придонных вод Дальневосточного морского биосферного заповедника. Содержание биогенных веществ в р. Туманной измеренное в разные сезоны приведено в Таблице 4.1.

Таблица 4.1. Гидрохимические характеристики воды р. Туманной в разные сезоны. Здесь: DIP – растворенный неорганический фосфор (dissolved inorganic phosphorus) (мкмоль/л); Робщ – общая (органическая и неорганическая) концентрация фосфора (мкмоль/л); DISi – Растворенные неорганические силикаты (dissolved inorganic silicates) (мкмоль/л); DIN – растворенный неорганический азот (dissolved inorganic nitrogen) (мкмоль/л); Нобщ – общая (органическая и неорганическая) концентрация азота (мкмоль/л); РОУ – растворенный органический углерод (мг/л); Q – расход реки (м<sup>3</sup>/с), рассчитанный из среднемесячных данных (Wei et al., 1999).

Дата	DIP	Робщ	DISi	DIN	Нобщ	РОУ	Расход(Q)
5/18/2015	1	1,03	157	46,6	56,5	3,5	264
10/22/2015	1,5	2,28	238	106,5	147	4,1	321
3/21/2016	5	5,72	163	166,3	190	4,1	95
2/15/2017	1,5	1,84	250	192	200	3,8	20
4/25/2017	1,5	1,47	180	91	110	2,9	190
7/19/2017	2,9	3,34	264	92	117	4,7	511
10/28/2017	0,2	1,54	67	33	72,6	4,3	271

На основе собственных данных о содержании биогенных веществ, полученных в разные сезоны в р. Туманной (Таблица 4.1), а также в реках Гладкой, Тесной и Цукановке, были оценены годовые потоки биогенных

веществ в юго-западную часть ЗПВ. В этих расчетах были использованы литературные данные о среднемесечном расходе реки Туманной (Wei et al., 1999). Годовые потоки биогенных веществ рекой Туманной в юго-западную часть ЗПВ и реками Гладкой, Тесной и Цукановкой в б. Экспедиции приведены в Таблице 2. Для сравнения здесь же приведены годовые потоки биогенных веществ р. Раздольной в Амурский залив (Михайлик и др., 2011).

Таблица 4.2. Годовой поток биогенных веществ (Т/год) р. Туманной в западную акваторию ЗПВ, реками Гладкой, Тесной и Цукановкой в б. Экспедиции и р. Раздольной в Амурский залив.

Река	Поток (F) <sub>DIP</sub>	Поток(F) <sub>DIN</sub>	Поток(F) <sub>DISi</sub>	Поток(F) <sub>POU</sub>
Туманная	450	11601	54550	34804
Гл+Цук+Тес	4,7	124	2874	933
Раздольная	120	1800	17040	13710

Из таблицы 4.2 видно, что потоки биогенных веществ и органического углерода, обусловленные стоком р. Туманной, более чем в 100 раз больше чем суммарные потоки, поставляемые реками Гладкой, Цукановкой и Тесной и в 3–5 раз больше потоков, обусловленных р. Раздольной в Амурский залив. Необходимо отметить, что эстуарий р. Туманной является микроприливным с ”временем жизни” речных вод около 10 час. Поэтому основная речная водная масса, содержащая растворенные в ней вещества, проходит эстуарий транзитом в открытую часть Японского моря. Суточные потоки в приустьевую зону р. Туманной составили: 1,2; 31; 149; 95 и 2240 Т/сутки растворенных неорганических форм фосфора, азота, кремния, а также РОУ и взвешенного вещества, соответственно. Как, правило, основной поток речной воды, вытекающий из устья реки, имеет юго-западное направление, по-видимому, благодаря влиянию Приморского течения. Тем не менее, не исключается возможность эвтрофикации юго-западной акватории ЗПВ рекой Туманной. Площадь аноксии в морском заповеднике занимала 15– 20 км<sup>2</sup>, а толщина слоя 3–5 м. Для того чтобы возникла аноксия, достаточен поток воды р. Туманной слоем 0,5 м в направлении гипоксии в течение недели, что может возникнуть

под действием устойчивого западного – юго-западного ветра в течение недели. В этой оценке учитывается, что по пути движения половина биогенных веществ теряется на фотосинтез, не достигнув района обнаруженной гипоксии. Ветер такого направления возникает в феврале-марте и в октябре-ноябре, что согласуется по времени “цветения” фитопланктона в акватории морского заповедника.

В 2014 г., в период с 21 июня 2014 по 20 мая 2015 в области гипоксии у дна на глубине 34 м (координаты: 42° 28,301' и 130° 53,046) была установлена мониторинговая станция WQM (Water Quality Monitor) фирмы Wet Labs, оснащенная датчиками давления, температуры, электропроводности, кислорода, флуорисценции хлорофилла *a* и мутности. В течение одиннадцати месяцев, каждые три часа производилась запись показаний датчиков. Результаты этой станции показали сезонный характер гипоксии (рис. 4.4). Причиной разрушения гипоксии является осенний апвеллинг. Средняя скорость формирования гипоксии равна – 6,6 мкмоль/(кг·сут.). Общая площадь акватории, находящейся в условиях гипоксии составляла 15 – 20 км<sup>2</sup>. Скорость разрушения гипоксии была 40 мкмоль/(кг·сут.). Повторные долгопериодные измерения с помощью WQM подтвердили формирование сезонной гипоксии в данном районе (2015–2016 гг.).

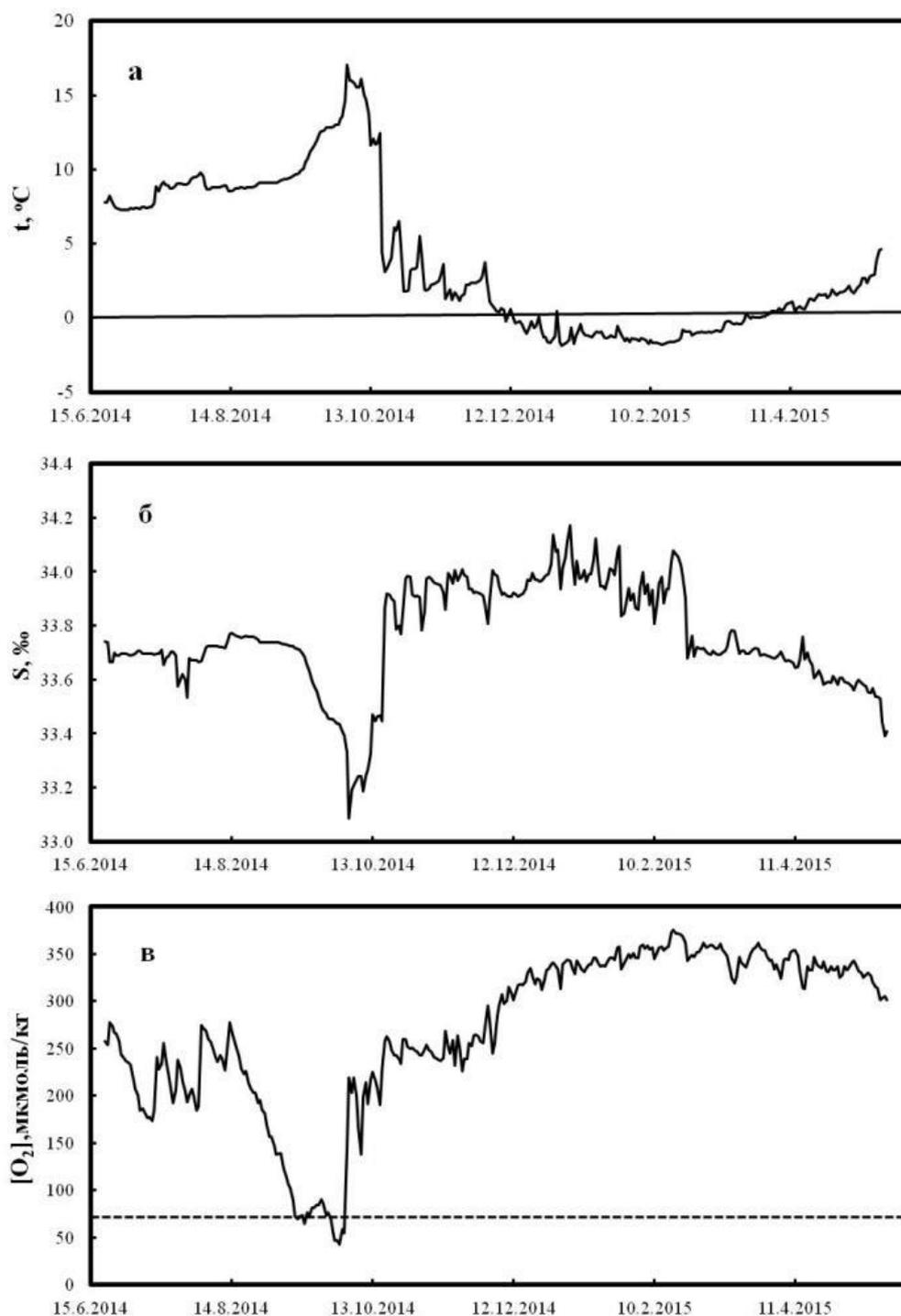


Рис. 4.4. Временная изменчивость температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) (а), солёности ( $\text{‰}$ ) (б) и содержания кислорода (мкмоль/кг), в зоне гипоксии у дна на глубине 34 м (координаты:  $42^{\circ} 28,301'$  и  $130^{\circ} 53,046'$ ) по данным станции WQM. Горизонтальная линия соответствует пороговому значению концентрации кислорода 76 мкмоль/кг.

Прямое доказательство аноксии (концентрация  $\text{O}_2$  на уровне аналитического нуля) придонных вод в ЮРЗ – массовый замор морских звезд и червей, который был зарегистрирован подводной фотосъемкой. Эти организмы

обладают высокой толерантностью к низким содержаниям кислорода, но в данном случае они были мертвы.

#### **4.2. Эстуарий р. Раздольной**

В августе 2011 г. в эстуарии реки Раздольной была обнаружена гипоксия в 19 км выше от устьевого бара реки. Низкая концентрация кислорода, 14,70 мкмоль/кг (0,33 мл/л) наблюдалась в придонном горизонте одного из плесов в ходе повторной экспедиции в сентябре 2014г (район гипоксии схематично обозначен на рис. 4.5). Данный плес является своеобразной седиментационной ловушкой взвешенного органического вещества. Соленость верхнего горизонта 0,53‰ (соленость придонного горизонта – 13,54‰). Устойчивая стратификация препятствует вертикальному перемешиванию вод в пределах плеса. Придонный горизонт обогащен РОУ. Именно в этом месте наблюдалась максимальная концентрация РОУ (6,32 мгС/л) из всех исследуемых проб воды данной экспедиции. Одна из возможных причин накопления органического вещества – встреча пресноводного фитопланктона с солеными водами, приводящая к лизису клеток фитопланктона (Dagg et al., 2004). Следует отметить, что максимальные концентрации хлорофилла *a* наблюдались в речных водах (до 40 мкг/л). Т.е. в реке, в этот период происходило цветение фитопланктона. Концентрация его над областью гипоксии была 8 мкг/л, а в придонном горизонте – 1,5 мкг/л т.е. часть фитопланктона, по-видимому, уже была извлечена из фотического слоя и погрузилась в придонный горизонт, где ФАР=0.

Внешней частью ЗС эстуария р. Раздольной является Амурский залив. Механизмы формирования и разрушения гипоксии, ее продолжительность и динамика в Амурском заливе подробно описаны в работах (Тищенко, 2013; Тищенко и др., 2015; Tishchenko et al., 2016). Одновременное сосуществование гипоксии во внешней и внутренней части ЗС впервые установлено. В период с 24 по 26 сентября в эстуарии р. Раздольной было выполнено 15 гидрохимических станций (рис. 4.5), которые также включали STD -

зондирование с помощью зонда RINKO оборудованного датчиками температуры, электропроводности, O<sub>2</sub>, флуоресценции хлорофилла и мутности.

Обнаружено, что кислород имеет определенную симметрию распределения в обеих частях эстуария по отношению к бару.

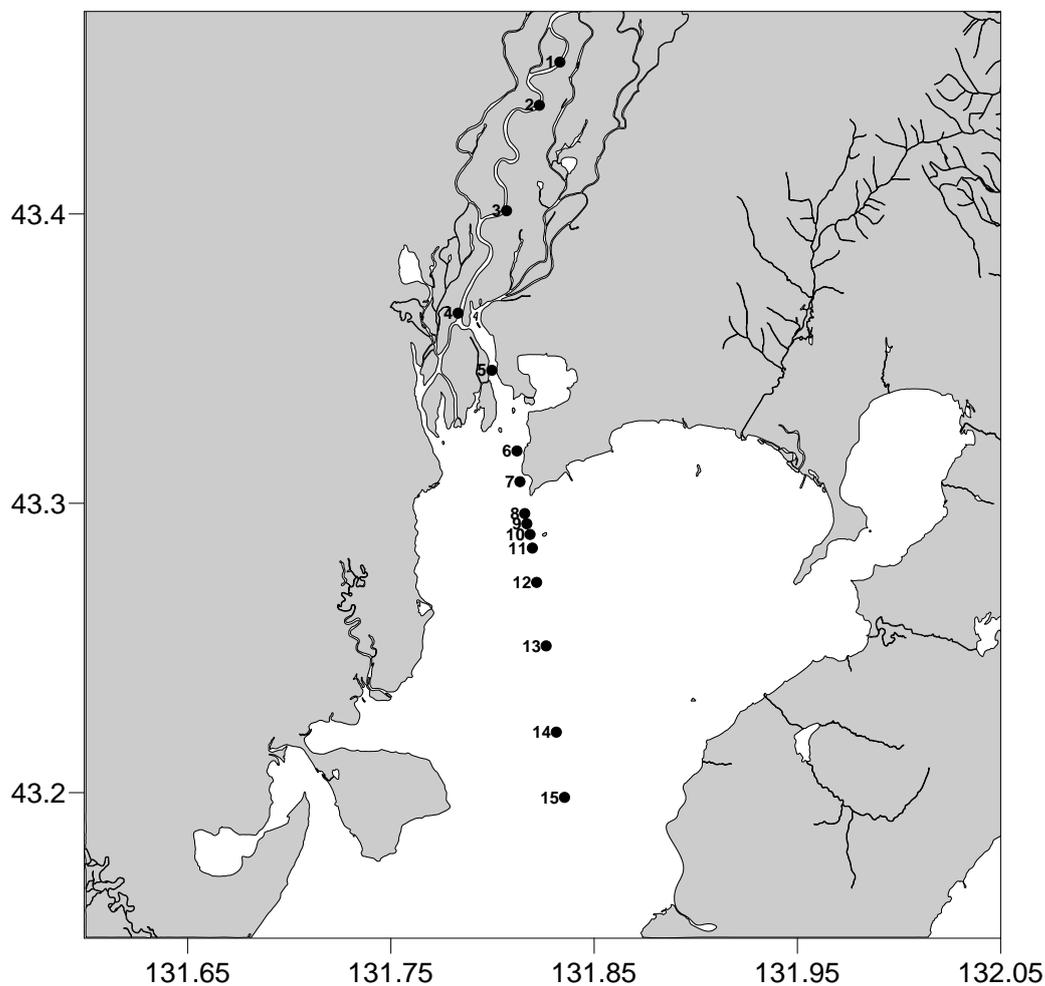


Рис. 4.5. Схема расположения станций в эстуарии р. Раздольной во время съемки 24, 26 сентября, 2014 г. На станциях 1, 2, 3 наблюдалась гипоксия.

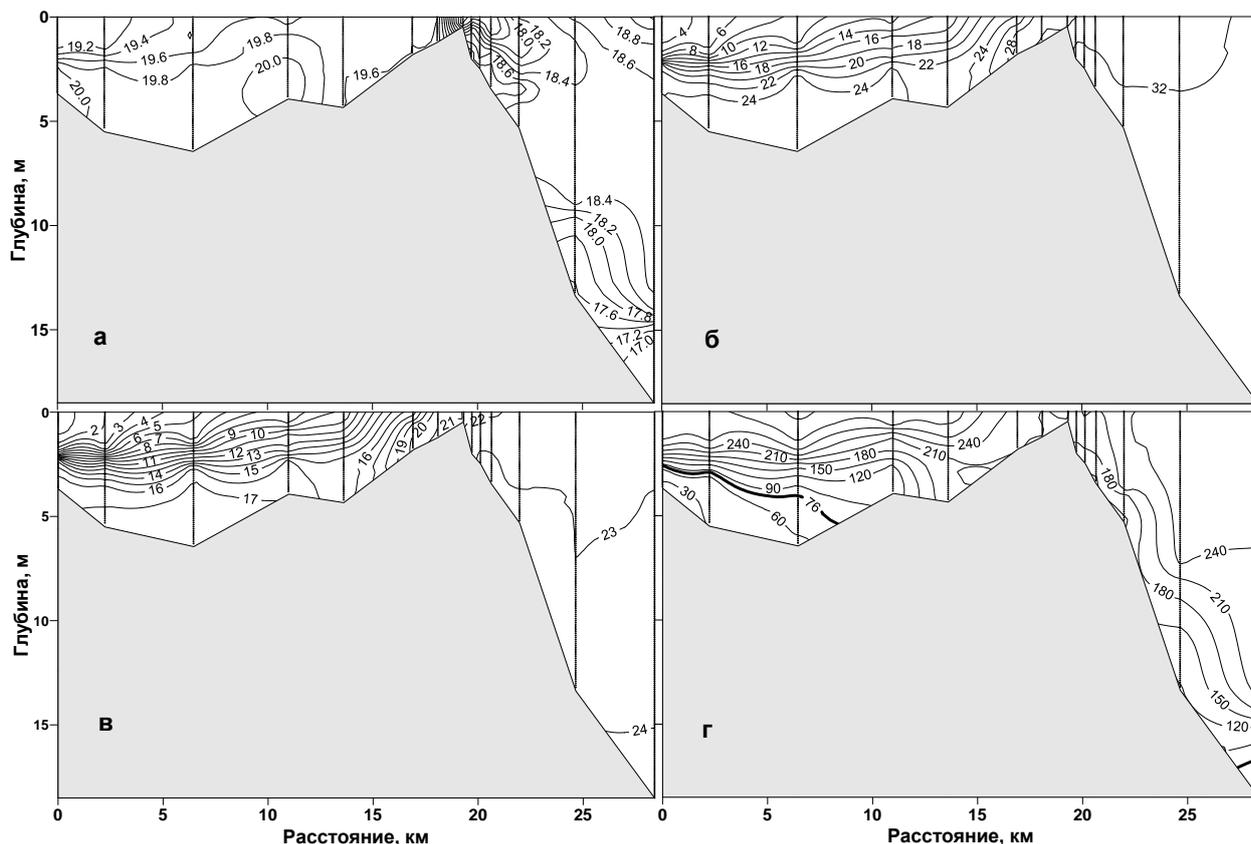


Рис. 4.6. Распределения гидролого-гидрохимических характеристик по данным зондирования в эстуарии реки р. Раздольной и в Амурском заливе (река - слева) 26 сентября, 2014 г: а – температура ( $^{\circ}\text{C}$ ), б – соленость ( $\text{‰}$ ), в – условная плотность, г – растворенный кислород ( $\mu\text{моль/кг}$ ). Жирная изолиния на рис. г соответствует «пороговой» концентрации кислорода 76  $\mu\text{моль/кг}$ .

В поверхностных горизонтах наблюдались близкие максимальные концентрации кислорода, а у дна минимальные концентрации (соответственно, 300 и менее 60  $\mu\text{моль/л}$ ; рис. 4.6а). Одновременно с этим, гидрологические и гидрохимические характеристики воды обнаруживают резкое различие их величин в речной и мористой частях ЗС (рис. 4.6, 4.7). Это различие более контрастно выражено для N/P отношений и  $\text{pCO}_2$  (рис. 4.7в-4.7г).

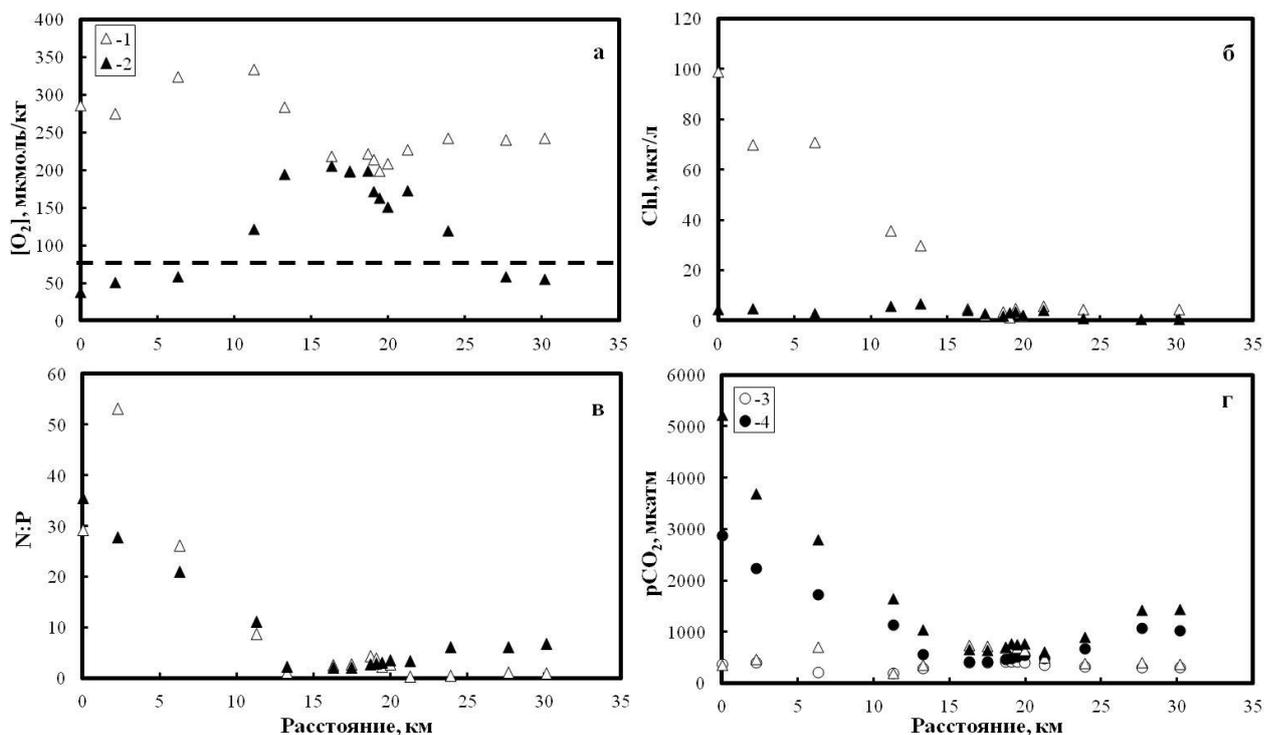


Рис. 4.7. Распределения концентраций измеренных в лаборатории гидрохимических характеристик в эстуарии реки р. Раздольной и в Амурском заливе (река - слева): а – кислород; б – хлорофилла; в – N/P отношение; г – парциальное давление углекислого газа, рассчитанное из измерений pH, TA (путь (а) – 1, 2); DIC, TA (путь (б), модель (2) – 3, 4). 1, 3 – верхний горизонт; 2, 4 – придонный горизонт. Пунктирная линия рис. а соответствует “пороговому” уровню кислорода 76 мкмоль/кг. Бар располагается на 17,5 – 20,0 км на шкале расстояний.

Как показано ранее, гипоксия придонных вод Амурского залива в летний сезон наблюдается при отсутствии апвеллинга и обусловлена разложением оседающего с поверхностного горизонта ”избыточного” фитопланктона в условиях дефицита света у дна (Тищенко, 2013). Вследствие большого расхода реки в паводковый период акватория Амурского залива покрывается распресненным слоем воды, обогащенной биогенными веществами, а выше бара в реке, как правило, морские воды вытесняются речной водой. Причиной формирования придонной гипоксии в сентябре 2014 года в речной части эстуария р. Раздольной, как и в мористой его части, также является поглощение кислорода в результате деструкции органического вещества автохтонного происхождения. Основанием для такого вывода служит наблюдаемый необычайно высокий уровень содержания хлорофилла: до 30 мкг/л по данным зондирования и до 100 мкг/л по результатам лабораторных измерений (рис.

4.7б). Этот факт указывает на интенсивное "цветение" фитопланктона в речной части эстуария, которое, в отличие от цветения в мористой его части, обусловлено уникальной гидрологической структурой вод, сложившейся на момент съемки. По данным ПУГМС расход реки в период наблюдений был низким и составлял 15–24 м<sup>3</sup>/с. В условиях малого расхода реки теплые морские воды заполнили придонную речную часть эстуария и в районе первых пяти станций (рис. 4.5) образовали с менее теплыми речными водами (на момент съемки началось сезонное охлаждение суши) пикноклин на горизонте 2,0–2,5 метра. В пределах метра условная плотность увеличивалась от 2 до 14 (рис. 4.6в). Существенным моментом при этом является то обстоятельство, что этот пикноклин сформирован по "диффузному типу", когда нижележащий слой является более теплым и более соленым, в сравнении с вышележащим слоем (Тернер, 1977). Из-за разной скорости потоков тепла и соли такой тип стратификации обеспечивает высокую интенсивность конвекции внутри каждого слоя и формирует резкую достаточно устойчивую во времени границу между слоями. Такая граница раздела рассматривается как "жидкое дно", над которым находится слой распресненных вод, обогащенных биогенными веществами, что обеспечивает благоприятные условия для "цветения" фитопланктона. Созданная в верхнем слое биомасса фитопланктона (в основном, диатомеи) осаждается на дно, где происходит ее микробиологическая деструкция и формируется гипоксия. Резкое понижение концентрации кислорода у дна сопровождается значительным увеличением содержания аммония, силикатов, фосфатов и рСО<sub>2</sub>. Эти факты дополнительно свидетельствуют о том, что придонная гипоксия формируется вследствие микробиологического разложения органического вещества в условиях весьма низкой ФАР (фотосинтетически активной радиации).

Формирование придонной гипоксии в речной и мористой частях эстуария происходит вследствие одних и тех же процессов: биосинтез "избыточной" биомассы фитопланктона в приповерхностном слое, последующее его осаждение на дно и бактериальная деструкция. При этом кислород

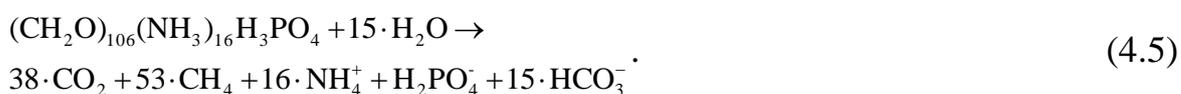
обнаруживает определенную симметрию распределения в обеих частях эстуария по отношению к бару. Однако формирующиеся при этом аномалии других гидрохимических параметров существенно отличаются в двух частях эстуария, что наиболее контрастно проявляется в величине N/P отношения и  $p\text{CO}_2$ . Так, в речной части  $N/P \approx 30-50$ , в мористой – менее 10 (рис. 4.7в). Величина  $p\text{CO}_2$  в реке у дна достигает более 5000 мкатм, тогда как в заливе она составляет менее 1500 мкатм (рис. 4.7г). Высокое N/P в определенной степени обусловлено обеднением речной части эстуария фосфатами вследствие связывания их железом. Содержание растворенных и взвешенных форм железа в речных водах значительно выше, чем в морских (Шулькин и др., 2009). Известно, что фосфаты легко сорбируются минеральной взвесью, содержащей, оксигидроксиды железа (Froelich, 1988). Напротив, пониженное N/P отношение в мористой части эстуария обусловлено денитрификацией неорганического азота ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$ ), когда он превращается микроорганизмами в газоподобные, менее доступные в биологическом отношении формы ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ ) (Lam and Kuipers, 2011). Содержание этих форм азота не учитывается в расчетах N:P отношений. Процесс денитрификации возможен при концентрациях кислорода 20 мкмоль/кг и ниже (Lam and Kuipers, 2011). Возможно, такие условия реализуются в Амурском заливе в течение летнего сезона непосредственно на границе раздела “вода/осадок”. Таким образом, сорбция фосфатов на минеральной взвеси в речной части эстуария и денитрификация минеральных форм азота в мористой его части формируют контрастное различие величин N/P отношений в двух частях эстуария.

Резкое различие в величине  $p\text{CO}_2$  в противоположных частях эстуария обусловлено, прежде всего, более низкой буферной емкостью речных вод, по сравнению с морскими водами. Это означает, что окисление одинакового количества органического вещества будет приводить к существенно большему увеличению  $p\text{CO}_2$  в речной части эстуария. Подтверждением этой точки зрения является оценка  $p\text{CO}_2$ , проведенная в предположении, что микробиологическое окисление органического вещества происходит в отсутствие нитрификации.

Используя «формулу» органического вещества в стехиометрии Редфилда, микробиологическое окисление протекает по уравнению (4.2). Соотношение (4.2) позволяет рассчитать концентрацию DIC по уравнению (4.4):

$$DIC = DIC_o + [O_2]_o - [O_2], \quad (4.4)$$

Здесь  $DIC_o - DIC$ , рассчитанное из данных измерения ТА и атмосферного  $pCO_2$  (400 мкатм);  $[O_2]_o$ ,  $[O_2]$  – концентрация растворенного кислорода, рассчитанная из условия равновесия с атмосферой и инструментально измеренная, соответственно. Используя две пары карбонатных параметров – а) измеренные значения pH и ТА; б) модельные значения DIC (уравнение (4.4)) и ТА, были рассчитаны  $pCO_2$ , которые представлены на рис. 4.7г. Для верхнего горизонта значения  $pCO_2$ , полученные из измерений карбонатных параметров (путь (а)) и с использованием модельного уравнения (4.4) (путь (б)) достаточно хорошо согласуются между собой. Для придонного горизонта значения  $pCO_2$ , полученные путем (а) существенно (более, чем в 1,5 раза) выше рассчитанных из измерений щелочности и кислорода (путь (б), модель (4.4)) (рис. 4.7г). Очевидно, что найденное из измерений карбонатных параметров (pH, ТА) «избыточное»  $pCO_2$  у дна обусловлено не только окислением органического вещества, но и потоком углекислого газа из донных осадков, которое более значимо в речной части эстуария (рис. 4.4г). Дополнительным источником  $CO_2$  у дна может быть метаногенез – разложение органического вещества в отсутствие внешних окислителей (Froelich, 1988):



Таким образом, более низкая буферная емкость вод и большая интенсивность метаногенеза могут формировать аномально высокое парциальное давление углекислого газа у дна в речной части эстуария.

Эстуарии являются маргинальными фильтрами, в том числе для биогенных веществ, поставляемых реками, тем самым препятствуют эвтрофикации приемных бассейнов. Из результатов следует, что в случае большого стока р. Раздольной, маргинальным фильтром для биогенных веществ является

акватория всего Амурского залива (Звалинский и др., 2008). Именно здесь происходит иммобилизация биогенных веществ в органическое вещество (фитопланктон), с последующей его седиментацией в донные отложения (Тищенко, 2013). Этот процесс препятствует эвтрофикации открытой части ЗПВ. Однако, в малую воду (на момент исследования речной части эстуария, 24 сентября, расход реки был  $15 \text{ м}^3/\text{с}$ ), при определенных гидрологических условиях, маргинальным фильтром для биогенных веществ может служить также внутренняя часть эстуария реки, что понижает интенсивность эвтрофикации Амурского залива.

#### **4.3. Эстуарий р. Партизанской**

Эстуарий реки Партизанской – наименее эвтрофированная акватория в сравнении с эстуариями таких загрязненных рек как Туманная, Раздольная, Артемовка с Кневичанкой, в которых ранее были обнаружены случаи нарушения кислородного режима и гипоксия (Семкин и др., 2015; Тищенко и др. 2017; Тищенко и др. 2018; Semkin et al., 2013). Однако в июле 2012 года, в ходе выполнения комплексной съемки, в средней части продольного профиля эстуария р. Партизанской (рис. 4.8.) была обнаружена гипоксия с падением концентрации  $\text{O}_2$  до  $61 \text{ мкмоль/кг}$ . Концентрация  $\text{O}_2$  за пределами ЗС для речной и морской воды превышали соответственно  $250$  и  $280 \text{ мкмоль/кг}$ .

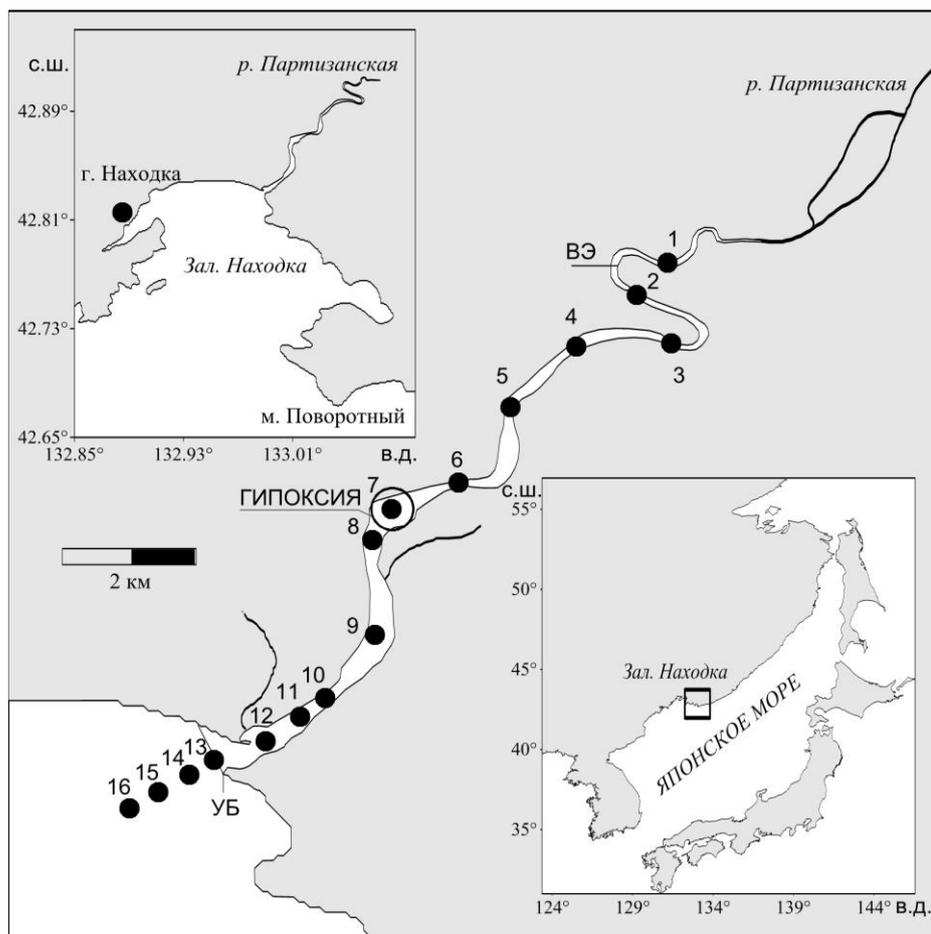


Рис. 4.8. Географическое положение эстуария реки Партизанской (залив Находка, Японское море) и схема станций отбора проб воды и зондирования 18 – 19 июля 2012 г. ВЭ – вершина эстуария. УБ – устьевой бар реки. Ст. 7 – песчаный перекал с гипоксией в придонном слое воды.

Данные гидрологического зондирования (рис. 4.9.) позволили приблизительно оценить объем пресной воды в районе ЗС – около  $2,75 \times 10^6 \text{ м}^3$  (слой воды 1 м, средняя ширина реки 250 м, дальность проникновения ЗС 11 км). Зная расход реки в период съемки в июле 2012 ( $20,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ), можно по известному соотношению  $T_f = V / Q$ , где  $T_f$  – время “жизни” пресных вод в эстуарии,  $V$  – объем пресных вод,  $Q$  – расход реки (Priya et al., 2012) рассчитать время, необходимое для полной замены пресных вод в ЗС (время “жизни” пресных вод (flushing time)). Из соотношения следует, что величина  $T_f = 38$  часов для расхода воды в летнюю межень. Расход воды сильно зависит от сезона. При минимальном расходе в зимний сезон (около  $7 \text{ м}^3/\text{с}$ ) протяжённость ЗС сокращается, время “жизни” увеличивается до 4-х суток. В весеннее половодье при расходе реки  $73 \text{ м}^3/\text{с}$  оно сокращается до 4,5 часов.

Время “жизни” морских вод в ЗС определяется соотношением продолжительности и интенсивности потоков прямых и обратных течений в придонном слое воды в районе устьевого створа. Исследование внутрисуточной изменчивости динамики вод в эстуарии р. Партизанкой показало наличие устойчивого обратного течения в придонном слое воды (в направлении реки) со скоростью до 18 см/с в малые воды и в приливную фазу в период летней межени (Семкин и др., 2013; Семкин и др., 2018б). Течение с указанной скоростью обеспечивает проникновение морской воды за период менее 12 часов до песчаного переката с наблюдаемой гипоксией (в районе ст. 7), расположенного в 5,5 км от устьевого бара. Очевидно, что при такой интенсивности водообмена в придонном слое на участке от устьевого бара до указанного переката морские воды будут заполнять русло эстуария без изменения солености, что мы и видим в действительности (рис. 4.9а). В результате развитой эстуарной циркуляции формируется высокая устойчивость слоев воды с мощным пикноклином, что характерно для микроприливных русловых эстуариев (Михайлов, 1997). Формирующийся пикноклин можно рассматривать как жидкое дно, на котором скапливается фитопланктон.

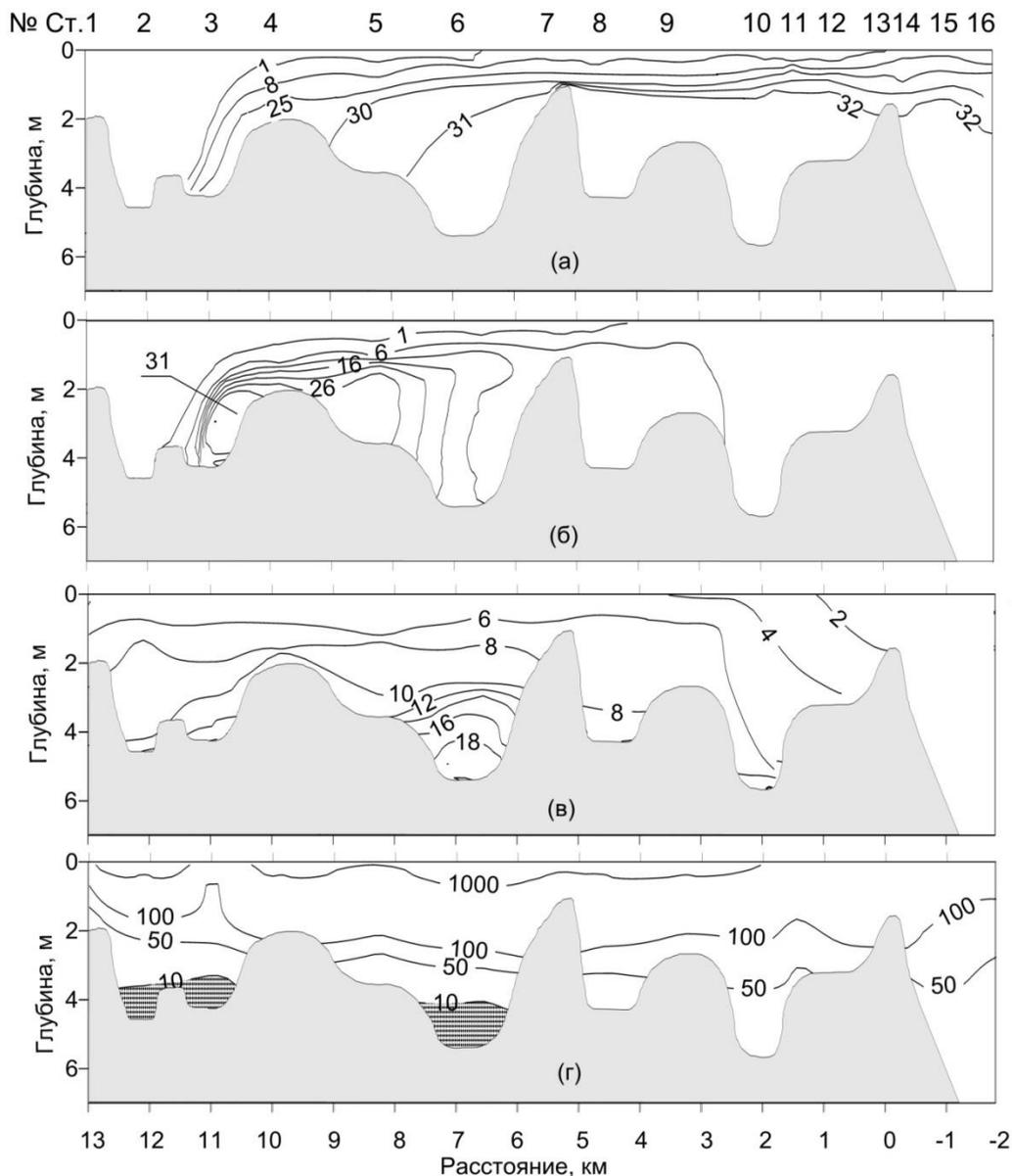


Рис. 4.9. Изменчивость характеристик воды по данным зондирования в продольном профиле наибольших глубин эстуария р. Партизанская 18–19 июля 2012 г. при расходе реки  $20,1 \text{ м}^3/\text{с}$ : а – соленость воды (‰), б – концентрация хлорофилла *a* (мкг/л), в – мутность в единицах «formazin turbidity units» (FTU), г – фотосинтетически активная радиация (ФАР) Слева – река, справа – море. Отсчет расстояния – от гребня устьевых бара реки.

Пережат на ст. 7 ограничивает проникновение морских вод выше по течению реки. Для этого района характерна соленость менее 5 ‰. Однако в полные воды (ПВ) на пережате наблюдалось кратковременное повышение солёности до 31‰ (Семкин и др., 2018б), которое было связано с потоком обратных (в направлении реки) и прямых (в направлении моря) течений. Таким образом, солёность на пережатке могла повышаться за счет воды, пришедшей из района плеса, расположенного на ст. 6 (рис. 4.9а). Пробоотбор воды на пережатке

ст. 7 в июле 2012 г. выполняли в "момент" «полные воды + 4 часа», когда в придонном горизонте могут формироваться прямые течения (в направлении моря). Соленость на ст. 7 соответствовала солености вод на ст. 6. Как видно из рис. 4.9б, ограниченный водообмен способствовал развитию микроводорослей в морской воде, особенно в начале ЗС в районе ст. 3, где по данным зондирования концентрация хл. *a* на нижней границе халоклина была выше 31 мкг/л, а концентрация хл. *a* + фео в придонном горизонте достигала 41 мкг/л. Район ЗС с высокой концентраций хл. *a* можно рассматривать как биологическую систему маргинального фильтра (Лисицын, 1994). В этом районе наблюдаются максимальные концентрации взвеси: повышается мутность (рис. 4.9в) и снижается ФАР в придонных водах (рис. 4.9г). Доминирование деструкции ОВ в условиях отсутствия ФАР – естественное явление для придонных вод в ЗС, сопровождаемое поглощением  $O_2$ , повышением  $pCO_2$  и ростом концентрации биогенных веществ (нитратного азота и фосфатов). Концентрация  $O_2$  в области гипоксии снизилась до 61 мкмоль/кг, в то время как за пределами ЗС для речной и морской воды концентрация  $O_2$  превышала соответственно 250 и 280 мкмоль/кг (рис. 4.10б). Микробиологическое окисление биомассы фитопланктона в аэробных условиях, в соответствии со стехиометрией Редфилда (Redfield et al., 1963), можно представить соотношением (4.1)

В условиях ограниченного содержания кислорода, например, на границе раздела вода/осадок, микробиологическое окисление органического вещества происходит в соответствии со схемой (4.2) (An., Gardner, 2002). Тот факт, что уменьшение концентрации кислорода в придонных горизонтах сопровождается увеличением  $pCO_2$  (рис. 4.10в) и ионов аммония без повышения нитратов (рис 4.11а, б), подтверждает протекание микробиологического процесса согласно схеме (4.3).

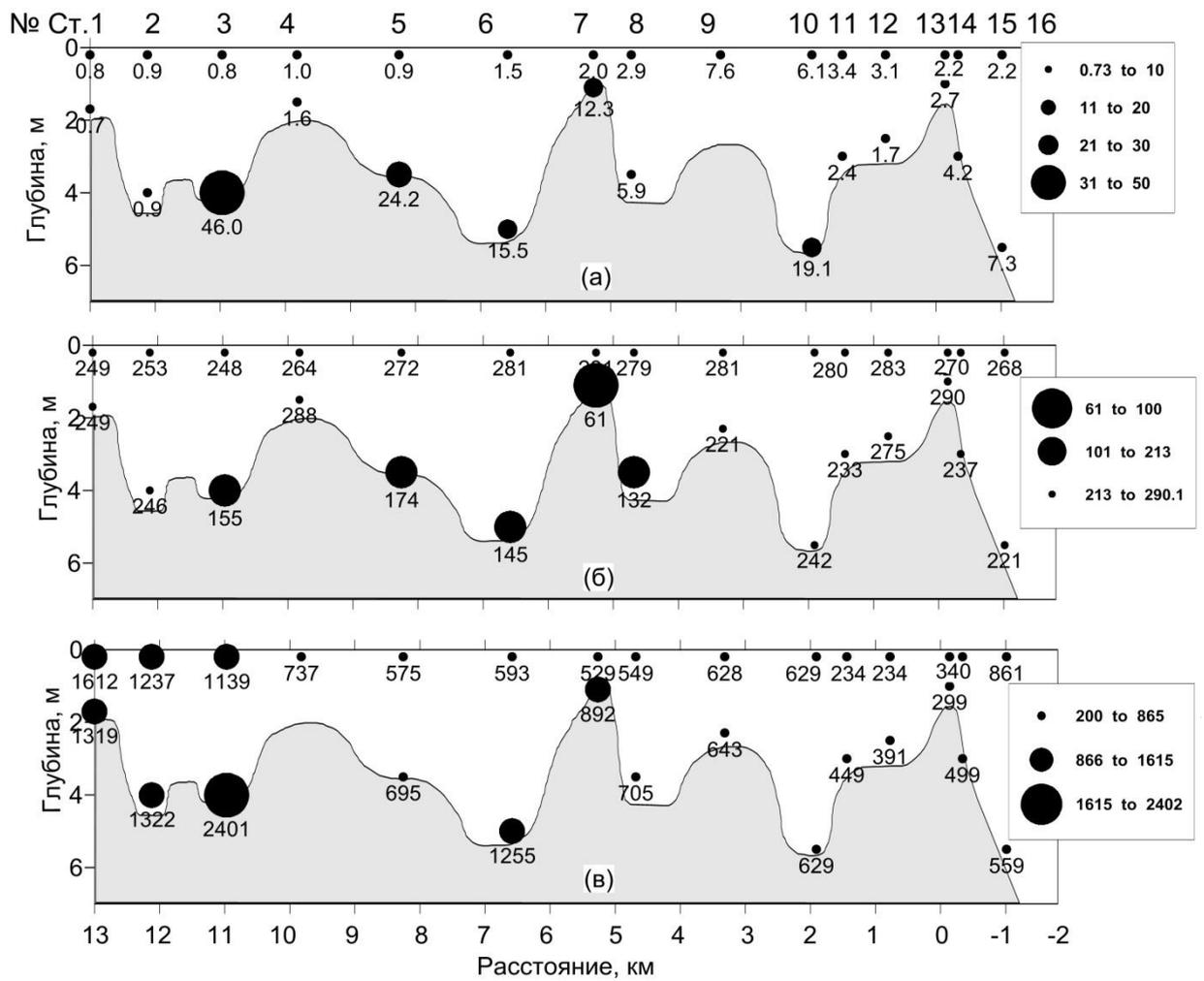


Рис. 4.10. Изменчивость гидрохимических характеристик в поверхностных и в придонных пробах воды, отобранных в продольном профиле эстуария р. Партизанской 18–19 июля 2012 г. при расходе реки 20,1 м<sup>3</sup>/с: а – концентрации хлорофилла *a* (мкг/л), б – концентрация O<sub>2</sub> (мкмоль/кг), в – парциальное давление CO<sub>2</sub> (мкاتم).

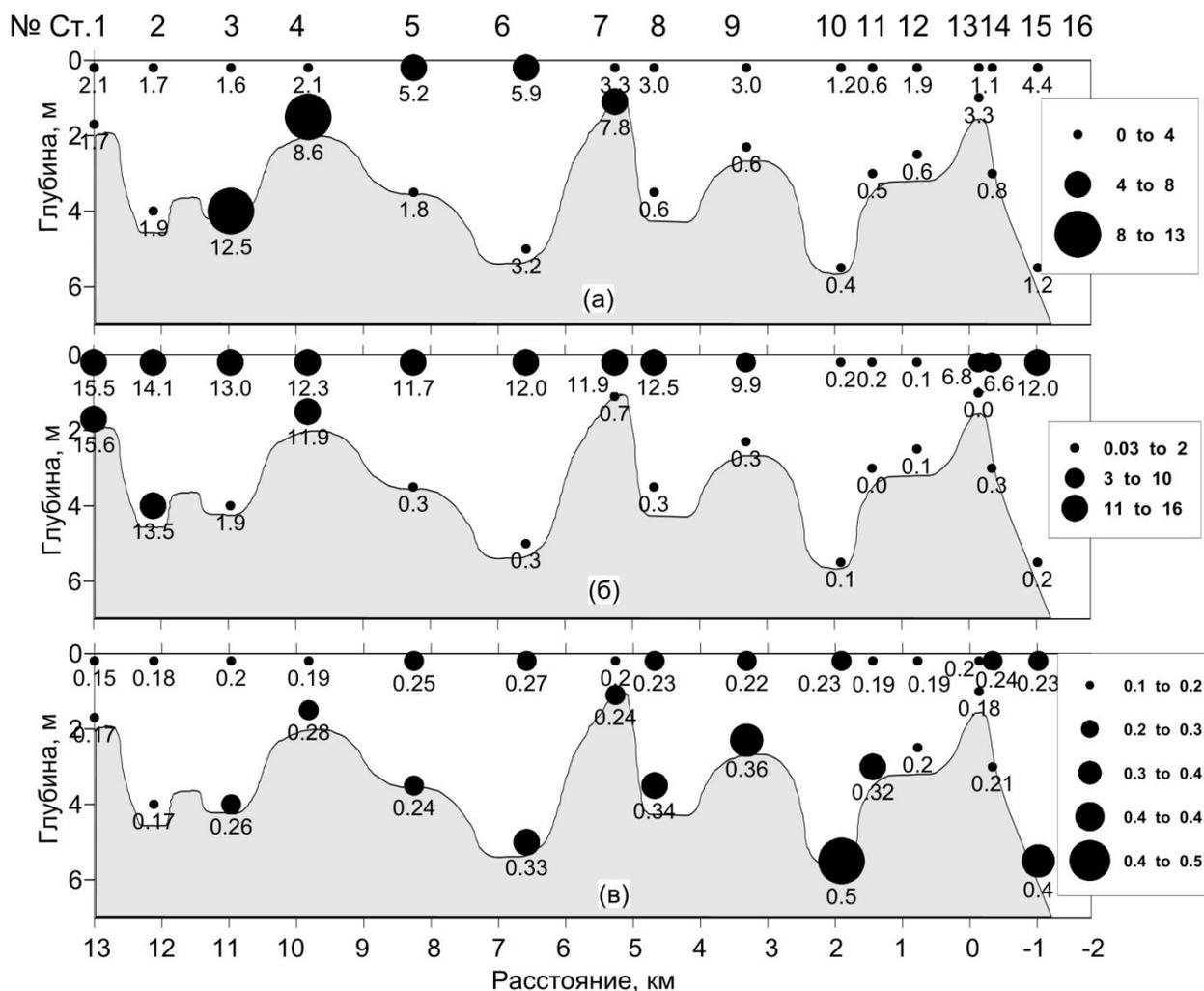


Рис. 4.11. Концентрация биогенных веществ в поверхностных и в придонных пробах воды, отобранных в продольном профиле эстуария р. Партизанской 18–19 июля 2012 г. при расходе реки  $20,1 \text{ м}^3/\text{с}$ : а – аммонийный азот (мкмоль/л), б – нитратный азот (мкмоль/л), в – фосфат ионы (мкмоль/л).

Как видно из рис. 4.11в, речные воды имеют низкие концентрации фосфатов, а также отсутствует корреляция фосфатов с  $\text{O}_2$ , аммонийным азотом и величиной  $\text{pCO}_2$ . Этот факт может объясняться сорбцией фосфатов минеральной взвесью, содержащей оксигидроксида железа (Froelich, 1988). По концентрации растворенных форм железа река Партизанская занимает четвертое место в списке рек Приморья после Артемовки, Туманной и Раздольной (Шулькин, Семькина, 2012). В меженные режимы в реках Приморского края отмечается увеличение концентрации растворенных форм железа (Шулькин и др., 2009).

Характерной особенностью гидрохимических характеристик в районе гипоксии реки Партизанской является минимальная концентрация  $O_2$  (61 мкмоль/кг) на песчаном перекате на глубине 1,5 м, где визуально просматривалось дно, т. е. фотический слой был до дна. Величина  $pCO_2$  на дне достигала 890 мкатм при солености около 30‰, что сходно с условиями гипоксии в акваториях ЗПВ (Тищенко и др., 2011; Семкин и др. 2012; Тищенко, 2013; Стунжас и др., 2016). Остальные характеристики, отражающие гипоксию как результат деструкции ОВ, не имели значительных отклонений по сравнению с придонным слоем в начале ЗС. Приведенные выше особенности динамики вод в ЗС, свидетельствуют о том, что наблюдаемая на перекате ст. 7 гипоксия могла быть результатом пришедших из выше расположенного плеса вод в результате прямого течения, формирующегося в отливную фазу.

Наблюдаемая разница в величинах  $pCO_2$  в придонных водах в начале ЗС и в области гипоксии может быть результатом метаногенеза (4.5) – разложения органического вещества в отсутствие внешних окислителей на границе вода/осадок (Friedrich et al., 2002).

Смешение морских вод с речными водами сопровождается понижением буферной емкости, и как результат более интенсивным ростом  $pCO_2$  при окислении органического вещества, что также может быть причиной значительного различия в этой величине для придонных вод в области гипоксии при солености более 30‰ и в плесах в начале ЗС в солоноватых водах. Отсутствие положительной аномалии нитратного и аммонийного азота в области гипоксии в районе ст. 7 обусловлено денитрификацией ( $NO_3^- + NO_2^- + NH_4^+$ ) в воде, когда азот превращается микроорганизмами в газовые, менее доступные в биологическом отношении формы ( $NO$ ,  $N_2O$  и  $N_2$ ) (Lam and Kuipers, 2011).

Ранее в работе А. М. Колтунова с соавторами (Колтунов и др. 2009) было показано, что для эстуариев с высокой динамикой вод существует различие в полях распределения концентрации хлорофилла *a*,  $pCO_2$  и  $O_2$ , обусловленное «памятью» о направленности продукционно-деструкционных процессов в

предшествующие периоды. Таким образом, в межень в верхней части эстуария, ограниченного песчаным перекатом, создаются условия сниженного водообмена. В результате окисления автохтонного органического вещества, образованного в начале ЗС в условиях отсутствия ФАР, в плесах формируется гипоксия, которая сопровождается повышением величины  $p\text{CO}_2$  и концентрации биогенных веществ. Обратные течения в придонном слое воды эстуария способствуют короткопериодному проникновению морских вод в плесы через перекат, прямые течения во всем слое вод эстуария, возникающие в отливную фазу, сопровождаются потоком гипоксических вод из плесов через перекат в мористую часть эстуария.

#### **4.4. Эстуарии рек Артемовки, Шкотовки и Амба**

Наибольший диапазон изменений концентрации кислорода характерен для эстуария р. Артёмовка. Высокие концентрации кислорода, как правило, соответствовали высокому содержанию хлорофилла *a*. В ходе съемки в период ледостава (01.03.2011) в придонных водах была обнаружена гипоксия, в эстуарии реки Амба в период ледостава (16.01.2012) также была зафиксирована гипоксия придонных вод.

В летний сезон (18.07.2011) в поверхностном горизонте в продольном профиле эстуария р. Артемовки концентрация  $\text{O}_2$  возрастала от 178 мкмоль/кг в речной части эстуария, до аномально высоких концентраций для данной температуры – 553 мкмоль/кг – во фронтальной области в поверхностном горизонте. В придонном горизонте наблюдалась пониженная концентрация кислорода (124 мкмоль/кг). Величина концентрации хлорофилла “а” изменялась с тем же знаком в направлении мористой части эстуария от концентрации 137 мкг/л в поверхностном горизонте в речной части, до аномально высоких значений 202 мкг/л в поверхностном горизонте во фронтальной области. Аномалии гидрохимических характеристик в летний сезон наблюдались с речной стороны термохалинных фронтов представленных

на рисунке 4.12, полученных на основании данных CTD-зондирования летом при расходе рек Артемовки и Шкотовки соответственно 6,33 и 5,24 м<sup>3</sup>/с.

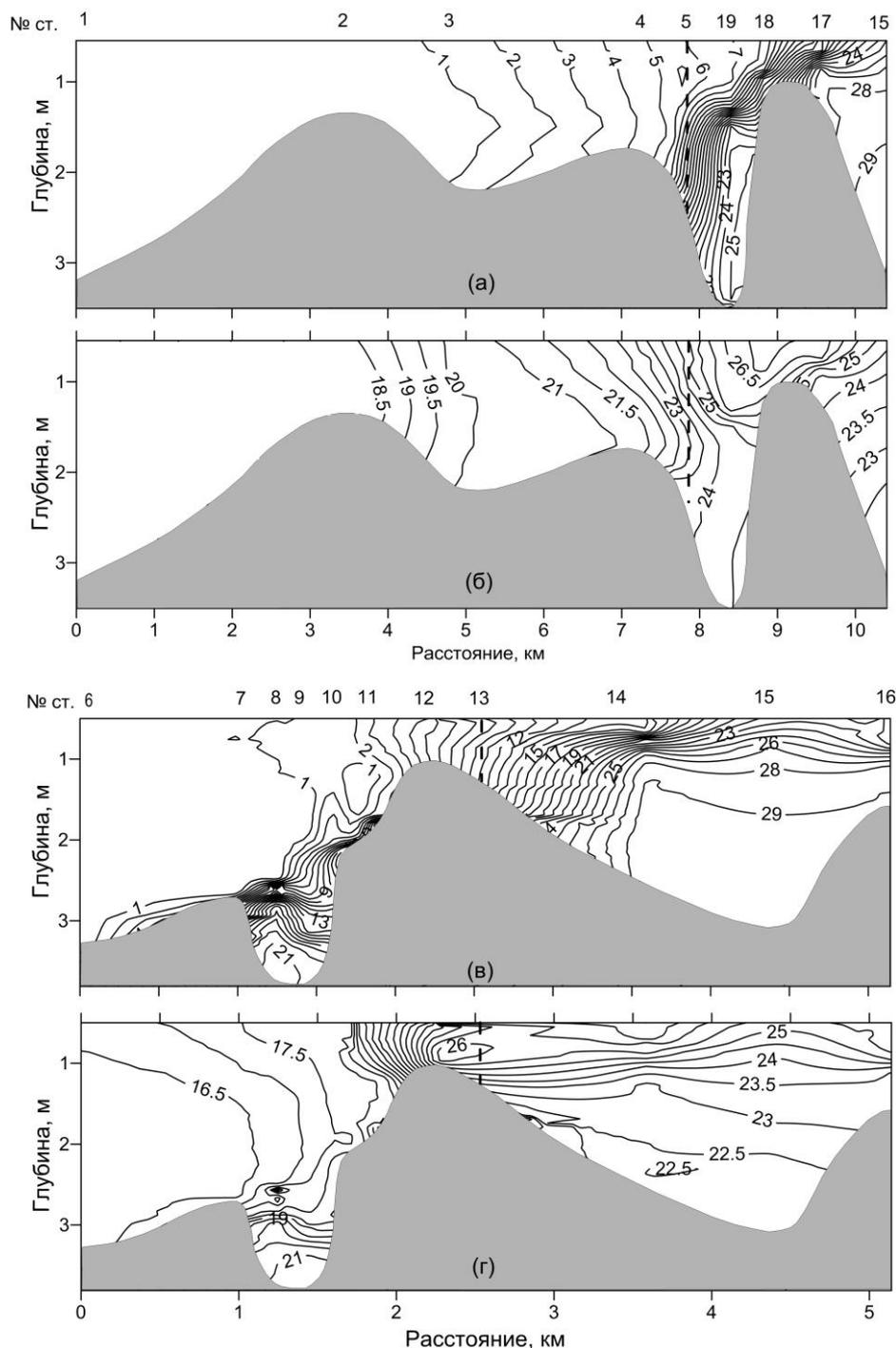


Рис. 4.12. Распределение гидрологических параметров вдоль продольного профиля наибольших глубин р. Артемовки и Шкотовки. Артемовка: а – соленость (‰); б – температура (°С); Шкотовка: в – соленость (‰) г – температура (°С).

Воды Кневичанки и Артемовки имеют весьма высокий уровень евтрофности: концентрации неорганических форм азота и фосфора в этих водах составляли 98, 112 и 1,41, 0,88 мкмоль/л соответственно. Известно, что

концентрация хлорофилла *a*, превышающая 8 мкг/л, также один из показателей высокой евтрофности вод (Звалинский и др., 2012). Однако сам по себе столь высокий уровень евтрофности не способствует экстремально высоким значениям продукционных характеристик в бассейне. Для этого необходимо определенное сочетание гидрохимических, гидрологических, метеорологических и биохимических факторов.

Общая характеристика РОУ для исследуемых рек в разные сезоны представлена в таблице 4.3. Полученные данные свидетельствуют о том, что концентрации РОУ в воде р. Кневичанки в 1,4 и 1,5 раза выше, чем в водах Артемовки (выше слияния с р. Кневичанкой) и Шкотовки из-за сбросов сточных вод г. Артема в р. Кневичанку. Общий ежегодный объем сброса сточных вод составляет: в Артемовку и Кневичанку – 442, в Шкотовку – 33 тыс. м<sup>3</sup> (Важова и др., 2011). Эти сточные воды содержат высокие концентрации ОВ, а также биогенных веществ. В летний сезон в воде р. Кневичанки концентрации неорганических форм азота и фосфора составляли соответственно 93 и 1,2 мкмоль/л. В водах рек Артемовка и Шкотовка аналогичные показатели составляли соответственно 17 и 0,3, 16 и 0,2 мкмоль/л. Следует также отметить, что водосбор Кневичанки наиболее заболочен в сравнении с водосборами Артемовки и Шкотовки.

Таблица 4.3. Содержание растворенного ОВ в нижнем течении рек Кневичанка, Артемовка и Шкотовка, мг С/л

Сезон	Кневичанка	Артемовка	Шкотовка
Весна	5,9	4,6	4,5
Лето	7,7	5,1	4,8
Осень	7,1	5,1	4,4

На рис. 4.13а представлена зависимость РОУ от солености воды, близкая к линейной. Речные воды – источник гуминовых веществ (ГВ), характер их смешения с морскими водами – неконсервативный, и нет линейной зависимости концентраций ГВ от солености воды (рис. 4.13б). Отклонение от линейности в сторону уменьшения концентрации ГВ наблюдается в области

соленостей воды 0–2,5‰. Аналогичный характер изменения содержания ГВ в зависимости от солености воды наблюдался ранее для вод эстуария р. Раздольной и для Амурского лимана.

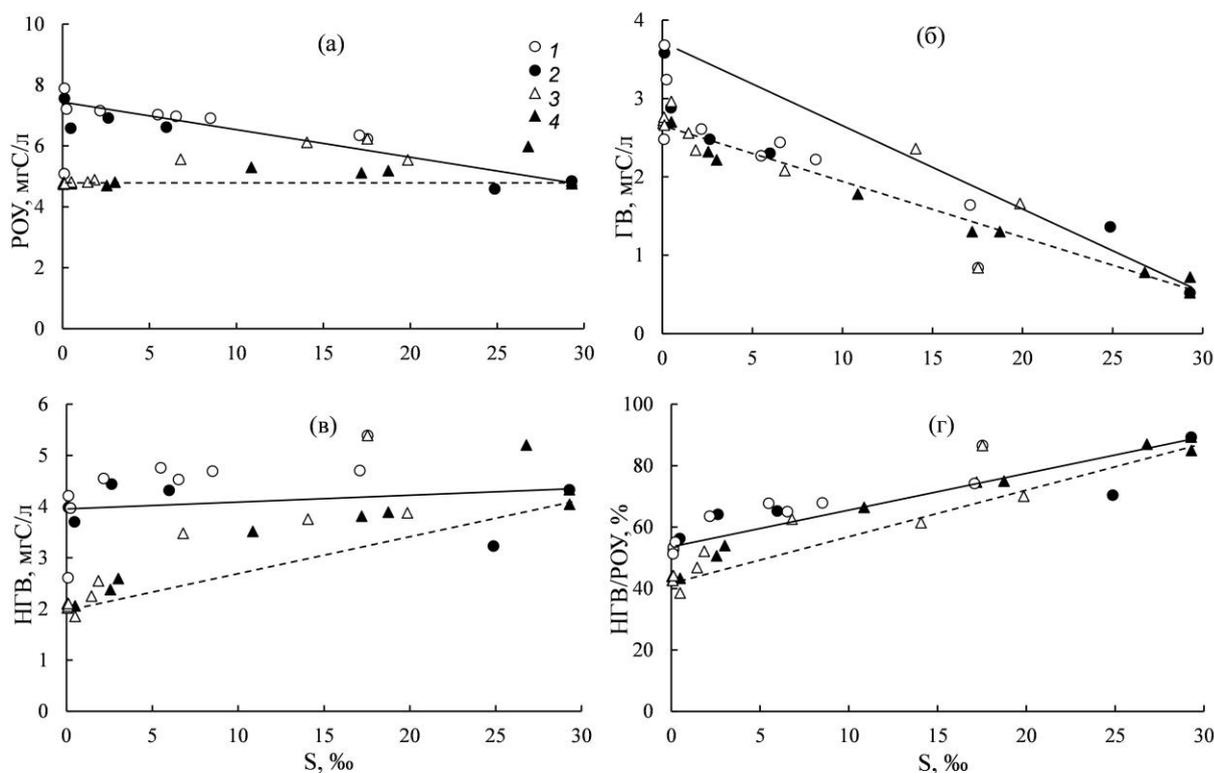


Рис. 4.13. Изменение компонентов органического вещества от солености в эстуариях рек Артемовки (1 – поверхностный горизонт, 2 – придонный горизонт) и Шкотовки (3 – поверхностный горизонт, 4 – придонный горизонт): а – РОУ; б – ГВ; в – НГВ; г – процентное содержание НГВ от РОУ. Сплошные (эстуарий р. Артемовки) и пунктирные (эстуарий р. Шкотовки) линии соединяют значения измеренных параметров речных и морских вод эстуариев.

Как правило, при солености воды 1–5‰ наблюдается интенсивное осаждение поставляемого рекой взвешенного вещества из-за резкого уменьшения течения. Область эстуария, с данной соленостью, рассматривается как уникальный участок, где из-за процессов коагуляции концентрация взвеси выше, чем в речных и морских водах (Лисицин, 1994). Осаждение взвешенного вещества сопровождается соосаждением гуминовых веществ, которые обладают хорошими сорбционными свойствами. Еще один механизм, способный уменьшать концентрацию ГВ, – высокая концентрация в морской воде двухвалентных ионов (магния и кальция), которые способны образовывать нерастворимые соединения с ГВ. Отметим, что неконсервативное поведение ГВ

в большей степени проявляется в эстуарии р. Артемовки, чем в эстуарии р. Шкотовки.

РОУ условно можно разделить на два класса – ГВ и не гуминовые вещества (НГВ). Для исследуемых эстуариев характерно увеличение как абсолютного содержания НГВ (рис. 4.13в), так и его доли в РОУ с увеличением солености воды (рис. 4.13г). Причем, рост концентрации НГВ носит неконсервативный характер: на графике экспериментальные точки находятся, главным образом, над линией, соединяющей значения речных и морских концентраций НГВ (рис. 4.13в). Следовательно, в процессе смешения речных и морских вод концентрация НГВ повышается, причем наиболее интенсивно – на начальном этапе смешения вод (соленость воды 0–3‰). Возможны два механизма поступления НГВ в среду. Во-первых, клетки некоторых видов пресноводного фитопланктона, попадая в солоноватые воды, подвергаются лизису, что приводит к увеличению концентрации НГВ. Во-вторых, в эстуариях рек создаются благоприятные условия для цветения фитопланктона. В процессе жизнедеятельности клетки микроводорослей могут выделять НГВ во внешнюю среду (Passow, 2002). Особенно это справедливо для евтрофированных участков эстуария Артемовки. Действительно, концентрация хлорофилла *a* в речной части эстуария р. Артемовки (соленость 0,4‰) составляла 140 мкг/л. При солености 5–10‰ концентрация хлорофилла *a* достигала исключительно высоких значений – до 200 мкг/л (на ст. 19, расположенной в непосредственной близости к фронту) (рис. 4.14а). В дальнейшем с увеличением солености воды содержание хлорофилла *a* уменьшается, однако остается достаточно высоким (> 25 мкг/л).

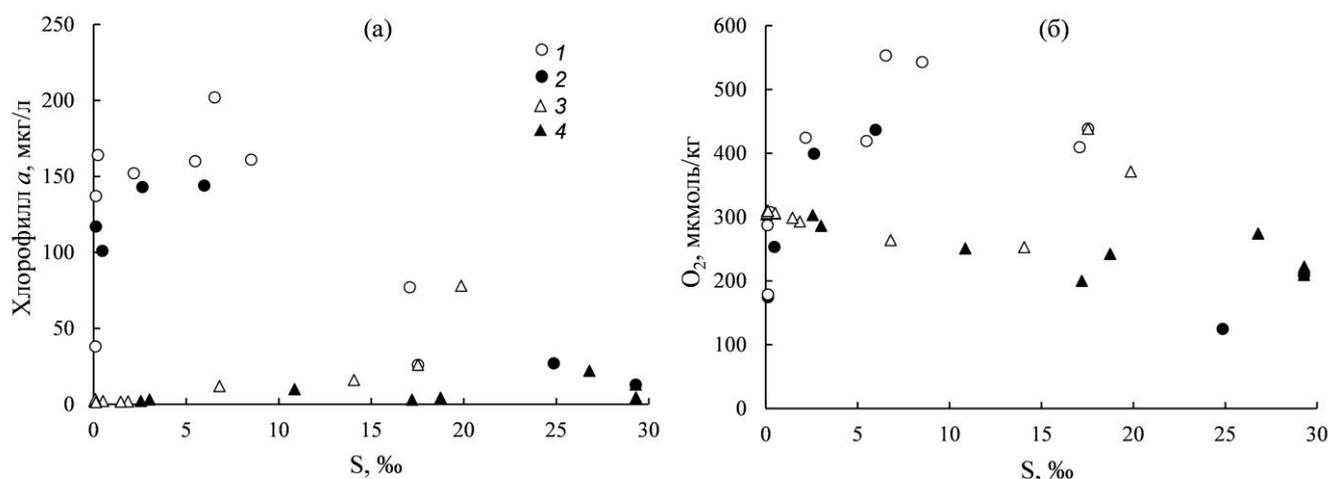


Рис. 4.14. Изменение концентраций в зависимости от солености: а – хлорофилла *a*; б –  $O_2$  в эстуариях рек Артемовки (1 – поверхностный, 2 – придонный горизонты) и Шкотовки (3 – поверхностный, 4 – придонный горизонты).

При фотосинтезе фитопланктоном ассимилируется  $CO_2$ , что непосредственно увеличивает значения рН и уменьшает парциальное давление  $CO_2$ . На поверхностном горизонте ст. 19 (эстуарий р. Артемовки) были зарегистрированы чрезвычайно высокие значения рН до 9,0 (рис.4. 15а) и чрезвычайно низкое  $pCO_2$  (до 25 мкатм; рис. 4.15б). В водах речной части эстуариев Артемовки и Шкотовки значения рН были низкие (7,4–7,5) и  $pCO_2$ , существенно превышающее равновесное с атмосферой (390 мкатм). В воде Шкотовки, Артемовки и Кневичанки  $pCO_2$  было 700–900, 1500–1800 и 3700 мкатм соответственно. Необходимо отметить, что сочетание высокой концентрации хлорофилла *a* и высоких значений  $pCO_2$  в воде Артемовки и Кневичанки указывает как на высокую интенсивность фотосинтеза, так и на деструкцию ОВ. В меньшей степени эти процессы сказываются на распределении растворенного неорганического углерода (DIC) и общей щелочности (ТА) (рис.4.15в, 4.15г), так как основной компонент DIC и ТА – гидрокарбонат-ион – макрокомпонент морской воды. Поэтому изменение DIC и ТА с изменением солености воды происходит в первую очередь в результате смешения речных и морских вод, имеющих разный компонентный состав.

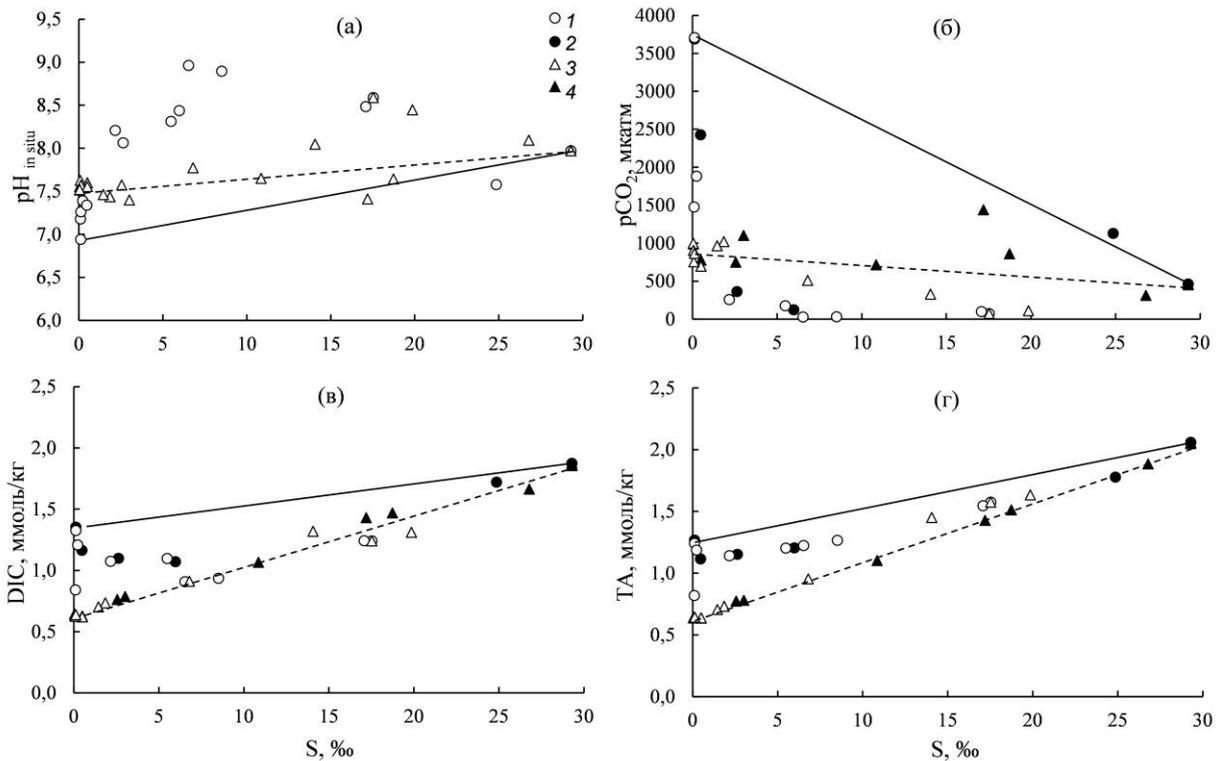


Рис. 4.15. Изменение величины параметров карбонатной системы в зависимости от солености в эстуариях рек Артемовки (1 – поверхностный, 2 – придонный горизонты) и Шкотовки (3 – поверхностный, 4 – придонный горизонты): а –  $pH_{in situ}$ ; б –  $DIC$ ; в –  $pCO_2$ ; г –  $TA$ . Сплошные (эстуарий р. Артемовки) и пунктирные (эстуарий р. Шкотовки) линии соединяют речные и морские значения измеренных характеристик.

На рис. 4.15г прослеживаются две особенности распределения щелочности. Во-первых, значения щелочности в водах Кневичанки, Артемовки и Шкотовки различны и составляют соответственно 1,25, 0,82 и 0,64 ммоль/кг. Во-вторых, в эстуарии р. Артемовки, в отличие от р. Шкотовки, наблюдается неконсервативное поведение щелочности. Этот факт связывается с неконсервативным поведением органической компоненты щелочности и с возникновением сильных органических кислот, которые оттитровывают неорганическую щелочность. Компонентами органической щелочности могут быть гуматы, фульваты, которые также обладают неконсервативным поведением в эстуариях и извлекаются из водной среды в процессе смешения речных и морских вод (Тищенко и др 2006).

Во время экспедиционных работ в р. Артемовке наблюдалось следующее сочетание факторов. Воды бух. Муравьиной оказались более прогретыми в

сравнении с речными водами. Существующие приливно-отливные течения способствуют проникновению теплых морских вод в речную часть эстуария, в результате чего в районе ст. 19 (эстуарий р. Артемовки) на глубине ~ 1 м сформировался мощный пикноклин. Этот пикноклин сформирован по “диффузному типу”, т.е. нижележащий слой – более теплый и более соленый, чем вышележащий. Раздел между слоями может рассматриваться как “жидкое дно”. Над этим “жидким дном” находятся распресненные воды, обогащенные биогенными элементами.

“Цветению” фитопланктона способствует также то, что в области ст. 19 пресноводные виды фитопланктона попадают в морские воды, что вызывает лизис клеток (Dagg et al., 2008). Этим объясняется увеличение концентрации негуминового РОУ с ростом солености в речной области эстуария. Другой причиной увеличения НГВ может быть естественный метаболизм фитопланктона (Passow, 2002). Следствие лизиса клеток пресноводного фитопланктона – выделение в среду ферментов, белков и другого ОБ, которое стимулирует фотосинтез эвригалинного фитопланктона (Хайлов, 1971). Важно, что экспедиционные работы проводились непосредственно после обильных дождей. Дожди приводят к резкому увеличению потока биогенных веществ в эстуарий, что также способствует развитию фотосинтеза (Михайлик, 2011). Во фронтальной области в период отбора проб наблюдалась пена. Пена часто образуется во время “цветения” фитопланктона, и ее формирование связывают с высоким содержанием органических соединений, которые выделяют клетки фитопланктона (Seuron et al., 2006). Выделение фитопланктоном в среду органических соединений, способных формировать пену – обстоятельство, приводящее в конечном итоге к образованию экстремальных значений рН, рСО<sub>2</sub> и концентрации О<sub>2</sub>. Как уже отмечалось, фотосинтез обычно приводит к уменьшению рСО<sub>2</sub>, увеличению рН и концентрации О<sub>2</sub>. Тем не менее, возникает вопрос, каким образом могла бы создаться ситуация, чтобы поверхностные воды были пересыщены по отношению к атмосферному О<sub>2</sub> более чем в два раза и недосыщены по отношению к атмосферному СО<sub>2</sub> более

чем в 10 раз? Газообмен между морем и атмосферой должен препятствовать такой ситуации в поверхностном слое воды, но этого не происходит. В данном случае газообмен между атмосферой и морем был резко уменьшен по двум причинам. Во-первых, пена в несколько раз уменьшала скорость газообмена на разделе вода–воздух (Seuron et al., 2006). Во-вторых, растворенные ОВ способны в несколько раз увеличивать вязкость поверхностного слоя воды, что препятствует газообмену на разделе вода–воздух (Calleja et al., 2009). Таким образом, в летний сезон определенное сочетание гидрохимических, метеорологических, гидрологических и биохимических факторов привело к экстремальным значениям гидрохимических и продукционных характеристик в эстуарии р. Артемовки.

Наиболее экстремальные величины растворенного  $O_2$ , параметров карбонатной системы, и биогенных веществ были зафиксированы в области гипоксии в эстуарии реки Артемовки в период ледостава (рис. 4.16.)

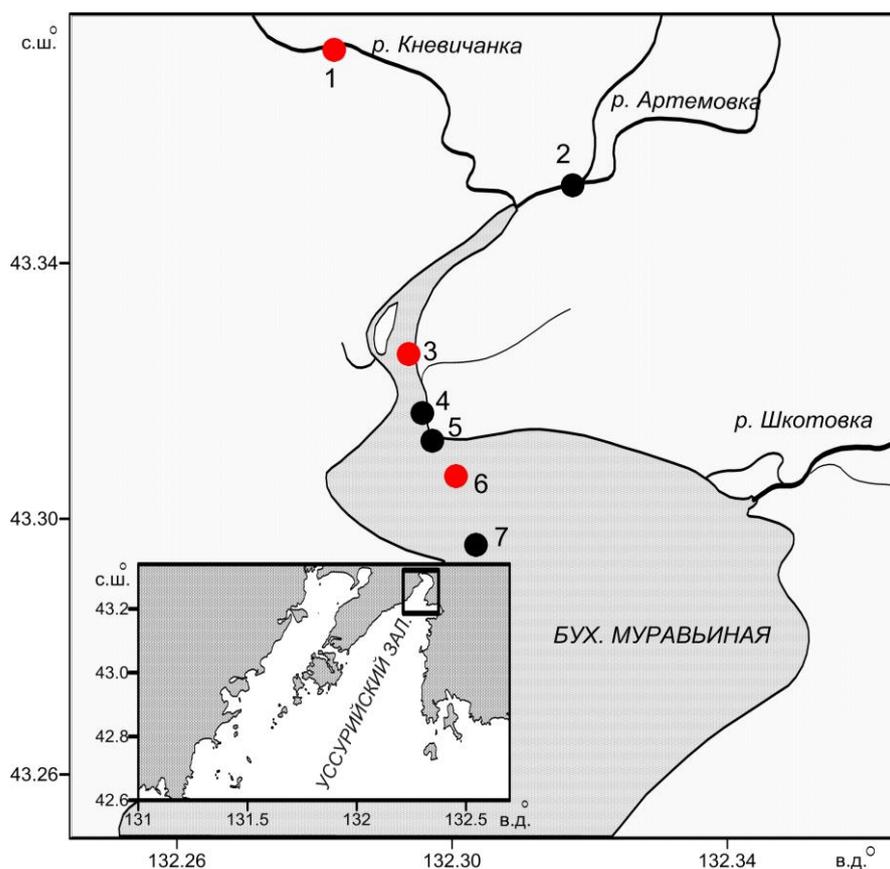


Рис. 4.16. Схема расположения станций выполненных 01.03.2011 при расходе реки  $0,66 \text{ м}^3/\text{с}$ . ● - станции с аномальными величинами гидрохимических характеристик, гипоксия зафиксирована на ст. 1, 3.

Деструкция легко окисляемого ОВ аллохтонного происхождения (концентрация органического углерода 20 мгС/л) на начальном этапе ЗС (ст. 1), в основном коммунально бытовых стоков, привела к феноменальной величине  $pCO_2$  достигающей 14482 мкاتم, и аномально высоким концентрациям биогенных веществ (таблица 4.4). При таком снабжении биогенными веществами следует ожидать высокой величины ПП. Однако в результате ограничение ФАР подо льдом величина ПП в эстуарии снижается, а подо льдом покрытым снегом практически отсутствует (Звалинский и др., 2016). В то же время на всех станциях отмечаются достаточно высокие концентрации хл. *a* (Таблица 4.4.), что свидетельствует о продукции ПП, которая по-видимому препятствовала полному исчерпанию  $O_2$ . Дополнительным фактором формирования аномальных величин гидрохимических характеристик в эстуарии р. Артемовки является ослабленный водообмен, вызванный с одной стороны малым расходом реки Артемовки и Кневичанки, с другой стороны ослабленным потоком морских вод в эстуарий, через мелководье в районе бара, покрытое льдом. Слой воды в районе устьевого бара р. Артемовки подо льдом не превышает 10 см.

Таблица 4.4. Сравнение гидрофизических и гидрохимических параметров в пробах воды в продольном профиле наибольших глубин эстуария р. Артемовки 01.03.2011

№ ст.	t, °C	S	$O_2$ мкмоль/кг	pHt	$pCO_2$	$PO_4$	$NH_4$	$NO_3$	$NO_2$	Chl mkg/l	OC,mgC/
1	1,15	0,37	58,95	6,98	14482	53,10	2,92	74,99	109,29	6,0	20,0
2	2,32	0,21	247,28	6,95	3819	2,21	9,55	21,05	0,62	1,2	4,5
3	0,33	0,61	61,42	7,12	6753	27,98	15,20	18,67	27,73	4,3	10,8
4	-0,34	8,31	145,59	7,26	2693	16,81	18,23	46,13	8,11	7,5	7,7
5	0,09	1,25	114,08	7,12	4791	20,47	17,88	43,12	14,49	8,0	8,4
6	-0,08	11,52	93,34	6,49	13543	18,39	19,64	48,89	12,67	7,2	8,1
7	-0,54	30,50	444,43	8,31	192	2,04	8,91	9,66	1,00	3,9	4,2

В ходе выполнения съемки 17 января 2012 г. в продольном профиле эстуария реки Амба было обнаружено падение концентрации  $O_2$  до 88

мкмоль/кг. Максимальные концентрации  $O_2$  были характерны для мористой части разреза и достигали 416 мкмоль/кг. Величина  $pCO_2$  в области дефицита  $O_2$  была 3300 мкاتم. Падение концентрации  $O_2$  в эстуарии р. Амба также как и в случае эстуария реки Артемовки объясняется потреблением  $O_2$  при деструкции ОВ в условиях ограничения ФАР льдом со снежным покровом.

В период ледостава в районе устьевого бара р. Амба покрывается льдом до дна, что полностью ограничивает водообмен с морем (летом глубина в районе бара менее 0,4 метра). В этих условиях возрастает доля обмена реки с морем грунтовыми водами (submarine groundwater discharge (SGD)) через водоносные слои. Этот поток играет значимую роль в процессах обмена водами между сушей и морем (Хубларян и др., 2008; Burnett et al., 1990; Taniguchi et al., 2002; Moore, 2010; Santos et al., 2014, Wang et al., 2014). Данное явление может быть результатом передачи энергии приливной волны в верхнюю часть эстуария через водоносный слой (Robinson, Barry, 2007) что было отмечено на основании данных инструментальных измерений уровня в эстуарии реки Раздольной (см. выше).

## **ГЛАВА 5. ЭВТРОФИКАЦИЯ ЭСТУАРИЕВ И ОБЩИЕ ЧЕРТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГИПОКСИИ ЭСТУАРИЕВ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

Интенсификация сельского хозяйства и промышленности, а также урбанизация резко увеличили скорость эвтрофикации пресноводных водоемов, что привело к резко негативным последствиям: бурному «цветению» фитопланктона, падению прозрачности воды, понижению содержания кислорода в придонных водах, резкому падению биоразнообразия фауны (Айбулатов, 2005; Звалинский и др., 2013).

Один из ключевых вопросов возникновения гипоксии в эстуариях ЗПВ заключается в том, за счет чего создается ”избыточная” биомасса фитопланктона. В отличие от наблюдаемой гипоксии в приемных бассейнах ЗПВ (Тищенко и др., 2011; Семкин и др., 2012; Тищенко, 2013; Стунжас и др., 2016), которая формируется в послепаводковый период в результате залпового выноса биогенных веществ от диффузных источников (Михайлик и др., 2011), гипоксия в исследованных внутренних эстуариях формируется в межень, когда доминирующими являются локальные источники биогенных веществ. К локальным источникам относятся коммунально-бытовые и промышленные стоки, а также стоки от животноводческих ферм. 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 5.1).

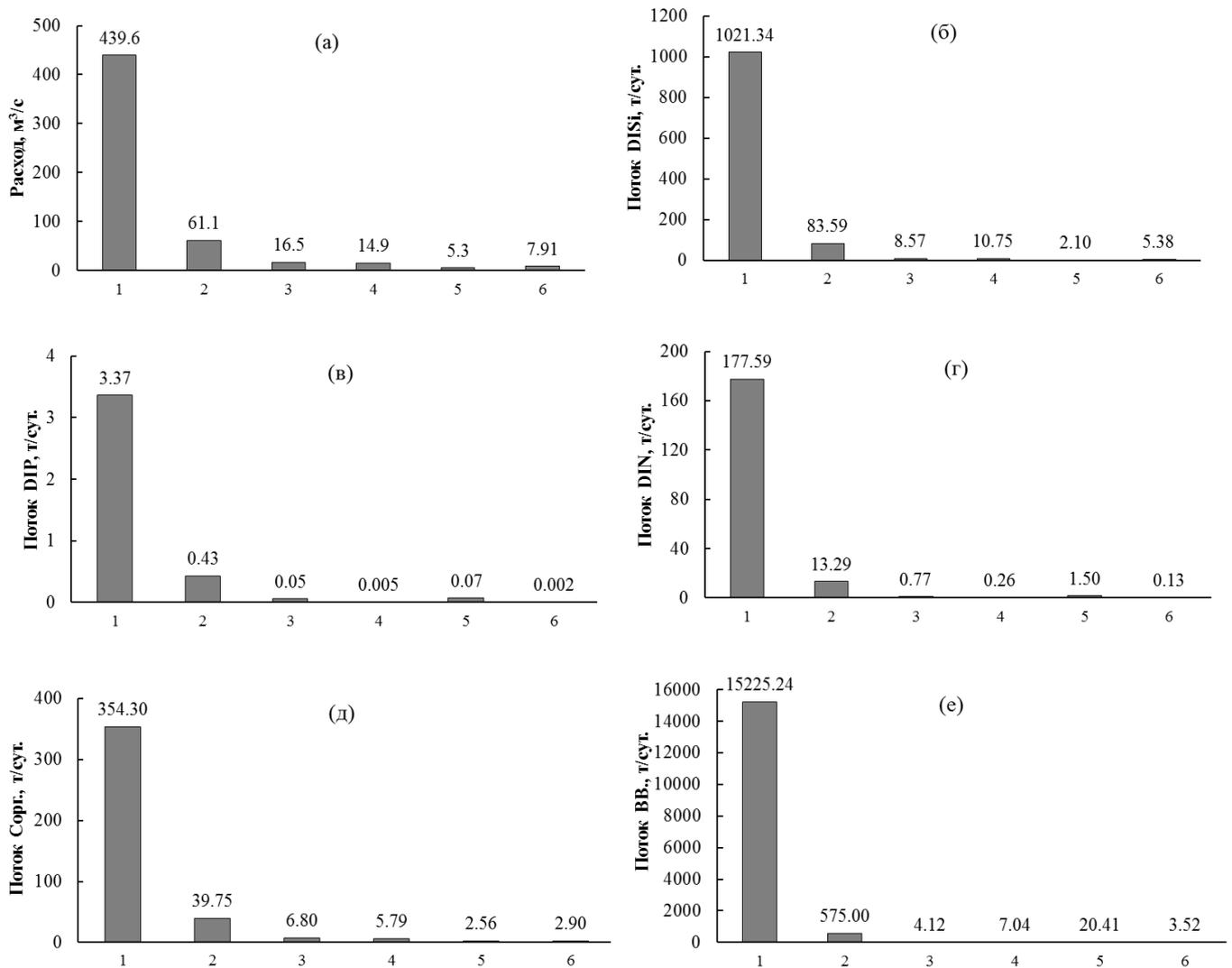


Рис. 5.1. Среднегодовой расход (а), поток биогенных веществ (б,в,г), органического углерода (д) и взвеси (е) в эстуарии ЗПВ со стоком рек в 2013 г., по оси абсцисс: 1 – Туманной; 2 – Раздольной в 2008 г. (Михайлик и др. 2011); 3 – Артемовки; 4 – Шкотовки; 5 – Кневичанки; 6 – Амба.

Концентрации биогенных веществ в реках Туманная, Раздольная, Артемовка приблизительно равны и превосходят концентрации в 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 DIP для рек Арт. + Шкот. + Кнев. превосходит эту величину в реке Партизанкой приблизительно 9 раз, что также связано с необычайно высокими концентрациями фосфатов в реке Кневичанки. Потоки азота с водами р. Партизанской превосходят потоки для рек Арт. + Шкот. + Кнев. в два раза, а

силикатов сопоставимы. В данной оценке не учитывается поток биогенных веществ в Уссурийский залив р. Суходол и Петровка, который незначителен, и в паводок ориентировочно будет составлять половину потока реки Шкотовки. В целом величина годовых потоков биогенных веществ в эстуарии ЗПВ убывает по экспоненте при обходе с запада на восток (рис. 5.2), что обусловлено, во-первых, величиной речного стока, а во вторых антропогенной нагрузкой на водосборы.

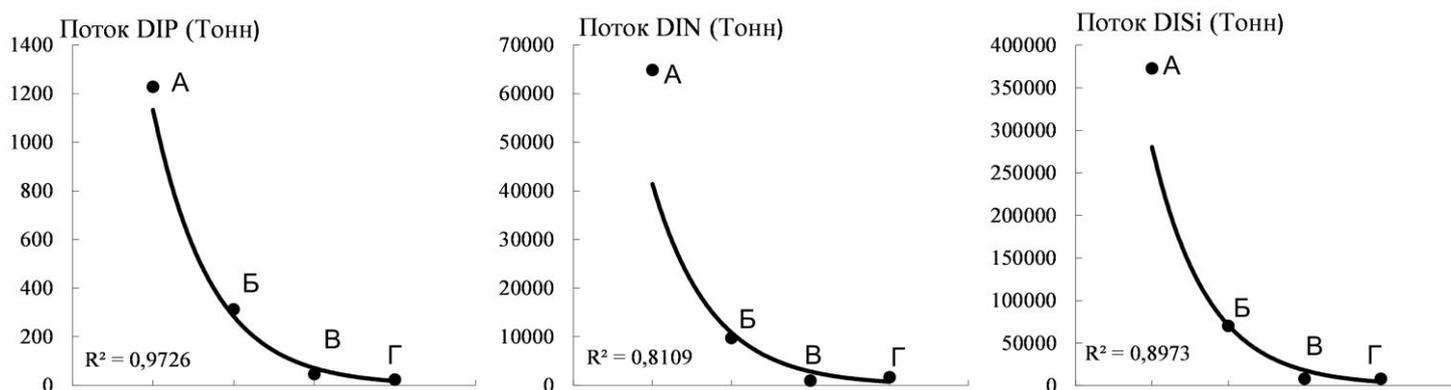


Рис. 5.2. Суммарные годовые потоки биогенных веществ с речным стоком в эстуарии в 2013 г.: А – Туманной; Б – Раздольной в 2008 г.; В – Артемовкой + Кневичанкой + Шкотовкой; Г – Партизанской.

Очевидно, что трансграничная река Туманная, водосбор которой в основном находится в КНР, на территории стремительного развития промышленности (Sun, Wang, 2013) и сельского хозяйства (Adekola, Akinyemi, 2014) провинции Цзилинь, имеет высокий уровень трофности, судя по концентрации биогенных веществ и хлорофиллу, о чем говорилось выше. Негативные последствия роста трофности реки в настоящее время непосредственно сказались 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 и случаи замора бентоса (рис 5.3).



Рис. 5.3. Изображение массовой гибели бентосных организмов вблизи о. Фуругельма, полученное с помощью подводного аппарата «SubFighter-3000» 12 августа сотрудниками ИБМ ДВО РАН.

Воды реки Раздольной в период межени имеют необычайно высокие концентрации суммарного азота и фосфатов непосредственно 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 реки Раздольной с участием ПРИМГИДРОМЕТ со стороны РФ и Управлением по охране окружающей среды со стороны КНР, по мере роста промышленности и сельского хозяйства провинции Хэйлунцзян (район водосбора реки Раздольной), трофический уровень этой реки будет расти, а последствия для экосистемы эстуария ухудшаться.

Главной для всех эстуариев причиной формирования придонной гипоксии является поглощение кислорода в результате деструкции органического вещества автохтонного происхождения. На это указывает "цветение" фитопланктона в поверхностных водах, которое обусловлено двухслойной гидрологической структурой вод и потоком биогенных веществ с речными водами, поскольку в летнюю межень морские воды заполняют придонный слой эстуариев, образуя с

речными водами пикноклин. Созданная в верхнем слое биомасса фитопланктона, в основном, диатомеи (Орлова, 1990; Орлова и др. 2000; Долганова, 2000) осаждается на дно, где происходит ее микробиологическая деструкция и формируется гипоксия. Гипоксия в период летней межени в эстуариях характерна только для определенных районов – плесов в зоне смешения (рис. 5.4). Это объясняется затрудненным обменом придонных вод в углублениях рельефа, вследствие чего происходит накопление автохтонного ОВ. В период ледостава зафиксирована гипоксия в эстуариях рек Артемовки, Амба, в эстуарии реки Артемовки ходе летней съемки зафиксирован дефицит кислорода близкий к гипоксическим условиям (рис. 5.4).

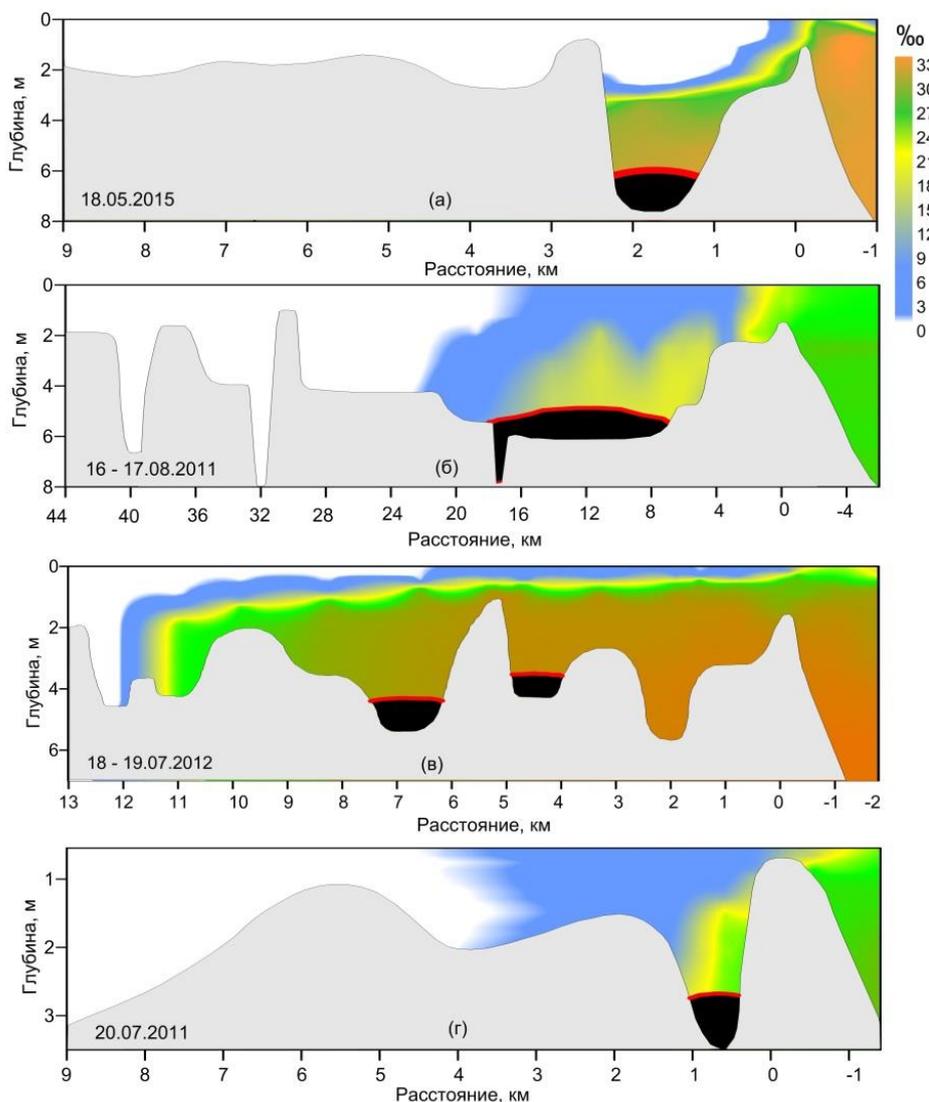


Рис. 5.4. Схематичное изображение районов с гипоксией (черный цвет) в зонах смешения эстуариев рек Туманной (а), Раздольной (б), Партизанской (в), Артемовки (г). Распределение солёности (‰) по результатам зондирования.

Цветение фитопланктона в поверхностном слое вод и понижение концентрации  $O_2$  у дна сопровождается аномальными величинами параметров карбонатной системы (рис. 5.5).

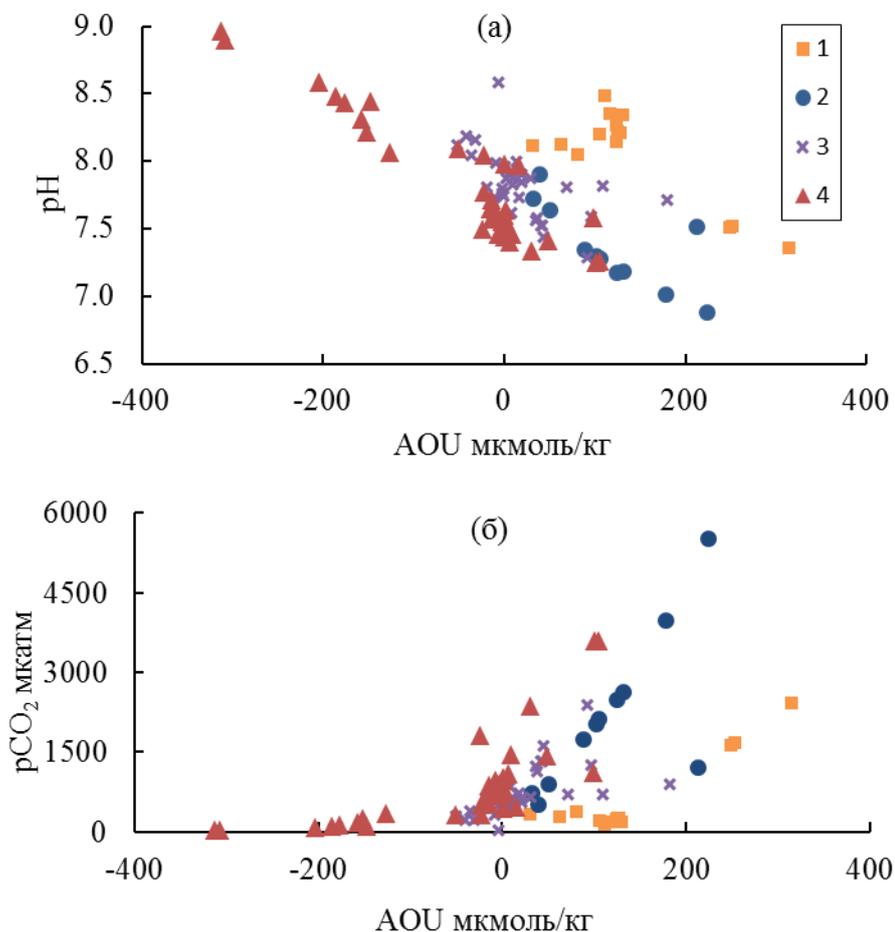


Рис. 5.5. Зависимость pH – AOU (а) и  $pCO_2$  – AOU (б) в эстуариях рек: Туманной – 1; Раздольной – 2; Партизанской – 3 и Артемовки – 4.

Обнаруженные величины карбонатных параметров,  $O_2$  и концентрации хлорофилла *a* в эстуариях не являются характерными для морских вод. В опубликованной на данный момент литературе, подобные значения гидрохимических характеристик для акватории зал. Петра Великого не обнаружены. Ранее, в мористой части эстуария р. Раздольной, при солености около 15‰, отмечалась высокая величина pH (8,6) и низкая  $pCO_2$  (57 мкатм) (Тищенко и др., 2005). В осенний сезон в р. Раздольной наблюдались высокие значения pH (8,9). Известно также, что в дельте реки Волги фиксировались значения pH на уровне 9 (Маккавеев, 2009).

Из непосредственных измерений глубины видимости диска Секи следует, что глубина проникновения ФАР для районов с формированием гипоксии в эстуариях находится в диапазоне 0,7–3 м. Это означает, что при микробиологической деструкции органического вещества, выделившиеся в водную среду биогенные вещества не приводят к фотосинтезу для слоя вод, расположенного ниже глубины проникновения ФАР. Эти факты дополнительно свидетельствуют о том, что придонная гипоксия формируется вследствие микробиологического разложения органического вещества в условиях низкой ФАР.

Таким образом, высокая интенсивность продукционно-деструкционных процессов в эстуариях, вызванная, с одной стороны, специфическими гидрологическими условиями районов, а с другой – эвтрофикацией – причина формирования гипоксии и аномальных величин параметров карбонатной системы, концентрации хлорофилла *a* и биогенных веществ.

Последствия нарушения кислородного режима в эстуарии реки Раздольной в июне 2014 г наглядно продемонстрировано на рисунке 5.6, когда в период проведения внутрисуточных исследований можно было наблюдать множество мертвой рыбы на протяжении около 20 км эстуария вдоль зоны смешения. В эстуарии реки Туманная в период летних исследований также встречалась мертвая рыба в районе зоны смешения, в основном кефаль, однако из-за строго контроля деятельности научной группы со стороны погран. службы фотографирование этого происшествия было запрещено.



Рис. 5.6. Замор красноперки во внутренней эстуарии реки Раздольной в переходный режим от половодья к межени 9 июня 2014 г при расходе реки  $84,7 \text{ м}^3/\text{с}$ . Мертвая рыба наблюдалась в районе зоны смешения на протяжении около 20 км вдоль эстуария. Фото сделано автором работы.

### **Сценарий формирования/разрушения гипоксии эстуариев**

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, диатомеи) осаждается на дно, где происходит ее микробиологическая деструкция и формируется гипоксия. Гипоксия наблюдается в углублениях рельефа, 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  $p\text{CO}_2$  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 устьевого бара в эстуариях ЗПВ встречается ежегодно и возможна в любой месяц с мая по октябрь. Продолжается это явление для малых рек Амба, Артемовки, Шкотовки в течение нескольких суток, пока не пройдет пик половодья или паводка, а в реках Партизанская, Раздольная, Туманная период этого явления может составлять более 2 недель. При этом область биологического барьера маргинального фильтра формируется в приемных бассейнах, таких как юго- западная часть ЗПВ, Амурский, Уссурийский заливы, залив Находка.

Таким образом, аномалии гидрохимических параметров и гипоксия представляют собой явление, приуроченное к особой гидрологической фазе реки. Гипоксия в эстуариях в период ледостава является частным случаем, и обусловлена в основном микробиальной деструкцией ОВ в условиях лимитации ФАР из-за ледяного покрова, покрытого снегом препятствующем 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 устьевых баров рек.

## ВЫВОДЫ

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 внешней 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А.* Основы гидрохимии / Гидрометиздат. Ленинград. 1970. 444
2. *Алисов Б.П.* Климат СССР. М.: Изд-во МГУ. 1956. 128 с.
3. *Айбулатов Н.А.* Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии. М. : Наука. 2005. 364 с.
4. Атлас Приморского края. Владивосток: Дальпресс. 1998. 48 с.
5. *Баталин А.М.* Течения // Гидрометеорологический справочник морей СССР. Л. : Гидрометеоздат, 1958. Т. 5, вып. 2. С. 307–389.
6. Биота и сообщества макробентоса лагун северо-восточного Сахалина / А. И. Кафанов, В. С. Лабай, Н. В. Печенева. Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2003. 176 с.
7. *Бирюлин Г.М., Бирюлина М.Г., Микулич Л.В., Якунин Л.П.* Летние модификации вод залива Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. 1970. Вып. 30. С. 286–298.
8. *Бруевич С.В.* Определение щелочности в малых объемах морской воды прямым титрованием // Инструкция по производству химических исследований морской воды. М.-Л.: Главсевморпуть. 1944. 83 с.
9. *Важова А.С., Нигматулина Л.В., Лукьянова О.Н.* Поступление загрязняющих веществ со сточными водами через эстуарии в залив Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2011. Т. 167. С. 128–134.
10. *Важова А.С.* Сезонные изменения концентрации биогенных веществ и концентрации растворенного кислорода в реках южного Приморья // изв. ТИНРО. 2017. Т. 191. С. 210–222.
11. *Вейдеман Е.Л., Черкашин С.А., Щеглов В.В.* Диагностика состояния прибрежных акваторий: некоторые проблемы и результаты // Изв. ТИНРО. 2001. Т. 128. С. 1036–1049.
12. *Вышкварцев Д.И.* Трансграничный поток загрязнений с водами реки Туманной // Вестник ДВО РАН. 1997. № 2. С. 88–92.
13. *Воронков П.П.* Гидрохимический режим залива Петр Великий Японского моря // Вопросы химии моря. Гидрометеоздат. 1941. С. 42–102.
14. *Гайко Л.А.* Особенности гидрометеорологического режима прибрежной зоны залива Петра Великого (Японское море) // Владивосток: Дальнаука. ТОИ ДВО РАН. 2005. 150 с.
15. Гидрология морских устьев рек Дальнего Востока (под ред. Л.П. Якунина). Труды ДВНИГМИ. Вып. 38. Ленинград: Гидрометеоздат. 1989. 182 с.
16. *Гомоюнов К.А.* Гидрологический очерк Амурского залива и реки Суйфуна // Тр. I конф. Производительные силы Дальнего Востока. Владивосток, 1927. Вып. 2. С. 73–91.
17. *Горин С.Л.* Гидролого-морфологические процессы в эстуариях камчатки – автореф. дис. канд. геогр. наук. Москва. 2009. 26 с.
18. *Горин С.Л.* Эстуарии полуострова Камчатка: теоретические подходы к изучению и гидролого-морфологическая типизация. Итоги 10 лет исследований

// Исследования водных биологических ресурсов камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2012. № 27. С. 5–12.

19. Григорьев Р.В., Зуенко Ю.И. Среднемноголетнее распределение температуры и солености в Амурском заливе Японского моря // Известия ТИНРО. 2005. Т. 143. С. 179–188.

20. Григорьева Н.И., Кучерявенко А.В. Краткая гидрологическая характеристика зал. Посъета. Владивосток: Дальнаука, 1995. 35 с. Деп. в ВИНТИ 21.08.1995 г. №2466-В95.

21. Григорьева Н.И. Изменчивость температуры воды в бухте Миносок залива Посъета (залив Петра Великого) // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 83 – 89.

22. Данченков М.А., Фельдман К.Л., Файман П.А. Температура и соленость вод залива Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. – Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 10–25.

23. Долганова Н.Т. Состав, сезонная и межгодовая динамика планктона северо-западной части Японского моря: Автореф. дис. . канд. биол. наук. Владивосток: ТИНРО-центр, 2000. – 23 с.

24. Долгополова Е. Н., Исупова М. В. Классификация эстуариев по гидродинамическим процессам // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 3. С. 274–291.

25. Долгополова Е.Н., Исупова М.В. Динамика вод и наносов в устьевой области р. Св. Лаврентия // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 422–438.

26. 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.

27. Звалинский В. И. Недашковский А.П., Сагалаев С.Г. и др. Биогенные элементы и первичная продукция эстуария реки Раздольной // Биология моря. 2005. Т. 31. № 2. С 107–116.

28. Звалинский В.И., Тищенко П.П., Тищенко П.Я. и др. Гидрохимические и продукционные параметры на Акватории Амурского залива в период паводка реки Раздольной в августе 2005 года // Современное состояние и тенденции измерения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС. 2008. С. 199–229.

29. Звалинский В.И., Марьяш А.А., Стоник И.В. и др. Продукционные и гидрохимические характеристики льда, подлёдной воды и донных осадков эстуария реки Раздольной (Амурский залив Японское море) в период ледостава // Биология моря. 2010. Т. 36. № 3. С. 186–195.

30. Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я. Эвтрофикация Амурского залива // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря: монография / отв. ред. Н.К. Христофорова. – Владивосток: Издательский дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. С. 77–114.

31. Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я. Эвтрофикация залива Петра Великого // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана: в 2 кн. / гл. ред. В.А. Акуличев; ТОИ ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука, 2013. Кн. 1 – 2013. – 436 с. С. 260–293.

32. Звалинский В.И., Марьяш А.А., Тищенко П.Я и др. Продукционные характеристики эстуария реки Раздольной в период ледостава // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185: С.155–174.
33. Карасев М.С. Лобанова Н.И. Строение и водоносность речной сети Дальнего Востока // тр. ДВНИГМИ. 1982. Вып. 88. 134 с
34. Климат Владивостока. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 248 с.
35. Кравцов В.Д. Некоторые особенности динамики приливных устьев рек северо-западного побережья Охотского моря // Тр. ГОИН. 1980. Вып. 159. С. 71-84.
36. Крылов С.С., Бобров Н.Ю., Пряхина Г.В. и др. Особенности распространения и трансформации речных вод в приливном эстуарии р. Кереть // Метеорология и гидрология. 2014. № 10 С. 54–64.
37. Колпаков Н.В. Продукция макрофитов в эстуариях рек приморья // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 174. С 135–148.
38. Колпаков Н.В., Милованкин П.Г. Распределение и сезонные изменения обилия рыб в эстуарии реки Раздольная (залив Петра Великого, Японского моря) // Вопросы ихтиологии. 2010. Т 50, № 4. С. 495–509.
39. Колпаков Н.В., Долганова Н.Т., Надточий В.А. и др. Экосистемные исследования биоресурсов прибрежных и эстуарных вод южного Приморья // ТИНРО-85. Итоги десятилетней деятельности. 2000–2010 гг. Владивосток : ТИНРО-Центр, 2010. С. 103–128.
40. Колтунов А.М., Тищенко П.Я., Звалинский В.И. и др. Карбонатная система Амурского лимана и прилегающих морских акваторий // Океанол. 2009. Т. 49. № 5. С. 649–706.
41. Лапин И.А., Аникиев В.В., Винников Ю. А. и др. Биогеохимические аспекты поведения растворенного органического вещества в эстуарии реки Раздольной – Амурский залив Японского моря // Океанол. 1990. Т. 30. № 2. С 234–240.
42. Ластовецкий Е.И., Вещева В.М. Гидрометеорологический очерк Амурского и Уссурийского заливов. – Владивосток: Приморское управление гидрометеорологической службы, 1964. – 264 с.
43. Ластовецкий Е.И. Якунин Л.П. Гидрометеорологическая характеристика Дальневосточного государственного морского заповедника // Цветковые растения островов Дальневосточного морского заповедника. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С 18–33.
44. Леонов А. К. Региональная океанография. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1960. 4.1. –765 с.
45. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанол. 1994. Т. 34. С. 735–747.
46. Лоция северо-западного берега Японского моря. ГУНИО МО, Санкт-Петербург, 1996, 360 с.
47. Лучин В.А., Тихомирова Е.А., Круц А.А. Океанографический режим вод залива Петра Великого (Японское море). // Изв. ТИНРО. 2005. Т. 140. С. 130–169.
48. Лупачев Ю.В. Динамическое взаимодействие морских и речных вод в приливных устьях рек // Тр. ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 64–82.

49. *Маккавеев П.Н.* Особенности связи величины рН и растворенного кислорода на полигоне Чистая Банка в Северном Каспии // *Океанол.* 2009. Т. 49, № 4. С. 508–515.

50. *Марьяш А.А., Ходоренко Н.Д., Звалинский В.И., Тищенко П.Я.* Хлорофилл, гуминовые вещества и органический углерод в эстуарии реки Раздольной в период ледостава // *Вест. ДВО РАН.* 2010. № 6. С 44–51.

51. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. М.: ВНИРО. 1988. 120 с.

52. *Милованкин П.Г., Вазжова А.С., Зуенко Ю.И.* Результаты первых гидрохимических исследований в эстуариях рек южного приморья Гладкая, Тесная и Артемовка // *Тр. Первой регион. научн. конф. "Океанография залива Петра Великого"*. – Владивосток : ДВНИГМИ, 2012. С. 93–96.

53. *Михайлов В.Н., Даценко Ю.С.* Расчет сдвига фаз уровня и скорости течения в приливном устье реки // *Труды ГОИН.* 1973. Вып. 116. С. 113–124.

54. *Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС. 1997. 176 с.

55. *Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС. 1997. 176 с.

56. *Михайлов В.Н., Горин С.Л.* Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей–эстуариев // *Вод. ресурсы.* 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.

57. *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.

58. *Мишуков В.Ф., Калинин В.В., Плотников В.В., Войццкий А.В.* Влияние дампинга загрязненных грунтов на экологическое состояние прибрежных вод г. Владивосток // *Изв. ТИНРО.* 2009. Т. 159. С. 243–256.

59. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1. Вып. 21. 387 с.

60. *Надточий В.А., Гальшиева Ю.А., Колпаков Н.В., Нестерова О.В.* Распределение макробентоса в эстуариях рек залива Петра Великого в связи с характеристиками донных осадков // *Изв. ТИНРО.* 2010. Т. 163. С 297–310.

61. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9 ч.1. Л.: Гидрометеиздат, 1968. С. 271–274

62. *Нигматулина Л.В.* Воздействие сточных вод контролируемых выпусков на экологическое состояние Амурского залива // *Автореф. дис... канд. биол. наук.* Владивосток: ТИНРО-центр. 2005. 19 с.

63. *Никаноров А.М., Брызгалов В.А.* Реки России. Часть IV. Реки Дальнего Востока (гидрохимия и гидроэкология): монография. – Ростов/Д: «НОК», 2011.– 324

64. *Никулина Т.В.* Оценка экологического состояния реки Раздольная по составу индикаторных видов водорослей // *Вестн. ДВО РАН.* 2006. № 6. С71–78.

65. *Огородникова А.А.* Эколого-экономическая оценка воздействия береговых источников загрязнения на природную среду и биоресурсы залива Петра Великого. Владивосток: ТИНРО–центр, 2001. 194 с.

66. Орлова Т.Ю. Диатомовые водоросли планктона неритических вод Южного Приморья: Автореф. дис. . канд. биол. наук. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 26 с.
67. Орлова Т.Ю., Селина М.С., Стоник И.В. В кн.: Экологическое состояние и биота югозападной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Владивосток: Дальнаука, 2000. Т. 1. С. 129–146.
68. Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., Волкова Т.И. и др. Интеркалибрация метода Бруевича для определения общей щелочности в морской воде // Океанол. 2008. Т. 48. № 3. С. 477–483.
69. Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., Ходоренко Н.Д. и др. Основной солевой состав и карбонатное равновесие в поровой воде осадков эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море). Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 3. С. 69–80.
70. Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю. Михайлик Т.А. и др. Гидрохимический режим эстуария реки Партизанской // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 396–405.
71. Подорванова Н.Ф., Ивашишникова Т.С., Петренко В.С., Хомичук Л.С. Основные черты гидрохимии залива Петра Великого // Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1989. 201 с.
72. Полякова А.М. Характеристика процессов волнения в заливе Петра Великого // Современное состояние и тенденции измерения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС. 2008 С. 110-133.
73. Пропп М.В., Пропп Л.Н. Гидрохимические основы процесса первичного продуцирования в прибрежном районе Японского моря // Биол. моря. 1981. № 1. С. 29–37 .
74. Радионов Н.П. Японское море // Прогноз загрязнения морей СССР. Л.: ГИМИЗ. 1984. С. 118–150.
75. Рачков В.И. Гидрохимические условия в вершине Уссурийского залива в период нереста анадары // Изв. ТИНРО. 2006. Т. 146. С. 264–275.
76. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Вып. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 627 с.
77. Россия и Китай подписали Меморандум о совместном мониторинге качества воды трансграничных рек // Вестник Азия ИТАР-ТАСС. 2006. 21 февраля.
78. Свинухов Г.В. Синоптико-статистические методы долгосрочных прогнозов погоды на Дальнем Востоке // Тр. ДВНИГМИ. 1977. Вып. 65. 168 с.
79. Северная часть Уссурийского залива. Карта № 65005, масштаб 1: 50000, ГУНИО МО, 1987 г.
80. Сергеев А.Ф., Матвеев В.И., Лобанов В.Б. и др. Изменчивость придонной температуры воды в прибрежной зоне Приморья в 2003-2007 гг. // Тез. докл. третьей международ. науч.-практ. конф. «Морские прибрежные экосистемы. Водоросли, беспозвоночные и продукты их переработки», 8-10 сентября 2008 г., Владивосток. С. 207-208.

81. 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.

82. Семкин П.Ю., Барабанщиков Ю.А., Михайлик Т.А. и др. Гидролого-гидрохимические исследования в эстуарии реки Партизанской (зал. Находка) // Океанологические исследования: VI конф. Молодых ученых, 2013г., Владивосток : тез. доклад. – Владивосток ТОИ ДВО РАН, 2013.

83. Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Ходоренко Н.Д., и др. Продукционно-деструкционные процессы органического вещества в эстуариях рек Артемовка и Шкотовка (Уссурийский залив) в летний сезон // Вод. Ресурсы. 2015. Т. 42. № 3. С. 311–321.

84. Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Михайлик Т. А. и др., Гидрохимические исследования эстуария р. Партизанской (залив Находка) в период летней межени // Изв. ТИНРО. 2018а. Т.193. С. 143–152.

85. Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др., динамика и структура вод в эстуарии реки Партизанской (залив Находка, Японское море) // Вод. ресурсы. 2018б. В печати.

86. Симонов А.И. Некоторые особенности гидрологии устья с приглубым взморьем. Труды ГОИН, вып. 45. 1959.

87. Симонов А.И. Закономерности формирования режима солености, растворенного кислорода, активной реакции воды (рН) и щелочности на устьевом взморье. Сб. " Химические процессы в морях и океанах", Изд-во "Наука", М. 1966.

88. Симонов А.И. Гидрология и гидрохимия устьевого взморья. М.: Гидрометеиздат, 1969. 230 с.

89. Скриптунов Н.А. Влияние речного стока на гидрологические процессы на устьевом взморье в ледовый период // Труды ГОИН. 1976. Вып. 129. С. 5–36.

90. Скриптунов Н.А., Луначев Ю.В. Процессы проникновения осолоненных вод из моря в неприливные устья рек // Труды ГОИН. 1982. Вып. 161. С. 68–86.

91. Слободскова В.В., Солодова Е.Е., Челомин В.П. Применение генотоксического анализа для мониторинга зоны рек Раздольной и Артемовки (Приморский край) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2011. № 5. С. 488 – 493.

92. Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИОАН им. П.П. Ширшова. 1992. 199 с.

93. Соглашение между правительством РФ и правительством КНР о сотрудничестве в области охраны окружающей среды. 27 мая 1994 г. // Сборник российско-китайских договоров. 1949–1999. М., 1999. С. 252–254.

94. Состояние морских экосистем, находящихся под влиянием речного стока. Владивосток: Дальнаука, 2005. 261 с. ISBN 5-8044-0652-3.

95. Справочник по климату СССР. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Л.: Гидрометеиздат. 1968. Ч. 4. Вып. 9. 372 с

96. *Стунжас П.А., Тищенко П.Я., Ивин В.В. и др.* Первый случай аноксии в водах Дальневосточного морского заповедника // ДАН. 2016. Т. 467. № 2. С. 218–221.
97. *Супранович Т.И., Якунин Л.П.* Гидрология залива Петра Великого. Труды ДВНИГМИ. Л.: Гидрометеиздат, 1976. Вып. 22. 198 с.
98. *Тернер Дж.* Эффекты плавучести в жидкостях : монография. – М. : Мир, 1977. – 431 с.
99. *Тихомирова Е.А.* Пространственное распределение биогенных веществ в заливе Петра Великого в «теплые» и «холодные» годы // Вест. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 134–139.
100. *Тищенко П.Я., Вонг Чи Ши, Павлова Г.Ю. и др.* Измерение рН морской воды с помощью ячейки безжидкостного соединения // Океанология. 2001. Т. 41. № 6. С. 849-859.
101. *Тищенко П.Я., Чичкин Р.В., Ильина Е.М., Вонг Чи Ши.* Измерение рН в эстуариях с помощью ячейки безжидкостного соединения // Океанол. 2002. Т. 42. № 1. С. 32–41
102. *Тищенко П.Я., Вонг Ч.Ш. Волкова Т.И.* Карбонатная система эстуария реки Раздольной (Амурский залив Японского моря) // Биол. моря. 2005а. Т 31. № 1. С. 51–60.
103. *Тищенко П.Я., Звалинский В.И., Шевцова О.В.* Гидрохимические исследования эстуария река Раздольная – Амурский залив // Состояние морских экосистем, находящихся под влиянием речного стока. Владивосток: Дальнаука. 2005б. С. 53-88.
104. *Тищенко П.Я., Тищенко П.П., Звалинский В.И., и др.* Карбонатная система Амурского залива (Японское море) летом 2005 г.// Изв. ТИНРО. 2006 а. Т.146. С.235–255.
105. *Тищенко П.Я., Вальманн К., Василевская Н.А., и др.* Вклад органического вещества в щелочной резерв природных вод // Океанол. 2006б. Т.46. № 2. С. 211–219
106. *Тищенко П.Я.* Кислотно-основное равновесие в морских и эстуарных водах // Автореф. дисс... док. хим. наук. Владивосток, 2007а. 50с.
107. *Тищенко П.Я.* Кислотно-основное равновесие в морской воде // Исследования морских экосистем и биоресурсов. М.: Наука. 2007б. С. 17–186.
108. *Тищенко П.Я., Талли Л.Д., Лобанов В.Б., и др.* Влияние геохимических процессов в придонном слое на гидрохимические характеристики вод Японского моря // Океанол. 2007в. Т. 47. № 3. С. 380–389.
109. *Тищенко П.Я., Сергеев А.Ф., Лобанов В.Б. и др.* Гипоксия придонных вод Амурского залива // Вестник ДВО РАН. 2008. № 6. С. 115–125.
110. *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.
111. *Тищенко П.Я., Михайлик Т.А., Павлова Г.Ю. и др.* Карбонатное равновесие вод реки Раздольной // Геохимия. 2017. № 3. С. 236–248.

112. *Тищенко П.П., Михайлик Т.А.* Сезонная изменчивость карбонатной системы эстуария реки Раздольной. Океанологические исследования: V конф. Молодых ученых, 2011г., Владивосток : тез. доклад. – Владивосток ТОИ ДВО РАН, 2011. С 125-126.
113. *Тищенко П.П.* Сезонная гипоксия Амурского залива – автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Владивосток, 2013, 16 с.
114. *Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др.* Роль даунвеллинга/апвеллинга в формировании/разрушении гипоксии придонных вод Амурского залива (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2015 Т. 183. С. 156–165.
115. *Тищенко П. Я., Стунжас П.А., Ивин В.В., и др.* Сезонная гипоксия вод Дальневосточного морского заповедника // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 3(23). С 124 – 129.
116. *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
117. *Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю. и др.* Гидрохимия эстуария реки Туманной (Японское море) // Океанол. 2018. Т. 58. № 2. С. 192–204.
118. *Рогачев К.А., Шлык Н.В.* Прямые наблюдения эстуарной циркуляции вод в бухте суходол и северной части Уссурийского залива (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2012. Т. 170. С. 210–219.
119. *Фролов А.П. Хубларян М.Г.* Проникновение соленой воды в пресноводные прибрежные горизонты // Вод. ресурсы. 1986. №2. С 58–62
120. *Федорец Ю.В.* Экология ихтиопланктонных сообществ морского мелководья и эстуариев рек северной части залива Петра Великого – автореф. дис. канд. биол. наук. Владивосток, 2010, 24 с.
121. *Хайлов К.М.* Экологический метаболизм в море : монография. : Киев.: Наук. Думка, 1971. – 252 с.
122. *Хлебович В.В.* Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука. 1974. 235 с.
123. *Хубларян М.Г., Фролов А.П., Юшманов И.О.* Интрузия морских вод в прибрежные водоносные горизонты // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 3, с 288–301
124. *Хендерсон–Селлерс Б., Маркленд Х.Р.* Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л. : Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
125. *Чижова Т.Л., Кудряшова Ю.В., Прокуда Н.А., Тищенко П.Я.* Распределение полициклических ароматических углеводородов в воде, взвеси и донных отложениях эстуариев рек залива Петра Великого // Вест. ДВО РАН. 2013. № 6 (172). С. 149–155.
126. *Шулькин В.М., Семькина Г.И.* Сезонная и многолетняя изменчивость содержания и выноса биогенных соединений р. Раздольной (Приморский край) // Вод. ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 575-583.
127. *Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Перепелятников Л.В.* Пространственно-временная изменчивость химического состава речных вод юга Дальнего востока // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 4. С. 428–439.

128. Шулькин В.М., Семькина 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. Владивосток: Издательский дом Дальневост. Федерал. Ун-та. 2012. 440 с.
129. Экологическое состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Владивосток: Дальнаука, 2000. Т. 1. 206 с.
130. Экологическое состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Владивосток: Дальнаука, 2001. Т. 2. 180 с.
131. Экологическое состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Владивосток: Дальнаука, 2002. Т. 3. 203 с.
132. Юрасов Г.И., Ванин Н.С., Рудых Н.И. Особенности гидрологического режима зал. Петра Великого в осенне-зимний период // Изв. ТИНРО. 2007. Т. 148. С 211–220.
133. An S., Gardner W.S. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) as a nitrogen link, versus denitrification as a sink in a shallow estuary (Laguna Madre/Baffin Bay, Texas) // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2002. V. 237. P. 41–50.
134. Adekola K.A., Akinyemi T.A. International Journal of Advances in Agricultural Science and Technology, Vol.2 Issue.9, November. 2014, P. 1–6.
135. Bowden K.F., Hamilton P. Some experiments with a numerical model of circulation and mixing in a tidal estuary // Estuar. Coastal Mar. Sci. 1975. № 3. P. 281–301.
136. Breitburg D.L., Hondorp D. W., Davias L. A., Diaz R.J. Hypoxia, Nitrogen, and fisheries: Integrating effects across local and global landscapes // Annu. Rev. Mar. Sci. 2009. Vol. 1. P. 329 – 349.
137. Burnett, W.C., Cowart, J.B., Deetae, S. Radium in the Suwannee River and estuary spring and river input to the Gulf of Mexico // Biogeochemistry 1990. Vol. 10, 237–255.
138. Calleja M.L, Duarte C.M., Prairie Y.T. et al. Evidence for surface organic matter modulation of air-sea CO<sub>2</sub> gas exchange // Biogeosciences. 2009. Vol. 6. P. 1105–1114.
139. Cameron W.M., Pritchard D.W. Estuaries // The Sea /Ed. Hill M.N. N.Y.: John Wiley and Sons, 1963. Vol. 2. P. 306–324.
140. Carpenter J.H. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method // Limnol.Oceanogr. 1965. Vol. 10. P. 141–143.
141. Costanza R., d'Arge R., Rudolf de Groot. The value of the world's ecosystem services and natural capital // NATURE. 1997. Vol. 387. 15 MAY. P. 253 – 260.
142. Changming Ye., Hai Y., Mei D. Eco-environmental problems and protection in Tumen River development // J. Environm. Sci. 1995. Vol. 7. № 3. P. 317–324.

143. *Dagg, M.J., Benner, R., Lohrenz, S., Lawrence, D.* Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes // *Cont. Shelf Res.* 2004. Vol. 24. P. 833–858.
144. *Dagg M.J., Bianchi T., McKee B., Powell R.* Fates of dissolved and particulate materials from the Mississippi river immediately after discharge into the northern Gulf of Mexico, USA, during a period of low wind stress // *Cont. Shelf Res.* 2008. Vol. 28. P. 1443–1450.
145. *Deborde J., Anschutz P., Chaillou G., et al.* The dynamics of phosphorus in turbid estuarine systems: Example of the Gironde estuary (France) // *Limnol. Oceanogr.* 2007. V. 52. P. 862–872.
146. *Diaz R.J., Rosenberg R.* Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems // *Science.* 2008. Vol. 321. P. 926–929.
147. *Davies J.L.* A morphogenetic approach to world shorelines // *Geomorphol.* 1964. Vol. 8. P. 127–142.
148. *Dickson A.G.* pH scales and proton-transfer reactions in saline media such as sea water. // *Geochim.Cosmochim.Acta.* 1984. Vol.48. P. 2299–2308.
149. *Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R.* (Eds.). Guide to Best Practices for Ocean CO<sub>2</sub> Measurements // *PICES Special Publication № 3.* 2007. 191 p.
150. *DOE.* Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water; version 2, A.G. Dickson and C. Goyet, eds. 1994. ORNL/CDIAC-74.
151. *Funahashi T., Kasai A., Ueno M., Yamashita Y.* Effects of Short Time Variation in the River Discharge on the Salt Wedge Intrusion in the Yura Estuary, a Micro Tidal Estuary, Japan // *Journal of Water Resource and Protection.* 2013. Vol. 5. P. 343–348.
152. *Froelich P.N.* Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism // *Limnol. Oceanogr.* 1988. Vol. 33. P. 649–668.
153. *Geerts L., Cox T.J.S., Maris T. et al.* Substrate origin and morphology differentially determine oxygen dynamics in two major European estuaries, the Elbe and the Schelde // *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2017. Vol. 191, P. 157–170.
154. *Guo X, Valle-Levinson A.* Tidal effects on estuarine circulation and outflow plume in the Chesapeake Bay // *Continental Shelf Research.* 2007. Vol. 27. № 1. P. 20–42.
155. *Gilbert, D., Sundby, B., Gobeil, C., et al.* A seventy-two year record of diminishing deep-water oxygen in the St. Lawrence estuary The northwest Atlantic connection // *Limnol. Oceanogr.*, 2005. Vol. 50, P. 1654–1666.
156. *Hagy J. D., Boyton H., Weefe S.W. and Wood K.* Hypoxia in Chesapeake bay, 1950 – 2001: long-term change in relation to nutrient loading and river flow // *Estuaries.* 2004 Estuarine Research Federation, Port Republic, MD, 27(4). P. 634–658.
157. *Jiang J.* The Agricultural Industrialization of China's Heilongjiang Province // *Food Security and Industrial Clustering in Northeast Asia. New Frontiers in Regional Science: Asian Perspectives,* 2016 Vol. 6. Springer, Tokyo. 157– 165.

158. *Kasai A., Kurikawa Y., Ueno M. et al.* Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2010. Vol. 86. № 3. P. 408–414
159. *Lam P., Kuypers M.M.M.* Microbial nitrogen cycling processes in oxygen minimum zones. // *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2011. Vol. 3. P. 317–345.
160. *Levin L.A., Ecau W., Gooday A.J., et al.* Effect of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos // *Biogeosciences*. 2009. Vol. 6. P. 2063–2098.
161. *Lisitzin A.P.* The silica cycle during the last ice age // *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.* 1985. Vol. 50. P. 241–270 .
162. *Meybeck M.* Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes // *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2003 Dec 29; 358(1440): 1935–1955.doi:10.1098/rstb.2003.1379
163. *Moore, W.S.* The effect of submarine groundwater discharge on the ocean // *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2010. Vol. 2. P. 59–88
164. *Monbet Y.* Control of phytoplankton biomass in estuaries: A comparative analysis of microtidal and macrotidal estuaries // *Estuaries*. 1992. Vol. 15. № 4. P. 563–571.
165. *Passow U.* Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments // *Progress in Oceanogr.* 2002. Vol. 55. P. 287–333.
166. *Pritchard D.W.* What is an estuary: a physical viewpoint // *Estuaries*. Washington: Am. Ass. Adv. Sci., 1967. Publ. 83. P. 3–5.
167. *Priya K.L., Jegathambal P., James E.J.* Seasonal Behavior of a Shallow Estuary of the Lower Cauvery // *Environmental Research, Engineering and Management*. 2012. № 3 (61). P. 6–13.
168. *Rabalais, N. N., Turner, R. E., Sen Gupta, B. K., Boesch, D. F., Chapman, P., and Murrell, M. C.* Characterization and longterm trends of hypoxia in the northern Gulf of Mexico Does the science support the Action Plan? // *Estuar. Coasts*. 2007. Vol. 30. P. 753–772.
169. *Redfield A.C., Ketchum B.H, Richards F.A.* The influence of organisms on the composition of seawater // *The Sea / ed. M.N. Hill. – N Y. : Interscience, 1963.* Vol. 2. P. 26–77
170. *Robinson C.L. Barry D.A.* Effect of tidal forcing on a subterranean estuary *Advances in Water Resources*. 2007. Vol. 30. P. 851–865.
171. *Santos, I.R., Eyre, B.D., Huettel, M.* The driving forces of porewater and groundwater flow in permeable coastal sediments: A review // *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2012. Vol. 98 P. 1–15.
172. *Santos, I.R., Bryan, K.R., Pilditch C.A., Tait D.R.* Influence of porewater exchange on nutrient dynamics in two New Zealand estuarine intertidal flats // *Marine Chemistry* 2014. Vol. 167. P. 57– 70.
173. *Seuront L., Vincent D., Mitchell J.G.* Biologically induced modification of seawater viscosity in the Eastern English Channel during a *Phaeocystis globosa* spring bloom // *J. Marine Systems*. 2006. Vol. 61. P. 118–133.
174. *Semkin P. Yu., Tishchenko P.Ya., Mikhailik T.A. et al.* Carbonate system and the dissolved oxygen in estuaries of Peter the Great Bay of the Japan/East

Sea // ECSA 53: Estuaries and coastal areas in times of intense change. 13–17  
October 2013. Shanghai, China.

175. *Sarthou G., Timmermans K.R., Blain S., Treguer P.* // J. Sea Res. 2005. Vol. 53. P. 25–42.

176. *Stanley, D.W., Nixon, S.W.*, Stratification and bottom-water hypoxia in the Pamlico River Estuary. United States // Estuaries. 1992. Vol. 15, Iss. 3. P. 270–281  
Web. doi:10.2307/1352775.

177. *Sun H., Wang J.* Industrial Integration in Changchun and Jilin City Based on the Similar Coefficients of Industrial Structure // American Journal of Industrial and Business Management. 2013. Vol. 3 №. 2. P. 127–130 . doi: 10.4236/ajibm.2013.32016.

178. *Thamdrup, B., Dalsgaard T.* Production of N<sub>2</sub> through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrite reduction in marine sediments // Appl. Environ. Microb. 2002. Vol. 68. P. 1312–1318.

179. *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. Vol. 24. № 6. P. 1033–1050.

180. *Tishchenko P., Ivin V., Stunzhas P.* Anoxia in the Far Eastern Marine Biosphere Reserve (Peter the Great Bay) // IMBER Newsletter. 2014. № 26. P. 21–22.

181. *Tishchenko P.P., Tishchenko P. Ya., Lobanov V.B. et al.* Summertime in situ monitoring of oxygen depletion in Amursky Bay (Japan/East Sea) // Continental Shelf Research. 2016. Vol. 118. P. 77–87.

182. *Taniguchi M., Burnett W.C., Jaye E. Cable and Jeffrey V. Turner.* Investigation of submarine groundwater discharge // Hydrol. Process. 2002. Vol. 16. P. 2115–2129.

183. *Treppke U.F., Lange C.B., Wefer G.* Vertical fluxes of diatoms and silicaflagellates in the eastern equatorial Atlantic, and their contribution to the sedimentary record // Mar. Micropaleont. 1996. Vol. 28. P. 73–96.

184. *Wang S., Wang D., Yang X.* Urbanization and its impacts on water environment in Tumen River basin // Chi. Geograph. Sci. 2002. Vol. 12. № 3. P. 273–281.

185. *Watanabe K., Kasai A., Antonio E. et al.* Influence of salt-wedge intrusion on ecological processes at lower trophic levels in the Yura Estuary, Japan // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2014. Vol. 139. P. 67–77

186. *Walters R.A., Cheng R.T., Conomos T.J.* Time scales of circulation and mixing processes of San Francisco Bay waters // Hydrobiologia. 1985. Vol. 129. P. 13–36.

187. *Wei T., Muqing Y., Wang G.* Pollution trend in the Tumen River and its influence on regional development // Chi. Geographical Sci. 1999. Vol. 9. № 2. P. 146–150.

188. *White E.* Tumen River: The Greater Tumen Initiative (GTI). Report, 2010.

189. *Werner A.D., Bakker M., Vincent E.A.* Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges *Advances in Water Resources*. 2013. Vol. 51. 3–26.
190. *Wang X., Du J., Tao J. et al.* An estimation of nutrient fluxes via submarine groundwater discharge into the Sanggou Bay – A typical multi-species culture ecosystem in China // *Marine Chemistry*. 2014. Vol. 167. P. 113–122.
191. *Yin X., Yin C.* The flux of land-based source pollutants from Tumen River system entering the Sea of Japan // *Chi. Geograph. Sci.* 1998. Vol. 8. № 3. P. 239–245.
192. *Zhang, J., Gilbert, D., Gooday, A. J. et al.* Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7. P. 1443–1467. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1443-2010>.
193. *Zhang P., Pang Y, Pan H., et al.* Factors Contributing to Hypoxia in the Minjiang River Estuary, Southeast China // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2015. Vol. 12. P. 9357–9374; doi:10.3390/ijerph120809357
194. *Zhu Ya., Li J., Lu Xu.* A study on quality of aquatic environment in Tumen River area // *Chi. Geograph. Sci.* 1998. Vol. 8. № 2. P. 126–135.
195. *Zhuo-Yi Zhu, Jing Zhang, Ying Wu et al.* Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: Oxygen depletion and organic matter decomposition // *Marine Chemistry*. 2011. Vol 125. P. 108–116.