

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Российский государственный гидрометеорологический университет»



*На правах рукописи*  
УДК 504.42:57.047

Волощук Екатерина Васильевна

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ И БИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА  
ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИДОННЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ  
ФИНСКОГО ЗАЛИВА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

Специальность: 25.00.36 – геоэкология

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

Научный руководитель:  
Доктор ф.-м. наук, профессор  
Рябченко Владимир Алексеевич

Научный консультант:  
Кандидат ф.-м. наук, доцент  
Ерёмина Татьяна Рэмовна

Санкт-Петербург  
2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, зав. Лабораторией моделирования океанских биогеохимических циклов Санкт-Петербургского филиала федерального государственного бюджетного учреждения «Институт океанологии» РАН  
**Рябченко Владимир Алексеевич**

Научный консультант – кандидат физико-математических наук, зав. кафедрой промышленной океанологии и охраны природных вод федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»  
**Ерёмина Татьяна Рэмовна**

Официальные оппоненты – доктор биологических наук, зав. лабораторией гидробиологии федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт озераведения РАН  
**Курашов Евгений Александрович**

Кандидат географических наук, доцент каф. океанологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет  
**Савчук Олег Павлович**

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Зоологический институт РАН

Защита состоится ..... 2017 г. в .... часов .... минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.03 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195027, г. Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д. 3. Тел. (812) 633-01-82, 372-50-92

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу 192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская, д. 79. Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.03.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук Истомин Е.П.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Одной из характерных черт гидрохимического режима придонных вод Финского залива является смена окислительно-восстановительных условий. Это явление оказывает существенное влияние на биогеохимические процессы, происходящие в бентосном слое, обуславливающие изменения запасов биогенных соединений, прежде всего азота и фосфора. Оценка запасов азота и фосфора и понимание источников их поступления в морскую среду – актуальная задача в условиях ухудшающегося экологического состояния Финского залива вследствие эвтрофирования. В общем смысле эвтрофирование (греч. «eu» – «хорошо» и «trophe» – «питание») представляет собой процесс естественного или антропогенного обогащения воды биогенными элементами, сопровождающийся ростом биологической продуктивности бассейна. Последствия эвтрофирования очень неблагоприятные: рост содержания биогенных элементов влечет за собой вспышку цветения водорослей, в результате чего снижается глубина проникновения света вглубь водоема, затрудняется процесс фотосинтеза растений пелагиали. Отмершие автотрофы опускаются на дно и формируют запас органического вещества, на окисление которого расходуется кислород. Установление гипоксии (концентрация  $O_2 < 2$  мл/л) влечет выход фосфора из донных отложений, стимулирующий развитие водорослей и повышение азотфиксации. Таким образом, последствия эвтрофирования становятся причинами его дальнейшего усиления, образуя замкнутый круг, так называемый «порочный» круг эвтрофирования [Tuominen et al., 1998, Vahtera et al., 2007, Savchuk, 2010]. Кроме этого в результате эвтрофирования ухудшаются органолептические характеристики вод (вкус, запах, цвет), изменяется рН, повышается содержание в воде железа и марганца, метана и сероводорода, растет мутность. Совокупность этих изменений приводит к ухудшению качества вод, рекреационной привлекательности водоема и снижению рыболовства.

Финский залив – один из самых эвтрофированных заливов Балтийского моря [Lundberg et al., 2005]. Состояние гипоксии и аноксии (отсутствие  $O_2$ ) часто наблюдаются на дне залива в летний период и приводят к гибели животных и образованию «мертвых» зон. До сих пор остается открытым вопрос о вкладе природного и антропогенного факторов в развитии гипоксийных явлений.

Еще одной серьезной проблемой в связи с интенсивным развитием судоходной отрасли является вселение чужеродных видов. Инвазивные виды, или, виды-вселенцы, принято рассматривать как угрозу вследствие их отрицательного влияния на биоразнообразие и функционирование экосистемы, а также конкуренции с коренными видами. Тем не менее, существуют примеры положительного влияния вселенцев на состояние экосистемы, когда инвазионные виды становятся пищевым ресурсом для редких или уязвимых коренных видов или их функциональными заместителями [Schlaepfer et al., 2010, Зуев и др., 2015]. Искоренение видов-вселенцев после их интродукции и заселения практически невозможно. В течение двух предшествующих столетий в Балтийском море было найдено приблизительно 120 чужеродных видов, вселение большинства из них произошло непреднамеренно с балластными водами, вследствие обрастания судов или расселения из места первоначальной интродукции. Однако, достаточно низкая соленость вод в Балтийском море (в среднем 7 ‰) является сдерживающим фактором для успешной интродукции видов.

Впервые обнаруженные в Балтийском море в 1985 г., в Финском заливе в 1990 г., в 2008 г. полихеты рода *Marenzelleria* spp. массово заселили участки дна в Финском заливе. Вид эвригалинен и устойчив к гипоксийным явлениям, что в итоге способствовало успешному его вселению. К 2009 г.

*Marenzelleria* spp. оккупировали большую часть акватории Финского залива, и стали ведущим, а местами практически единственным, представителем макрозообентоса [Максимов, 2010]. Активная биотурбационная и биоирригационная деятельность полихет способствует увеличению глубины проникновения кислорода в донные отложения и росту площади окисленного слоя. Изменение кислородных условий бентосного слоя определяет направление потоков биогенных соединений и, таким образом, влияет на развитие процесса эвтрофирования. Вследствие крупномасштабного распространения полихет *Marenzelleria* spp. по Балтийскому морю и их высокой численности, необходимы детальные исследования, направленные на выявление возможных последствий жизнедеятельности данных организмов в геохимическом и экологическом аспектах.

#### **Цель и задачи работы**

**Цель** настоящего исследования – оценка влияния изменения климата и биоирригационной активности полихет *Marenzelleria* spp. на экологическое состояние экосистемы Финского залива на основе данных натуральных наблюдений и результатов моделирования. Достижение цели возможно посредством выполнения следующих **задач**:

1. Выявить взаимосвязь между изменением климата и формированием гипоксии в глубинных водах восточной части Финского залива.
2. Провести анализ данных натуральных наблюдений о геохимических процессах в донных отложениях Финского залива под воздействием вида-вселенца полихет *Marenzelleria* spp.
3. Получить количественную оценку влияния биоирригационной деятельности *Marenzelleria* spp. на изменение запасов биогенных соединений в донных отложениях.
4. Дать прогностическую оценку уровня эвтрофирования Финского залива с учетом воздействия вида-вселенца *Marenzelleria* spp. в условиях изменения климата.

#### **Предмет и объект исследования**

**Предметом** настоящего исследования является развитие эвтрофирования в морской среде под воздействием вида-вселенца *Marenzelleria* spp. в условиях изменения климата. **Объект** исследования – Финский залив.

#### **Метод исследования**

Для решения поставленных задач в работе использовались методы статистического анализа и математического моделирования.

#### **Научная новизна исследования**

1. Установлена статистически значимая связь между возникновением гипоксийных явлений в восточной части Финского залива и индексом Северо-Атлантического колебания.
2. Впервые на основе современных данных натуральных наблюдений выявлены закономерности вертикального распределения ряда химических соединений в поровой воде донных отложений Финского залива под воздействием полихет *Marenzelleria* spp.
3. Впервые для Финского залива была адаптирована бентосная модель диагенеза углерода и биогенных веществ.
4. Впервые для Финского залива получена количественная оценка изменения запасов биогенных соединений с учетом биоирригационной активности вида-вселенца через 5 лет.
5. Впервые для Финского залива получена оценка развития эвтрофирования с учетом воздействия полихет *Marenzelleria* spp. в условиях изменения климата.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Возникновение гипоксийных явлений в восточной части Финского залива обусловлено усилением отрицательных значений индекса Северо-Атлантического колебания;

2. Закономерности геохимических изменений в донных отложениях Финского залива под воздействием *Marenzelleria* spp.;

3. Результаты моделирования распределения биогенных соединений в донных отложениях с учетом биоирригационной активности полихет *Marenzelleria* spp.;

4. Прогностическая оценка развития эвтрофирования Финского залива с учетом влияния вида-вселенца *Marenzelleria* spp. в условиях изменения климата.

#### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в отборе и химическом анализе проб воды и донных отложений в ходе экспедиции Российского государственного гидрометеорологического университета в июле-августе 2015 г. в восточной части Финского залива, проводил анализ данных наблюдений. Автором выявлена взаимосвязь возникновения гипоксических явлений в Финском заливе с климатическими факторами.

Автором была адаптирована бентосная модель CANDI для условий Финского залива, а также проведены численные эксперименты, выполнен анализ результатов и получены прогностические оценки биогеохимических изменений в донных отложениях. Автором выполнен анализ результатов модельных расчетов, полученных на модели SPBEM.

Диссертант является первым автором статьи, опубликованной в журнале из перечня ВАК, и двух расширенных тезисов.

#### **Практическая значимость полученных результатов**

Полученные оценки потоков биогенных соединений с учетом ирригационной активности *Marenzelleria* spp. могут быть учтены при планировании мероприятий по снижению антропогенной нагрузки на Балтийское море в рамках принятого HELCOM Плана Действий по Балтийскому Морю (ПДБМ).

Оценки биоирригационной активности вида-вселенца могут быть использованы при расчетах эволюции экосистемы всего Балтийского моря в будущем климате.

Массивы данных натуральных наблюдений о содержании биогенных и иных соединений в донных отложениях являются уникальными и могут быть использованы для дальнейшего анализа, выявления закономерностей и моделирования.

Результаты работы внедрены и используются в практических работах студентов-океанологов по дисциплине «Моделирование экосистем».

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.36 «Геоэкология» по следующим пунктам:

П. 1.7 «Междисциплинарные аспекты стратегии выживания человечества и разработка научных основ регулирования качества состояния окружающей среды»;

П. 1.12 «Геоэкологический мониторинг и обеспечение экологической безопасности, средства контроля»;

П. 1.14 «Моделирование геоэкологических процессов».

#### **Апробация работы**

Результаты исследований были представлены на международной конференции LITTORAL2014 г. Клайпеда, Литва (2014 г.), на обучающем курсе для аспирантов «Глобальные циклы элементов и изменения в окружающей среде», г. Лунд, Швеция (Global Element Cycles and Environmental Change) в 2014 году, на 10-м научном Конгрессе по Балтийскому морю, г. Рига, Латвия

(Baltic Sea Science Congress) (2015 г.), на летней школе для аспирантов «Влияние изменения климата на морскую среду, роль изменяющихся экстремальных явлений», о. Аско, Швеция (Impact of climate change on the marine environment with special focus on the role of changing extremes) в 2015 году, на IV объединенной конференции молодых ученых и специалистов МАГ-2015 «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», г. Санкт-Петербург, в 2015 году, на научном форуме трехстороннего сотрудничества по Финскому заливу ([Gulf of Finland Trilateral Co-operation Scientific Forum](#)), г. Таллинн, в 2015 году, на конференции «Комплексное исследование морей России», г. Севастополь, в 2016 г., на конференции «Морские берега»: Управление рисками в прибрежной зоне в условиях меняющегося мира (EMECs'11 SeaCoasts XXVI: Managing risks to coastal regions and communities in a changing world), г. Санкт-Петербург в 2016 г.

Работа выполнялась при поддержке гранта Русского географического общества РГО\_а №13-05-41464, а также Российского Научного Фонда №14-50-00095. Автор принимал участие в проекте СОСОА программы BONUS (БОНУС\_а №14-04-91721).

### **Публикации**

По теме диссертационного исследования было опубликовано 9 работ, 3 из которых опубликованы в журналах из списка ВАК Министерства образования и науки РФ.

#### **статьи в журналах перечня ВАК**

1. Ерёмина Т.Р., Максимов А.А., **Волощук Е.В.** Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива // Океанология. 2012. Т. 52, № 6. С. 1–9.
2. **Волощук Е.В.**, Ерёмина Т.Р., Рябченко В.А. Моделирование биогеохимических процессов в донных отложениях в восточной части Финского залива с использованием диагенетической модели // Фундам. и прикл. гидрофиз. 2015. Т. 8, № 4. С. 106-113.
3. Ерёмина Т.Р., **Волощук Е.В.**, Максимов А.А. Оценка биогеохимических изменений в донных отложениях восточной части Финского залива вследствие вселения полихет *Marenzelleria* spp. // Известия РГО. 2016. Т. 148, вып. 1. С. 55-71.

#### **в тезисах конференций**

4. Eremina T., **Voloshchuk E.**, Maximov A. Assessment of biogeochemical changes at the sediment-water interface due to large scale *Marenzelleria* spp. invasion in the eastern part of the Gulf of Finland // Abstract book of 12<sup>th</sup> international conference Littoral 2014: Facing present and future coast challenges September 22-26 2014. – Marine Science and Technology Center, 2014. – P. 108.
5. Eremina T., **Voloshchuk E.**, Maximov A., Ryabchenko V. Possible future consequences of *Marenzelleria* spp. invasion in the eastern part of the gulf of Finland: results of diagenetic sediment model // Abstract book of 10<sup>th</sup> Baltic Sea Science Congress June 15-19 2015. – P. 154.
6. **Волощук Е.В.**, Ерёмина Т.Р., Рябченко В.А. Роль ирригационной активности полихет *Marenzelleriaspp.* в биогеохимических изменениях донных отложений Финского залива // Сборник трудов IV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов МАГ-2015 «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Санкт-Петербург. – 2015. – С. 221-224.

7. Eremina T., Isaev A., **Voloshchuk E.**, Ryabchenko V. New approach to model benthic layer with impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. in the Gulf of Finland // Abstract book of Gulf of Finland Trilateral Co-operation Scientific Forum, November 17-18 2015. – Tallinn, Estonia. – P. 63.

8. **Волощук Е.В.**, Ерёмкина Т.Р., Максимов А.А. Исследование закономерностей распределения полихет *Marenzelleria* spp. в восточной части Финского залива // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Материалы молодежной научной конференции, г. Севастополь, 25-29 апреля 2016 г. [Электронный ресурс]. – Севастополь: ФГБУН МГИ. – 2016. – С. 375-379. – Режим доступа: [http://mhiras.ru/news/news\\_201605201055.htm](http://mhiras.ru/news/news_201605201055.htm).

9. **Voloshchuk E.**, Eremina T., Isaev A. Assessment of bioturbation activity of *Marenzelleria* spp. in the eastern Gulf of Finland. Abstract book of the EMECS'11 SeaCoasts XXVI conference: Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. - August 22-27 2016, Saint-Petersburg, Russia. - P. 69.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 122 страницы, 45 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 162 источников.

#### **Благодарности**

Автор признателен своему научному руководителю, д. ф.-м. наук Рябченко В.А. и научному консультанту к. ф.-м. наук Ерёмкиной Т.Р. за всестороннюю помощь и конструктивную критику в процессе написания диссертации. Особую благодарность автор выражает к. г. н., сотруднику РГГМУ Исаеву А.В. за содействие в работе с моделями и к.б.н., старшему научному сотруднику Зоологического института РАН Максиму А.А.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определена цель и поставлены задачи, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены особенности формирования геохимического состава придонных вод и донных отложений в Финском заливе.

**В разделе 1.1** дается физико-географическое описание Финского залива, приводятся геологические особенности пород залива, морфологические характеристики дна, а также описание метеорологических условий района, ледового режима и термохалинной структуры вод.

На рис. 1 представлена карта станций восточной части Финского залива, на которых проводились гидрохимические и гидробиологические измерения Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) в 2013 и 2015 гг.

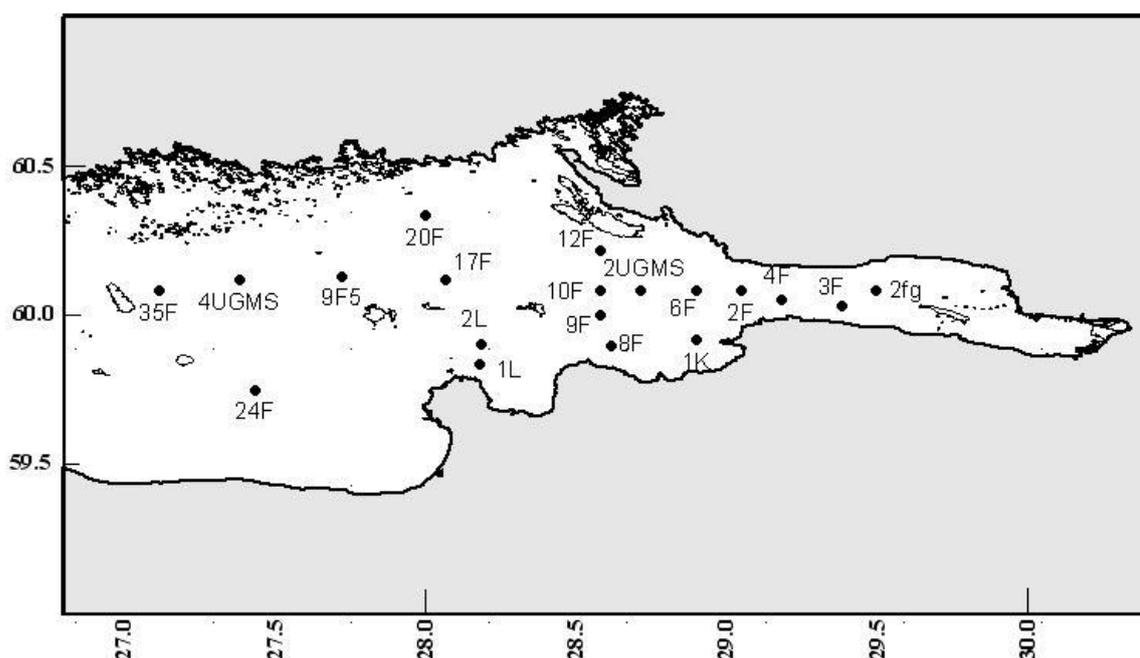


Рис. 1. Карта станций восточной части Финского залива, на которых проводились гидрохимические и гидробиологические измерения РГГМУ

**В разделе 1.2** рассмотрены причины и механизм возникновения гипоксийно-аноксийных условий в глубинных водах Финского залива.

Состояния гипоксии и аноксии часто наблюдаются на дне Финского залива в летний период и приводят к гибели животных и образованию «мертвых» зон. Механизм возникновения гипоксии в заливе связан с двумя основными факторами: физическими процессами, определяющими установление вертикальной стратификации вод и биологическим поступлением органического вещества на дно. Вследствие стратификации вод прекращается поступление кислорода в придонные слои, а накопление органического вещества на дне «съедает» остатки придонного  $O_2$  и приводит к образованию сероводорода.

Гипоксийные явления возникают вследствие эвтрофирования водоема. В общем смысле эвтрофирование (греч. «eu» – «хорошо» и «trophe» – «питание») представляет собой процесс

естественного или антропогенного обогащения воды биогенными соединениями, сопровождающийся ростом биологической продуктивности бассейна. Последствия эвтрофирования весьма неблагоприятные: рост предложения биогенных соединений влечет за собой вспышку цветения водорослей, в результате чего снижается глубина проникновения света вглубь водоема, затрудняется процесс фотосинтеза растений пелагиали. Отмершие автотрофы опускаются на дно и формируют запас органического вещества, на окисление которого расходуется кислород.

Опасность эвтрофирования заключается в том, что его последствия взаимосвязаны между собой и образуют замкнутый круг, так называемый «порочный» круг эвтрофирования [Tuominen et al., 1998, Vahtera et al., 2007, Savchuk, 2010], когда усиление одного из звеньев (процессов) цепи через несколько промежуточных звеньев приводит в итоге к усилению этого звена (процесса) (рис. 2).

В результате эвтрофирования ухудшаются органолептические характеристики вод (вкус, запах, цвет), изменяется рН, повышается содержание в воде железа, марганца, метана и сероводорода, растет мутность, изменяется соотношение Редфильда N:P. Изменение соотношения Редфильда может оказывать влияние на биологическое состояние экосистемы, в особенности на биомассу фитопланктона, видовой состав организмов и, в конечном итоге, на динамику пищевых цепочек [Булгаков и Левич, 1995, Левич и др., 1997].



Рис. 2. «Порочный» круг эвтрофирования

В разделе также приведены литературные данные о биогенной нагрузке на Финский залив от разных источников, и рассмотрены циклы соединений азота и фосфора в кислородной и бескислородной средах.

**В разделе 1.3** выявлено влияние изменения климата на состояние придонных вод и донных отложений Финского залива.

Известно, что характер крупномасштабной атмосферной циркуляции над Балтийским регионом находится под влияние индекса Северо-Атлантического колебания (САК, англ. North Atlantic Oscillation – *NAO*) [Second assessment..., 2015]. Индекс *NAO* представляет собой разность приземных давлений над Азорским максимумом и Исландским минимумом. При положительных значениях индекса преобладают сильные западные ветры, несущие теплый и влажный атлантический воздух на

север Европейского континента. В результате зимы становятся мягче, а количество осадков увеличивается. Наоборот, в периоды отрицательных значений наблюдается похолодание и уменьшение количества осадков и повторяемости западных ветров [Hurrell, 1995, 2003, Hurrell and Deser, 2010, Смирнов, 1998].

Изменение индекса *NAO* также способствует затокам североморских вод в Балтийское море. В периоды отрицательной фазы *NAO* ветра восточных направлений сгоняют на запад поверхностные опресненные воды. Вследствие этого увеличивается придонный компенсационный приток вод в самую восточную часть Финского залива. В результате заток в Балтийское море поступают большие массы более соленой и насыщенной кислородом воды. Более холодные и тяжелые воды Северного моря продвигаются по дну, замещая обедненные кислородом воды во впадинах Балтийского моря и перемещают их далее в Финский залив, в результате чего ухудшается его экологическое состояние [Tuominen et al., 1998, Ерёмкина и Карлин, 2008, Ерёмкина и др., 2012]. Относительно слабые восточные ветры не производят глубокого перемешивания воды, а после замерзания, которое из-за сильных морозов происходит в ранние сроки, оно совсем прекращается. Дополнительный вклад в уменьшение содержания кислорода может также вносить повышение температуры глубинных вод в годы отрицательных аномалий *NAO*, способствующее более интенсивному потреблению кислорода.

При положительных индексах *NAO* наблюдаются мягкие зимы с поздним ледоставом. Дуют сильные западные ветры. При этом происходит нагон поверхностных вод к восточной оконечности залива и, соответственно, отток придонных вод на запад. Одновременно имеет место глубокое ветровое и конвекционное перемешивание и, соответственно, аэрация и охлаждение всей водной толщи. Таким образом, изменения атмосферной циркуляции определяют фактически все гидрометеорологические процессы, способные повлиять на аэрацию глубинных вод.

На основе данных многолетних наблюдений о содержании кислорода в Финском заливе было показано, что гипоксические явления в восточной части залива в 1990-х и 2000-х гг. обусловлены крупномасштабными изменениями атмосферных процессов в Северо-Атлантическом секторе северного полушария [Ерёмкина и др., 2012]. В частности, выявлена статистически значимая корреляционная связь между содержанием  $O_2$  в глубинных слоях воды в летний период и предшествующими зимними (декабрь-март) значениями индекса *NAO* (рис. 3). Рассчитанный коэффициент корреляции Спирмена исследуемых характеристик составил 0.86 и является значимым (уровень значимости  $\alpha=0.01$ ).

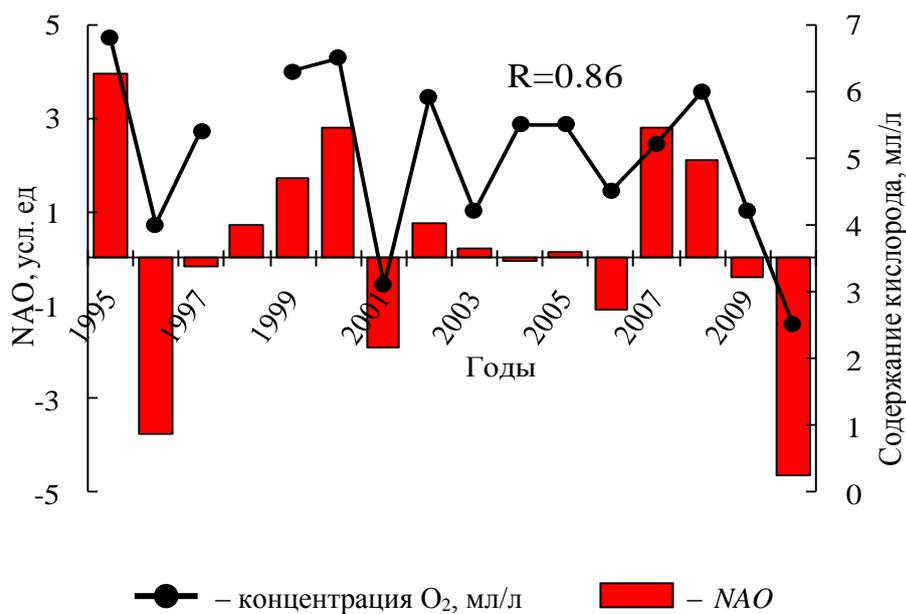


Рис. 3. Зимние значения индекса *NAO* (декабрь-март) и летние концентрации кислорода на глубине 40 м в восточной части Финского залива в период с 1995 по 2010 гг.

**Во второй главе** дано описание крупномасштабного вселения полихет *Marenzelleria* spp. в Балтийское море.

Полихеты рода *Marenzelleria* spp. впервые были обнаружены в Балтийском море в 1985 г. [Bick and Burckhardt, 1989]. Вселение полихет произошло предположительно с балластными водами судов. В первой половине 1990-х *Marenzelleria* spp. проникла в эстонские и финские воды Финского залива [Norkko et al., 1993, Stigzelius et al., 1997, Kotta and Kotta, 1998].

Представители данного рода имеют важные преимущества в сравнении с коренными видами: во-первых, они могут обитать в водах широкого диапазона солености и, во-вторых, устойчивы к гипоксическим явлениям. Кроме этого, успешному расселению полихет способствовали их высокая скорость роста, высокая репродуктивная способность, а также широкая кормовая база [Zettler et al., 2002]. К 2009 г. *Marenzelleria* spp. оккупировали большую часть акватории Финского залива, и стали ведущим, а местами практически единственным, представителем макрозообентоса [Максимов, 2010].

**В разделе 2.1** приводится краткий обзор видов-вселенцев в Финском заливе.

Вселение чужеродных видов животных, растений и микроорганизмов в природные сообщества в результате деятельности человека представляет собой «биологическое загрязнение» [Панов, 2002]. Инвазионные виды, или, виды-вселенцы, принято рассматривать как угрозу вследствие их отрицательного влияния на биоразнообразие и функционирование экосистемы, а также конкуренции с коренными видами. Тем не менее, существуют примеры положительного влияния вселенцев на состояние экосистемы, когда инвазионные виды становятся пищевым ресурсом для редких или уязвимых коренных видов или их функциональными заместителями [Schlaepfer et al., 2010, Зуев и др., 2015.]. Искоренение видов-вселенцев после их интродукции и заселения практически невозможно. Скорость биологических инвазий в XXI веке возрастает в разы, не исключением становится и Финский залив, в котором наблюдается активная судоходная деятельность, строятся

новые порты, в прошлых столетиях были построены каналы, соединяющие бассейны рек Понто-Каспийского (Черное, Азовское и Каспийское море) и Балтийского регионов.

Согласно базе данных инвазионных видов [Baltic Sea ..., 2007] с начала XX века в Финском заливе было обнаружено 15 видов-вселенцев ракообразных, 1 насекомое, 3 моллюска, 4 олигохеты, 9 видов рыб и 1 вид полихет. Расселение видов происходило из самых разных регионов, в основном из Северной Америки, Понто-Каспийского региона, Южно-Китайского моря, Сибири и Атлантики.

Среди видов-вселенцев в Финском заливе можно выделить бычок-кругляк *Neogobius melanostomus*, рачок *Gammarus tigrinus*, хищные ветвистоусые ракообразные *Cercopagis pengoi* и *Evadne anonyx*, моллюск-обрастатель *Dreissena polymorpha*, амфиподы *Chelicorophium curvispinum*. Все эти виды в большей или меньшей степени обладают качествами успешных вселенцев: эвригалинны и толерантны к неблагоприятным условиям среды (наличию химических загрязняющих веществ, патогенов, эвтрофированию), являются хищниками, характеризуются высокой плодовитостью, имеют широкую кормовую базу.

В разделе 2.2 дается эколого-фаунистическое описание вида-вселенца *Marenzelleria* spp., рассмотрены важные физиологические особенности полихет – биотурбация и биоирригация донных отложений. Процесс биотурбации представляет собой совокупность нарушений в донных отложениях, вызванных деятельностью живых организмов [Boudreau, 1996b]. Эти процессы включают в себя выкапывание нор и туннелей, которые затем разрушаются или засыпаются, поглощение и экскрецию отложений, вспахивание поверхностных отложений, строительство насыпей и рытье воронок. В процессе биотурбации происходит перемешивание как твердой, так и жидкой фазы донных отложений. Вследствие биотурбации увеличивается пористость донных отложений, глубина проникновения кислорода и, следовательно, площадь соприкосновения кислорода с донными отложениями.

Биоирригация – это процесс, ускоряющий обмен поровой воды с вышележащими водами в результате деятельности живых организмов [Meysman et al., 2006]. Разделение двух данных процессов в некоторой степени условно, в широком смысле биотурбация донных отложений включает все процессы переноса, совершаемые бентосными организмами [Kristensen et al., 2012]; следуя данному определению, ирригацию можно рассматривать как вид биотурбации, который связан с обменом жидкой фракции донных отложений с вышележащими морскими водами.

В процессе биотурбации и биоирригации увеличивается площадь окисленного слоя и глубина проникновения кислорода в донные отложения (рис. 4).



Рис. 4. Площадь окисленного слоя донных отложений и глубина проникновения кислорода при отсутствии (а) и наличии (б) зарывающихся организмов

Кроме этого в разделе приводится обзор лабораторных и натуральных исследований, касающихся взаимодействия *Marenzelleria* spp. с коренными видами бентосных организмов, особенно в аспекте

конкуренции за пищу и место обитания.

В разделе 2.3 на основе анализа литературных источников показаны тенденции изменения численности и закономерности распределения полихет *Marenzelleria* spp. в различных частях Балтийского моря: вблизи немецкого побережья (цепочка лагун Дарсс-Цингст), в немецкой части Арконского бассейна, вблизи польского побережья (Поморская бухта, Гданьский залив), в Калининградском (Висленском) и Финском заливах.

Отмечено, что тенденции в изменении численности полихет в период вселения и после него типичны для инвазионных видов: непосредственно во время вселения численность невысокая, в течение нескольких последующих лет наблюдается ее экспоненциальный рост, и затем численность падает и стабилизируется на некотором уровне.

В разделе приведены экспедиционные данные РГГМУ по изменению численности и биомассы полихет *Marenzelleria* spp. на станциях в восточной части Финского залива в 2013 и 2015 гг. (рис. 5 и рис. 6).

Не менее важной представляется задача выявления характеристик среды – абиотических факторов, оказывающих влияние на распределение инвазионного вида.

Для исследования распределения полихет в зависимости от различных физико-химических условий в восточной части Финского залива используется модель дерева регрессии (см., например, [Каурри et al., 2015]). В модели происходит оптимальное разделение зависимой переменной (в нашем случае численности полихет) на классы на основе иерархии предикторов (температуры, солености, концентрации кислорода, показателя рН и глубины залива). Выборка наблюдений за 2013 и 2015 гг. невелика, число наблюдений N равно 27. Рассчитанное дерево регрессии представлено на рис. 7.

На основе модели было установлено, что глубина залива играет наиболее важную роль в распределении численности полихет. Так, максимальная численность *Marenzelleria* spp. (более 3000 инд./м<sup>2</sup>) встречается на мелководье (глубины до 30 м) в водах с невысокой соленостью (от 3 до 6 ‰), средней температурой 8.6 °С и средним показателем рН, равным 7.3.

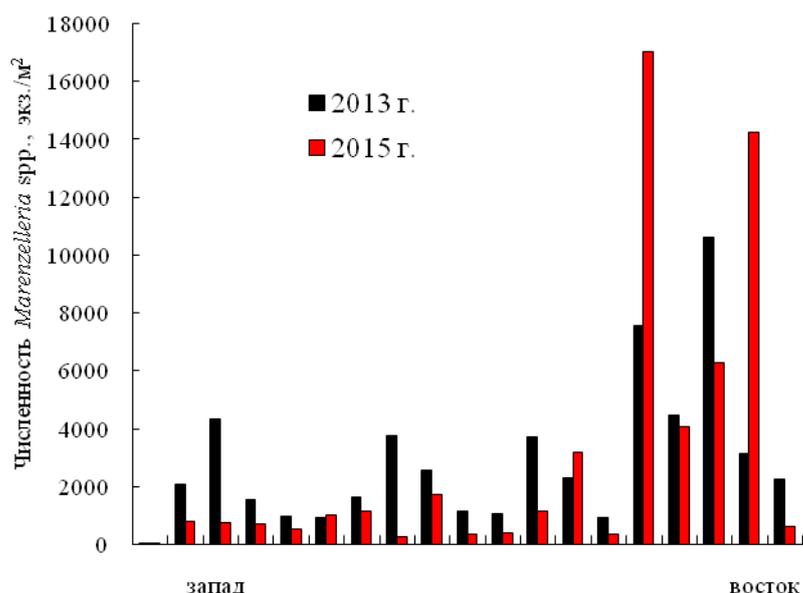


Рис. 5. Численность полихет *Marenzelleria* spp. на станциях восточной части Финского залива в 2013 и 2015 гг.

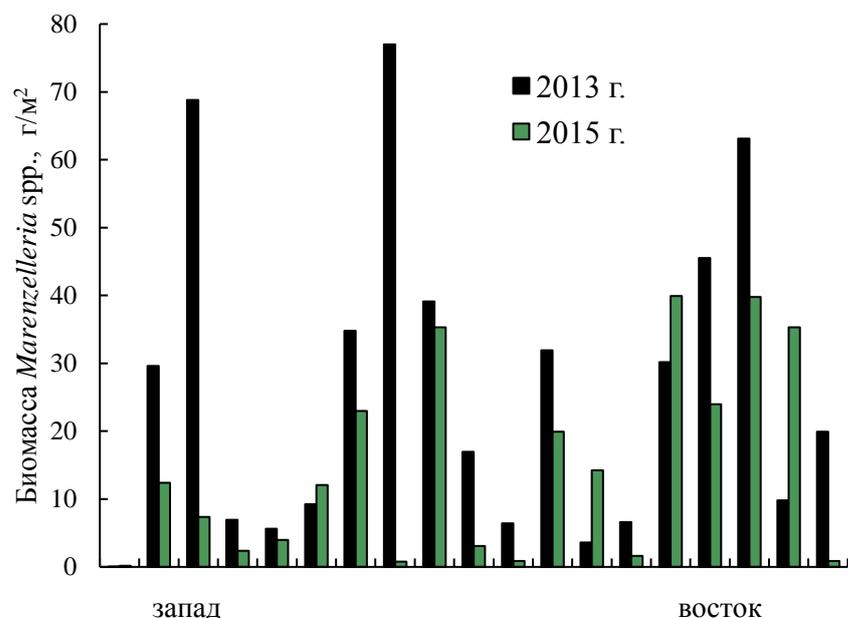


Рис. 6. Биомасса полихет *Marenzelleria* spp. на станциях восточной части Финского залива в 2013 и 2015 гг.

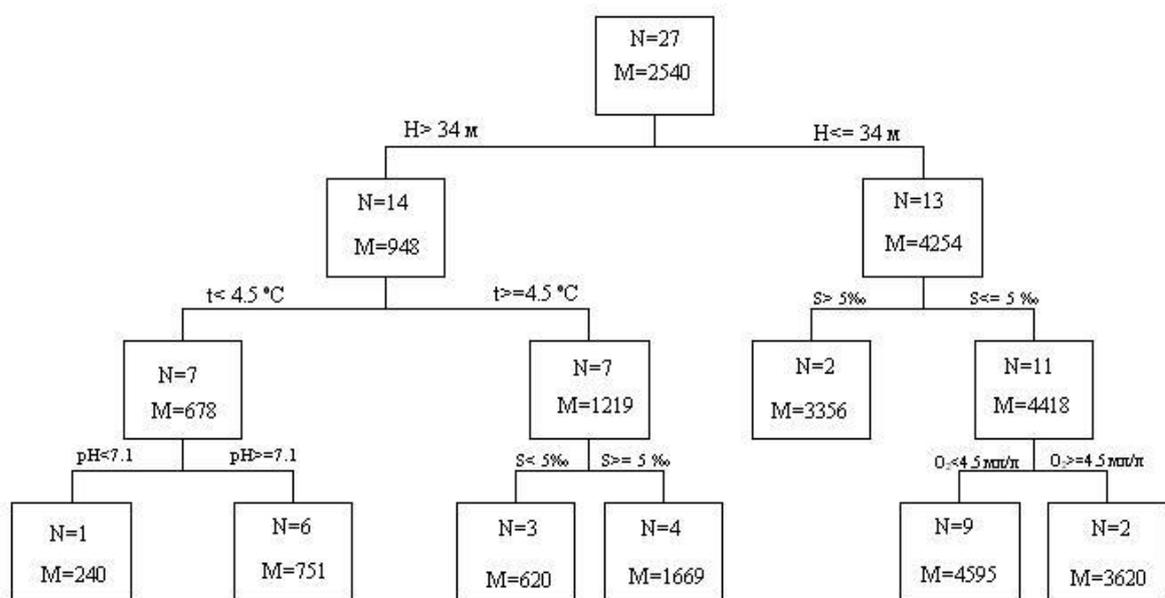


Рис. 7. Модель дерева регрессии, показывающая взаимосвязь численности полихет *Marenzelleria* spp. и физико-химических характеристик придонных вод восточной части Финского залива по данным 2013 и 2015 гг. N – количество наблюдений, M – среднее значение численности полихет, экз/м<sup>2</sup>, H – глубина, м, t и S – температура и соленость воды в придонном слое

**Глава три** посвящена оценке влияния *Marenzelleria* spp. на геохимические изменения в донных отложениях на основе данных натуральных наблюдений и результатов моделирования.

**В разделе 3.1** рассмотрена пространственно-временная изменчивость физико-химических характеристик придонных вод и донных отложений Финского залива по данным натуральных наблюдений.

Пробы были отобраны в ходе морских научно-исследовательских экспедиций в сентябре 2013 г. и июле-августе 2015 г. в восточной части Финского залива.

Кислородные условия в Финском заливе в наблюдаемые периоды были благоприятными: содержание  $O_2$  в придонном слое не опускалось ниже 2 мл/л (за исключением станции 20F, на которой в 2013 году оно составило 1.16 мл/л). Тем не менее в 2015 г. ситуация на станции 20F резко изменилась: содержание кислорода в придонном слое выросло почти в 4 раза, до 4.6 мл/л. Улучшение кислородных условий в 2015 г. наблюдалось практически на всех исследуемых станциях, в среднем рост концентрации  $O_2$  составил 40 % по сравнению с 2013 годом.

Улучшение кислородного режима в придонных водах привело к увеличению захоронения фосфора в донных отложениях, вследствие чего его концентрация около дна снизилась в среднем на четверть, за исключением станции 4F. Расположенная во внутренней мелководной части залива, станция является местом аккумуляции вещества, приносимого стоком р. Невы.

В распределении концентраций неорганического азота (нитратов+нитритов) наблюдается следующая тенденция: снижение концентрации в 2015 г. на западных станциях (20F, 17F, 2L, 10F) и рост концентрации на восточных станциях (2UGMS, 6F и 4F).

Для оценки влияния полихет *Marenzelleria* spp. на геохимические изменения в донных отложениях станции были разделены на 2 группы: с высокой и низкой численностью вида-вселенца. Для каждой из групп были рассчитаны средние значения концентраций исследуемых соединений по профилю (только для 2013 г. ввиду практически одинаковой максимальной глубины образцов). В 2015 г. толщина слоев донных отложений и максимальная глубина отбора проб весьма сильно варьировали, в связи с чем сравнение результатов расчета средних по профилю концентраций веществ в двух группах не могут являться приемлемыми.

Согласно проведенным расчетам для 2013 г., на станциях с более высокой численностью полихет *Marenzelleria* spp. (4-х кратным превосходством) были получены в 1.5 раза более низкие средние концентрации фосфатов, в 1.6 раза нитратов, в 1.7 аммония в поровой воде. Кроме этого зафиксировано снижение содержания органического углерода (в 1.4 раза) и валового содержания марганца (в 1.5 раза) в твердой фазе донных отложений. Различные условия численности полихет не повлияли значительно на концентрацию сульфатов в поровой воде и содержание железа в твердой фазе донных отложений, которые практически одинаковы для двух групп станций.

Снижение концентрации фосфатов в поровой воде в условиях более высокой численности вида-вселенца свидетельствует, по всей видимости, о более интенсивном захоронении P в донных отложениях. Снижение концентраций нитратов и аммония в поровых водах может наблюдаться вследствие их захоронения в твердой фазе или выхода в придонную воду. Биотурбация донных отложений полихетами приводит к улучшению кислородных условий в верхнем слое донных отложений и способствует более интенсивному окислению органического вещества ( $C_{орг}$ ), поэтому на станциях с более высокой численностью *Marenzelleria* spp. содержание  $C_{орг}$  ниже, чем на станциях с более низкой численностью популяции (более подробно о влиянии полихет на содержание веществ в твердой фазе донных отложений см. раздел 3.2).

Отметим, что настоящие исследования проведены для небольшой выборки из 4 станций, для большей достоверности результатов необходимо иметь результаты исследований с большего количества станций.

Межгодовая изменчивость концентрации различных веществ в поровой воде и твердой фазе донных отложений была достаточно разнообразной. В целом можно выделить следующие изменения, наблюдаемые в содержании веществ. Диапазон максимальной и минимальной концентрации фосфатов в поровой воде составлял 0.005-0.028 ммоль/л в 2015 г. и 0.11-0.45 ммоль/л в 2013 г., т.е. за 2 года произошло ее значительное (более чем на порядок) снижение. Это снижение концентрации

фосфатов связано, по всей видимости, с улучшением кислородных условий в бентосном слое в результате активной жизнедеятельности вида-вселенца *Marenzelleria* spp. Учитывая наблюдаемое снижение концентрации фосфатов в придонной воде, снижение концентрации фосфатов в поровой воде свидетельствует об их захоронении в твердой фракции донных отложений.

Улучшению кислородного режима бентосного слоя могло способствовать и снижение концентрации органического углерода в донных отложениях: концентрация  $C_{\text{орг}}$  в 2015 г. в среднем почти в 2 раза меньше, чем в 2013 г. Однако эти изменения  $C_{\text{орг}}$  могут быть также связаны с разными периодами отбора проб (конец июля – начало августа в 2013 г. и сентябрь в 2015 г.), характеризующимися разными скоростями седиментогенеза.

В рассматриваемый период несколько возросло валовое содержание железа в твердой фазе донных отложений (диапазон максимального и минимального содержания составляла 3.98-5.5 % в 2013 г. и 4.23-6.67 % в 2015 г.), что также связано с ростом концентрации кислорода в бентосном слое. Кроме этого, рост рН в придонном слое мог способствовать более интенсивному формированию гидроксидов железа в донных отложениях [Millero et al., 1987].

В 2015 году наблюдались 2 локальных максимума концентрации нитратов в верхнем горизонте донных отложений: 3.79 ммоль/л и 3.07 ммоль/л для станций 2F и 2UGMS, соответственно. По всей видимости, эти пики указывают на интенсивное окисление аммония в этой зоне. На нижележащих горизонтах наблюдаемая концентрация нитратов оказалась на порядок меньше.

**В разделе 3.2** проводится оценка влияния *Marenzelleria* spp. на содержание веществ в твердой фазе донных отложений.

Макробентосные организмы способны повышать скорость минерализации органического вещества за счет его механического расщепления и окисления проникающим в донные отложения кислородом; кроме этого, в результате турбации отложений происходит интенсификация бактериальных колонизаций, что также приводит к снижению захоронения органического вещества.

В процессе перемешивания происходит также перемещение окисленных соединений вглубь донных отложений и восходящий транспорт восстановленных. Данный процесс приводит к увеличению средней глубины минерализации органического вещества [Herman et al., 1999].

Оксиды железа и марганца являются двумя твердыми окислителями органического вещества, которые ведут себя схожим образом в процессе биотурбации [Ferro et al., 2003]. Ирригация донных отложений бентосными организмами способствует удалению растворенных  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  из поровой воды в результате их окисления и осаждения в форме гидроксидов (оксидов)  $\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MnO}_2$ .

В разделе приводятся результаты исследования влияния жизнедеятельности полихет на распределение различных химических характеристик в донных отложениях, полученные с использованием статистического анализа данных натуральных наблюдений о содержании органического углерода, валовом содержании железа и марганца в твердой фазе донных отложений, а также численности полихет *Marenzelleria* spp.

Для проведения исследований станции внутри каждого года были разбиты на 2 группы: с высокой и низкой численностью полихет.

Для каждой из групп были рассчитаны средние значения содержания органического углерода, валового содержания железа и марганца (таблица 1). Значимость различий средних значений по двум выборкам определялось с помощью t-критерия Стьюдента при уровне значимости  $\alpha=0.05$ .

Таблица 1

Средние значения ( $\pm$  стандартное отклонение)  $C_{\text{орг}}$ ,  $\Sigma\text{Fe}$  и  $\Sigma\text{Mn}$  твердой фазы донных отложений на станциях с высокой и низкой численностью полихет *Marenzelleria* spp.

Значимые различия между характеристиками обозначены \*

Характеристика	2013 г.		2015 г.	
	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая
$C_{\text{орг}}$ , %	4.12 $\pm$ 0.42*	5.82 $\pm$ 0.60*	1.78 $\pm$ 0.54*	3.14 $\pm$ 0.50*
$\Sigma\text{Fe}$ , %	4.86 $\pm$ 0.56	4.85 $\pm$ 0.25	4.99 $\pm$ 0.56	5.14 $\pm$ 0.49
$\Sigma\text{Mn}$ , %	0.14 $\pm$ 0.08	0.18 $\pm$ 0.10	0.17 $\pm$ 0.08	0.16 $\pm$ 0.07

Согласно результатам, представленным в таблице 1, заметные различия средних значений обнаружены только для содержания органического углерода, при этом в условиях высокой численности *Marenzelleria* spp. содержание  $C_{\text{орг}}$  в донных отложениях в среднем в 1.5 раза ниже, что обусловлено, по всей видимости, более глубоким проникновением кислорода в толщу донных отложений за счет биотурбации и, следовательно, более интенсивным окислением углерода. Положительная корреляционная связь между скоростью минерализации органического вещества и плотностью популяции макроорганизмов также была выявлена в работах [Van der Bund et al., 2001, Karlson et al., 2005].

Использование кластерного анализа подтвердило указанную связь: станциям с низким содержанием органического вещества соответствует высокая численность полихет и, напротив, на станциях с высоким содержанием органического вещества наблюдается низкая численность полихет (рис. 8, табл. 2).

Сделан вывод, что интенсивная биотурбационная деятельность червей при их высокой численности приводит к снижению захоронения органического углерода в верхнем слое донных отложений. Существенного влияния биоирригационной активности полихет на содержание валового железа и марганца не выявлено.

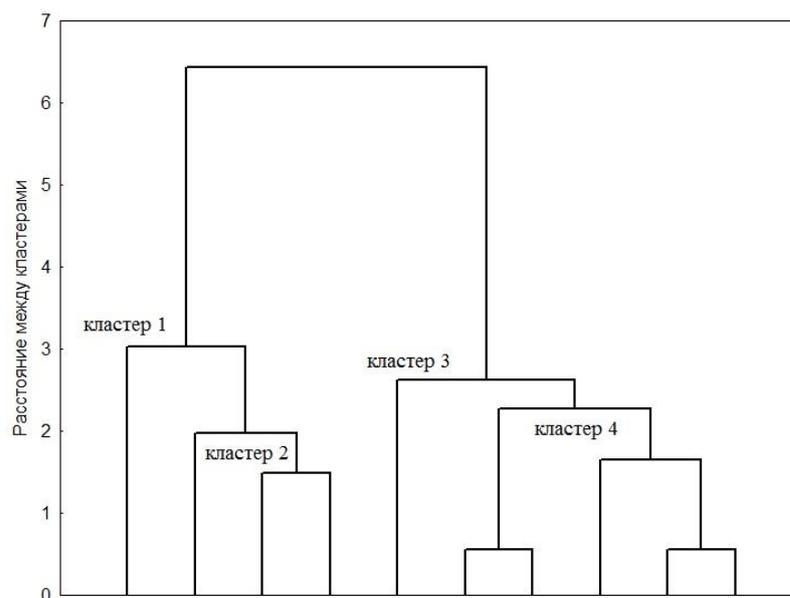


Рис. 8. Дендрограмма классификации станций по химическим характеристикам донных отложений 2013 и 2015 гг. совместно

Таблица 2

Средние значения содержания  $C_{орг}$ ,  $\Sigma Fe$  и  $\Sigma Mn$  в кластерах; численность и биомасса *Marenzelleria* spp. не учитывалась при кластеризации

Кластер	1	2	3	4
Станция(и) – год	2F–2015	2L, 17F – 2013 2L–2015	20F–2013	2UGMS, 10F, 4F – 2013, 17F, 4F – 2015
$C_{орг}$ , %	1.37	4.63	5.66	3.67
$\Sigma Fe$ , %	4.44	4.43*	5.11	5.24*
$\Sigma Mn$ , %	0.15	0.07*	0.29	0.19*
Численность <i>Marenzelleria</i> spp., экз./м <sup>2</sup>	высокая 17020	средняя 1985	низкая 240	средняя 2792
Биомасса <i>Marenzelleria</i> spp., г/м <sup>2</sup>	40.0	36.4	9.2	28.3

Значимые различия между содержанием  $C_{орг}$ ,  $\Sigma Fe$  и  $\Sigma Mn$  обозначены \* (t-критерий Стьюдента проводился только для кластеров 2 и 4, поскольку они содержат более одного элемента).

**В разделе 3.3** приводятся результаты модельных расчетов распределения биогенных соединений в поровой воде донных отложений под воздействием ирригационной активности полихет *Marenzelleria* spp.

**В разделе 3.3.1** приводится обзор современного состояния моделирования диагенеза химических веществ в морской среде, дается обзор эволюции моделей диагенеза органического вещества с момента появления прототипа модели, в настоящее время известной как G-модель [Berner, 1964].

**В разделе 3.3.2** дается описание диагенетической модели CANDI (carbon and nutrient diagenesis) [Boudreau, 1996, Волощук и др., 2015].

Модель учитывает процессы переноса (молекулярная диффузия растворенных веществ, биодиффузия твердых веществ, движение донных отложений, обусловленное захоронением, уплотнение донных отложений, ирригация), а также различные химические реакции (разложение органического вещества, окисление побочных продуктов реакций и т.д.). Включено описание как стандартных реакций окисления органического вещества, так и окислительно-восстановительных реакций побочных продуктов, происходящих в бентосном слое.

В качестве окислителей органического вещества выступают кислород, нитраты, оксид марганца, оксид железа и сульфаты.

В модели изменения концентрации твердых веществ происходят в результате биотурбации, захоронения и химических реакций; концентрации растворенных веществ – за счет молекулярной диффузии, адвекции, биоирригации и химических реакций. В общем виде уравнения модели для твердых и растворенных веществ в донных отложениях можно представить в виде

$$\frac{\partial c_{si}}{\partial t} = \frac{1}{\Phi_S} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Phi_S D_b \frac{\partial c_{si}}{\partial x} - \Phi_S w C_{si} \right) + \sum R_{si} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_{pi}}{\partial t} = \frac{1}{\Phi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Phi D_{pi} \frac{\partial c_{pi}}{\partial x} - \Phi u C_{pi} \right) + I r_{pi} + \sum R_{pi} \quad (2)$$

где  $t$  – время (год),  $x$  – вертикальная координата, направленная вниз от границы вода-донные отложения (см),  $I_{r_{pi}}$  – скорость изменения концентрации  $pi$ -ого вещества за счет биоирригации,  $\sum R_{s_{ii}}$   $\sum R_{r_{ii}}$  – суммарная скорость изменения концентрации  $si$ -ого твердого вещества и  $pi$ -ого растворенного вещества, соответственно;  $D_b$  – коэффициент биотурбации (см<sup>2</sup>/год);  $D_{pi}'$  – коэффициент эффективной диффузии  $pi$ -ого вещества (коэффициент молекулярной диффузии с учетом извилистости).

Предполагается, что биоирригация растворенных веществ  $I_{r_{pi}}$  пропорциональна (с коэффициентом  $\alpha$ ) разности концентрации  $C_{pio}$  вещества на поверхности раздела вода-донные отложения и его концентрации  $C_{pix}$  в поровой воде на горизонте  $x$ , т.е.

$$I_{r_{pi}} = \alpha(C_{pio} - C_{pix}) \quad (3)$$

Интенсивность процесса биоирригации определяется сомножителем  $\alpha$ , называемым коэффициентом биоирригации. Этот коэффициент зависит от геометрических параметров нор бентосных организмов (радиуса вырытых нор и частоте их встречаемости в донных отложениях, то есть плотности популяции).

Для оценки влияния размера и количества таких пор на процесс биоирригации в модели используется радиально-диффузионная подмодель Аллера [Aller, 2001, Sandnes et al., 2000]. В ней зона биоирригации донных отложений представлена набором идентичных вертикальных, постоянно заливаемых водой, полых цилиндров (рис. 9), равномерно распределенных в порах донных отложений.

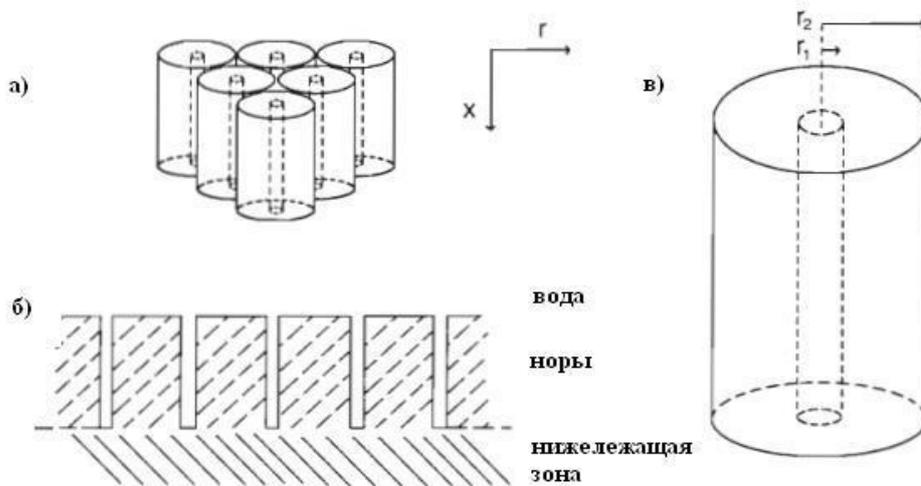


Рис. 9. Геометрия модели биоирригации донных отложений Аллера: а) идеализированная зона биоирригации в донных отложениях; б) вертикальный разрез донных отложений; в) единственный полый цилиндр, представляющий собой «микросреду» внутри донных отложений,  $r_1$  – радиус норы,  $r_2$  – радиус цилиндра (расстояние между двумя соседними цилиндрами) [Aller, 1980c]

Коэффициент биоирригации  $\alpha$  (год<sup>-1</sup>) рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \gamma D_s, \quad (4)$$

где  $D_s$  – коэффициент молекулярной диффузии (см<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>);  $\gamma$  – эмпирически полученный параметр, называемый фактором биоирригации (см<sup>-2</sup>).

Фактор  $\gamma$  есть функция численности популяции  $N$  (экз./см<sup>2</sup>) бентосных животных и радиуса  $r$  вырытых ими нор [Norkko et al., 2012]:

$$\gamma = \frac{r}{\left(\frac{1}{\pi N} - r^2\right)\left(\frac{1}{2\sqrt{\pi N}} - \frac{3r}{2}\right)} \quad (5)$$

Для популяции полихет *Marenzelleria* spp. было получено, что при численности популяции  $N = 2550$  экз./м<sup>2</sup> фактор биоирригации  $\gamma = 0.53$  см<sup>2</sup> [Norikko, Reed et al., 2012]. При таких значениях  $N$  и  $\gamma$ , из формулы (5) следует, что  $r = 1.8 \cdot 10^{-3}$  м.

*Граничные условия модели.* На верхней границе ( $x = 0$ ) бентосного слоя задаются концентрации твердого органического вещества (детрита),  $Mn^{4+}$  тв.,  $Fe^{3+}$  тв., а также концентрации растворенных  $O_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $\Sigma PO_4^{3-}$ ,  $\Sigma NH_4^+$ ,  $\Sigma H_2S$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $\Sigma CO_2$ ,  $CH_4$ . На нижней границе ( $x = L$ ) для концентраций всех веществ задается условие отсутствия потока:

$$\frac{\partial C_{si}}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_{pi}}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

**В разделе 3.3.3** приведены результаты верификации модели по данным натурных наблюдений в восточной части Финского залива. Показано, что результаты модельных расчетов не противоречат имеющимся данным наблюдений.

**В разделе 3.3.4** проведены эксперименты по чувствительности модели. Выявлено, что CANDI чувствительна к изменению пористости донных отложений и содержанию органического вещества на границе раздела вода-донные отложения.

**В разделе 3.3.5** в рамках модели CANDI рассчитаны профили содержания биогенных соединений в поровой воде донных отложений при различной численности полихет. Цель выполненных численных экспериментов – оценить влияние биоирригационной активности *Marenzelleria* spp. на геохимические изменения в донных отложениях в течение некоторого заданного периода (5 лет).

Для условий станции 2UGMS было выполнено 2 эксперимента. Первый эксперимент: предполагается, что полихеты присутствуют в донных отложениях, их численность стабилизировалась на уровне 1000 экз./м<sup>2</sup> и остается постоянной на протяжении 5 лет, тогда коэффициент  $\alpha = 33$  год<sup>-1</sup>. Второй эксперимент: предположим, что полихеты отсутствуют. Оказалось, что более всего чувствительны к изменению  $\alpha$  фосфаты и нитраты (рис. 10).

Согласно модельным оценкам, присутствие полихет в донных отложениях в численности 1000 экз./м<sup>2</sup> на протяжении 5 лет может привести к снижению средней концентрации фосфатов в 2.9 раза и росту средней концентрации нитратов в 1.7 раза в слое 0-10 см.

Кроме этого, на модели были проведены эксперименты по данным экспедиционных результатов о численности полихет. Так, было выбрано 2 станции, с высокой (ст. 2UGMS, 3912 экз./м<sup>2</sup>) и низкой (ст. 17F, 1328 экз./м<sup>2</sup>) численностью *Marenzelleria* spp., для которых на модели получены установившиеся через 5 лет счета профили концентрации биогенных соединений в поровой воде донных отложений для станций (рис. 11).

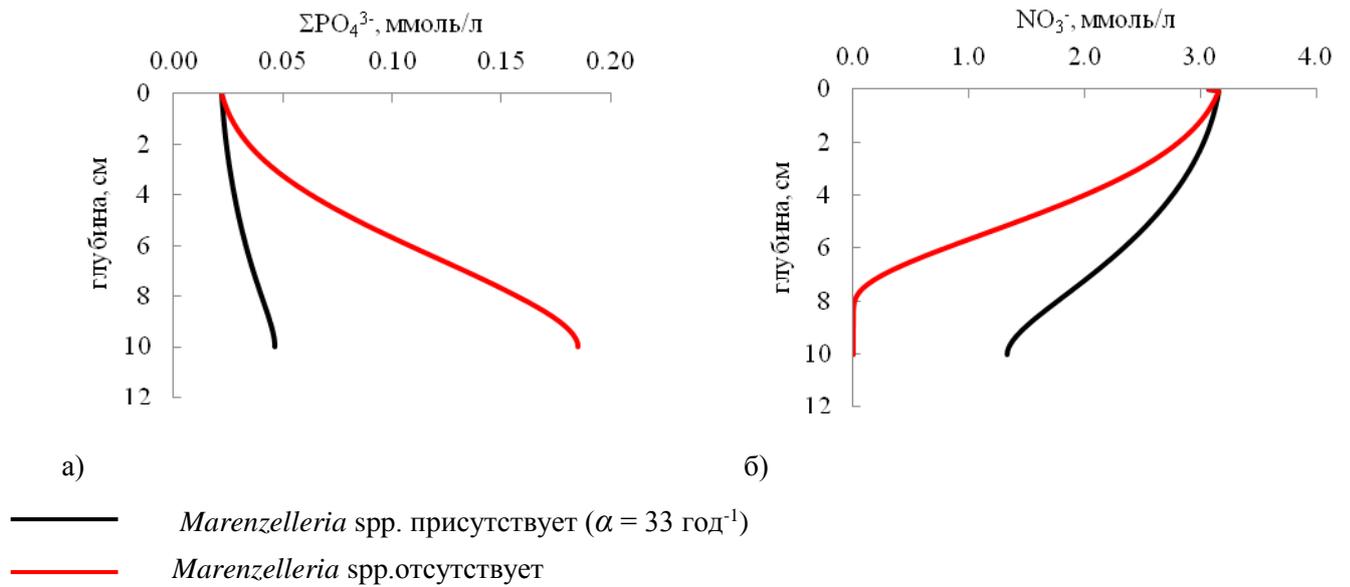


Рис. 10. Профили концентрации фосфатов (а) и нитратов (б) на станции 2UGMS при отсутствии и наличии биоирригации

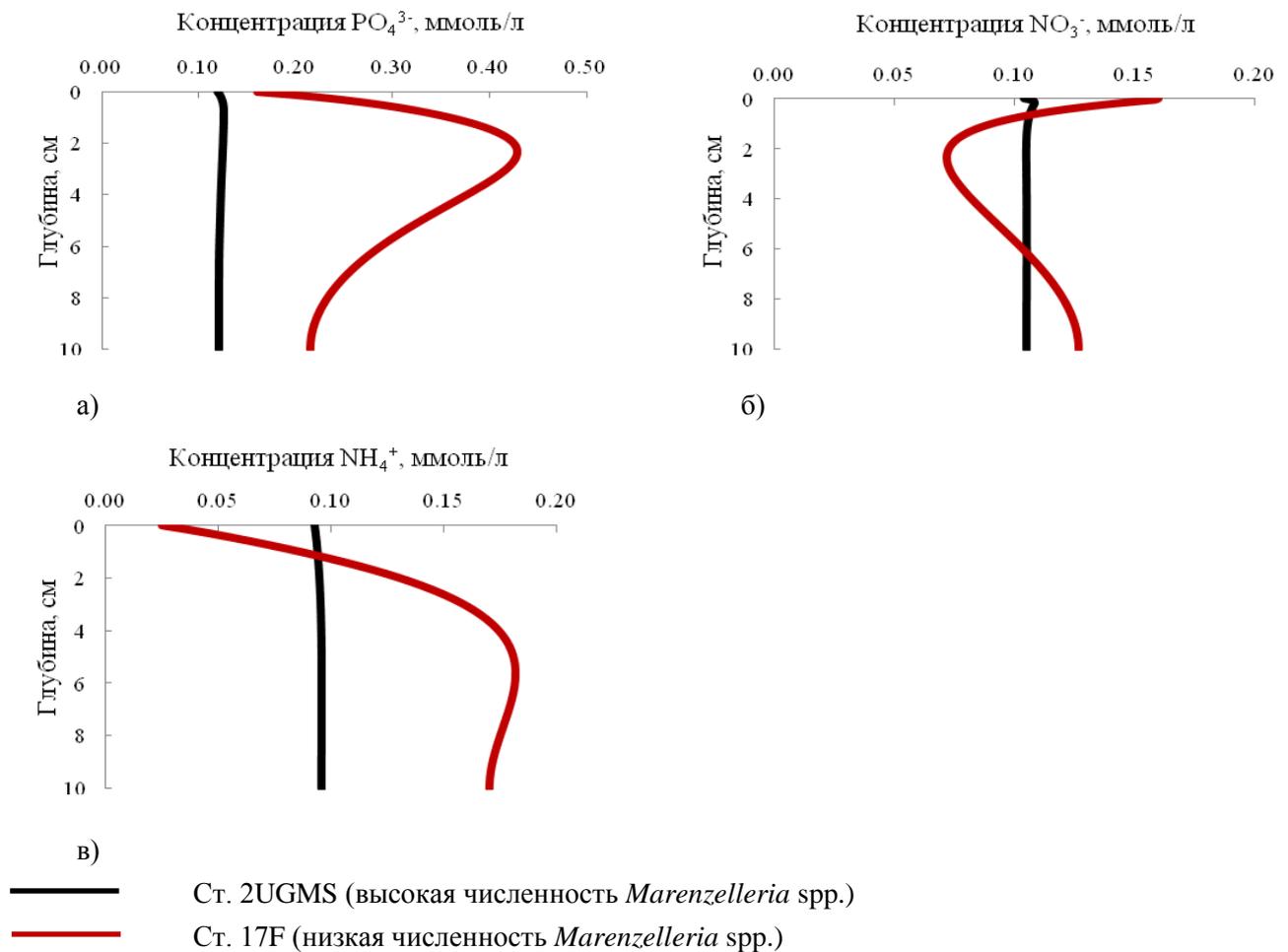


Рис. 11. Модельные вертикальные профили распределения фосфатов (а), нитратов (б) и аммония (в) в поровой воде, рассчитанные для станций с высокой и низкой численностью *Marenzelleria* spp.

По результатам моделирования (рис. 11) для исследуемых станций рассчитаны запасы веществ в поровой воде донных отложений. Через 5 лет в верхнем 10-см слое донных отложений для станции 17F получены более высокие запасы фосфатов (в 2.6 раза) и аммония (в 1.6 раза), чем для станции 2UGMS. Вместе с тем, запасы нитратов на обеих станциях оказались практически одинаковыми.

**Четвертая глава** посвящена моделированию будущего экологического состояния Финского залива в условиях изменения климата и с учетом воздействия полихет *Marenzelleria* spp.

Оценки биоирригационной активности вида-вселенца, выполненные по модели CANDI с использованием данных натуральных наблюдений, показывают, что вселение полихет *Marenzelleria* spp. оказало значительное влияние на межгодовые изменения биогеохимических условий в бентосном слое восточной части Финского залива. Этот фактор не учитывался ранее в расчетах изменений эвтрофикации в настоящем и будущем климате [Meier et al., 2011, Ryabchenko et al., 2016, Ерёмина и др., 2014]. Для оценки воздействия вида-вселенца на эволюцию экосистемы залива в будущем климате в настоящей работе используется 3-х мерная эко-гидродинамическая модель эвтрофикации Балтийского моря SPBEM. Прямое включение модели CANDI с учетом эффектов вида-вселенца в SPBEM осложняется многокомпонентностью модели CANDI, включающей существенно большее число переменных (химических соединений), чем имеется в модели SPBEM. Поэтому здесь применяется альтернативный, более простой подход: в подмодель бентосного слоя, входящую в состав модели SPBEM, вводится параметризация, учитывающая биоирригацию *Marenzelleria* spp.

**В разделе 4.1** дается краткое описание модели эвтрофирования SPBEM и модификация подмодели бентосного слоя для учета влияния биоирригационной активности вида-вселенца.

SPBEM представляет собой совместную трехмерную эко-гидродинамическую модель, состоящую из подмоделей гидротермодинамики [Неелов, 1982, Neelov et al., 2003, Myrberg et al., 2010] и биогеохимических циклов [Savchuk, 2002].

Модель включает следующие основные переменные (в пелагиали): 3 вида фитопланктона, зоопланктон, детрит в азотных и фосфорных единицах, аммоний, нитраты+нитриты, фосфаты и растворенный кислород. Моделируемые потоки: первичная продукция фитопланктона и расходование биогенных веществ, азотфиксация, поедание пищи зоопланктоном и его экскреция, вымирание фитопланктона и седиментация, минерализация органического вещества в водной толще и донных отложениях, денитрификация и захоронение, фотосинтетическая аэрация, потребление кислорода. Суммарные количества биологически доступных фракций всех форм азота, фосфора и кремния в верхнем, «активном» слое донных осадков рассматриваются как 3 основные переменные модели бентали.

Горизонтальное разрешение современной версии модели SPBEM составляет 9.3 км, вертикальное разрешение – 2 м в верхнем 100-метровом слое моря и 5 м в нижележащих слоях.

В модели эвтрофикации Балтийского моря запасы фосфора в бентосном слое увеличиваются из-за оседания автотрофов и детрита под воздействием силы тяжести, а расходуются при минерализации органического вещества. Уменьшение запасов азота и фосфора в донных отложениях зависит от окислительно-восстановительных условий. Минерализованный фосфор частично удерживается в донных отложениях, а оставшаяся часть поступает в придонный слой воды в виде фосфатов. Минерализованный азот частично возвращается в виде аммонийного окисленного минерального азота в воду, а оставшаяся часть выводится из системы в результате денитрификации.

Влияние полихет *Marenzelleria* spp. на процессы в бентосном слое сводится к изменению пористости донных отложений в результате их жизнедеятельности. Это, в свою очередь, приводит к увеличению глубины проникновения кислорода в донные отложения. Следствием этих процессов

является уменьшение выхода в воду фосфора (в виде фосфатов) и увеличение захоронения фосфора при связывании последнего с железом, а также увеличение выхода в воду азота в виде нитритов и нитратов и уменьшение денитрификации. В связи с этим учет влияния вида вселенца в модели SPBEM выражается в изменении параметризаций, отвечающих за перераспределение минерализованных форм азота и фосфора в донных отложениях. Влияние вселенца *Marenzelleria* spp. может быть представлено дополнительным безразмерным слагаемым  $\delta_{ir}$  в формулах расчета коэффициентов удержания азота  $p_N$  и фосфора  $p_P$ .

$\delta_{ir}$  представляет собой произведение двух множителей, отвечающих за увеличение площади окисленного слоя и глубины проникновения кислорода в результате биотурбации полихет [Isaev et al., 2016].

**В разделе 4.2** описаны условия проведения модельных расчетов.

Модельные расчеты проводились с 2007 по 2040 гг. Атмосферные метеорологические воздействия задавались на основе расчетов, выполненных по модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) Центра Россби (RCAO) [Döscher et al., 2002] для Балтийского региона. В качестве граничных условий в таких расчетах используются результаты сценарных расчетов глобального изменения климата по различным глобальным МОЦАО. Данные о распределении полихет *Marenzelleria* spp. в Балтийском море были взяты из базы данных Стокгольмского университета [Marina ...], в восточной части Финского залива численность вида задавалась по данным натурных наблюдений, полученным в ходе экспедиций РГГМУ в 2008-2013 гг. [Максимов и др., 2014; Ерёмина и др., 2016].

Для изучения возможных последствий вселения *Marenzelleria* spp. для экосистемы Финского залива в условиях изменяющегося климата, было проведено 4 численных эксперимента: без учета влияния полихет *Marenzelleria* spp. (сценарий C1) и с их учетом (сценарий C2) по двум сценариям глобального изменения климата: согласно модели ECHAM5 Института Метеорологии им. Макса Планка, Гамбург, Германия [Roeckner et al., 2006, Jungclaus et al., 2006] (EC) и согласно модели HadCM3 Центра Хэдли в Великобритании [Gordon et al., 2000] (Had). В обоих сценарных расчетах климата использовался сценарий выброса парниковых газов A1B, предполагающий быстрый экономический и популяционный рост, внедрение новых эффективных технологий. Для краткости указанные выше сценарии обозначены как C1\_EC, C2\_EC и C1\_Had, C2\_Had. Во всех модельных расчетах используется некоторый опорный сценарий изменения будущих биогенных нагрузок, основанный на оценках современных атмосферных выпадений и концентрации биогенных элементов в реках.

**В разделе 4.3** проводится анализ эволюции экосистемы Финского залива в будущем климате с учетом воздействия полихет *Marenzelleria* spp. по результатам моделирования.

Рассмотрено изменение одного из индикаторов эвтрофикации – вредоносных цианобактерий. Факторами, контролирующими развитие этих фиксирующих атмосферный азот водорослей, являются температура и концентрация фосфора в воде. Согласно результатам моделирования, до 2040 г. температура воды фотического слоя в Финском заливе по обоим климатическим сценариям будет возрастать. Средние значения этой температуры за период 2007-2040 гг. по сценарию C1\_Had оказались несколько выше, чем по сценарию C1\_EC: 13.34 °C против 12.97 °C.

Согласно расчетам, рассматриваемый период характеризуется некоторым снижением летней биомассы цианобактерий в Финском заливе даже в «чисто климатических» сценариях C1\_EC и C1\_Had, что более ярко выражено в сценарии C1\_EC (рис. 12). В центральной части Балтийского моря подобных трендов не отмечается. Основная причина снижения биомассы цианобактерий

связана с ослаблением вертикальной плотностной стратификации в заливе (в Центральной Балтике она усиливается) за счет изменений солености (см. [Ryabchenko, Isaev, 2016]). Усиление речного стока Невы в будущем приводит к уменьшению солености, которое благодаря сильному ветровому перемешиванию в осенне-зимний период распространяется на всю водную колонку в восточной части залива. Эти изменения солености в нижнем слое оказываются больше, чем в верхнем слое, что и вызывает ослабление стратификации. В свою очередь, ослабление стратификации приводит к росту концентрации растворенного кислорода в придонном слое, что сдерживает выделение фосфатов из донных отложений, уменьшает их концентрацию в водной колонке и снижает летнюю биомассу цианобактерий. Эффект фосфатов превалирует над эффектом температуры, рост которой вызывает более раннее начало цветения цианобактерий.

Отметим, что значения биомассы цианобактерий в реперном расчете с моделью ECHAM5 (сценарий C1\_EC) оказались примерно в 3 раза меньше, чем при использовании модели HadCM3 (сценарий C1\_Had) (Таблица 3). Это различие обусловлено, по-видимому, двумя причинами: во-первых, из-за более высоких летних температур продолжительность периода цветения цианобактерий в сценарии C1\_Had больше, чем в сценарии C1\_EC, во-вторых, согласно расчетам, среднее за весь рассматриваемый период зимнее отношение N:P в воде составляет 4.4 и 3.2 соответственно в сценариях в C1\_EC и C1\_Had. Другими словами, экосистема заметно сильнее лимитирована по азоту в сценарии C1\_Had. Это означает, что после окончания цветения летних видов водорослей, в воде остается больше неорганического фосфора, что и приводит к большим значениям биомассы цианобактерий в сценарии C1\_Had.

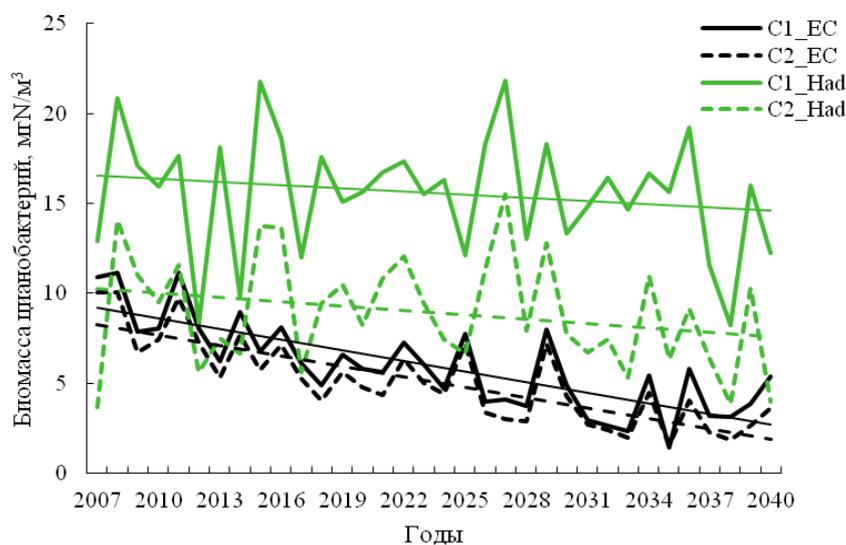


Рис. 12. Среднегодовые прогностические оценки изменений биомассы цианобактерий в Финском заливе при различных сценариях и линейные тренды этих изменений

Учет в модели ирригационной деятельности *Marezzelleria* spp. (сценарии C2\_EC и C2\_Had) приводит к уменьшению летней биомассы цианобактерий (рис. 12, Таблица 3). Этот эффект сильнее выражен в сценарии C2\_Had (уменьшение в среднем на 43%), чем в сценарии C2\_EC (уменьшение на 15%). Интересно, что запасы биогенных веществ в донных отложениях (рис.13, Таблица 3) реагируют на деятельность *Marezzelleria* spp. противоположным образом: запасы фосфора увеличиваются в сценарии C2\_EC на 5.6%, а в сценарии C2\_Had – только на 1.75%. Таким образом,

модельная реакция экосистемы на учет эффектов *Marenzelleria* spp. оказалась сильнее в более теплом климате (сценарии с моделью HadCM3). Это утверждение подкрепляется расчетами изменения отношения N:P в воде: его увеличение в сценарии C2\_EC (по сравнению C1\_EC) составляет 0.2, тогда как в сценарии C2\_Had (по сравнению C1\_Had) оно равно 0.4. Другими словами, учет эффектов *Marenzelleria* spp. в сценарии с моделью HadCM3 приводит к большему усилению фосфорной лимитации.

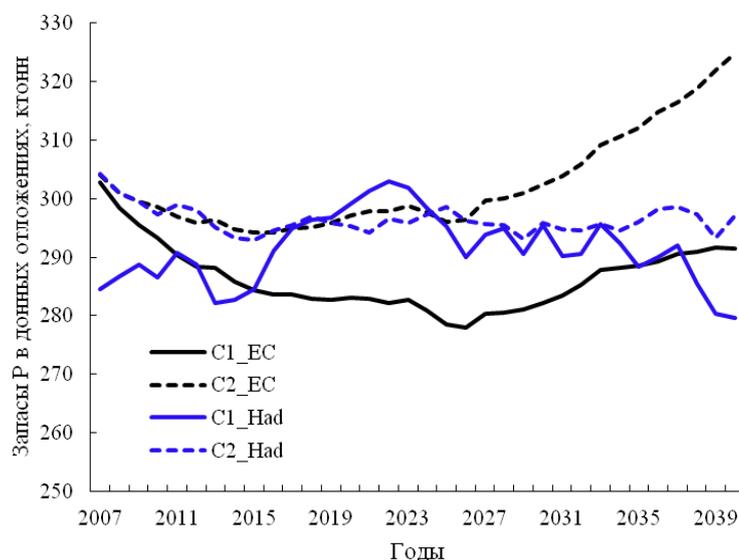


Рис. 13. Среднегодовые прогностические оценки запасов фосфора в донных отложениях Финского залива при различных сценариях

Таблица 3

Осредненные за 2007-2040 гг. модельные оценки характеристик среды. В скобках указаны изменения характеристик относительно сценария C1.

Параметр/Сценарий	C1_EC	C2_EC	C1_Had	C2_Had
Биомасса цианобактерий, мг N/м <sup>3</sup>	5.97	5.08 (-14.9 %)	15.58	8.91 (-42.8 %)
Запасы P в донных отложениях, ктонн	286	302 (+5.6 %)	291.3	296.4 (+1.75 %)

Таким образом, деятельность вида вселенца *Marenzelleria* spp. может способствовать улучшению состояния экосистемы Финского залива, т.е. замедлить или снизить интенсивность процесса эвтрофирования.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Финский залив является одним из самых эвтрофированных заливов Балтийского моря. Помимо антропогенного воздействия, заметную роль в ухудшении его экологического состояния играют природные климатические факторы. Результаты статистического анализа позволили сделать вывод о том, что гипоксические явления в восточной части Финского залива в 1990-х и 2000-х гг. обусловлены крупномасштабными изменениями атмосферных процессов, охватывающих весь Северо-Атлантический сектор. В частности, выявлена статистически значимая корреляционная связь (коэффициент корреляции Спирмена = 0.86 при уровне значимости  $\alpha=0.01$ ) между зимними

значениями индекса *NAO* и содержанием кислорода в глубинных слоях Финского залива в летний период.

2. Анализ данных натуральных наблюдений о содержании биогенных соединений в придонной воде и донных отложениях Финского залива свидетельствуют о влиянии биотурбационной и биоирригационной деятельности вида-вселенца *Marenzelleria* spp. на геохимические процессы в грунтах. Согласно проведенным расчетам, для группы станций с более высокой численностью полихет *Marenzelleria* spp. (4-х кратным превосходством) и более высокой биомассой (в 1.6 раза) были получены в 1.5 раза более низкие средние концентрации фосфатов, в 1.6 раза нитратов, в 1.7 аммония в поровой воде. Снижение концентрации фосфатов в поровой воде в условиях более высокой численности вида-вселенца свидетельствует, по всей видимости, о более интенсивном захоронении P в донных отложениях. Снижение концентраций нитратов и аммония в поровых водах может наблюдаться вследствие их захоронения в твердой фазе и/или выхода в придонную воду.

3. Согласно модельным оценкам (модель CANDI) через 5 лет в верхнем 10-см слое донных отложений для станции с высокой численностью полихет *Marenzelleria* spp. (3912 экз./м<sup>2</sup>) получены более низкие запасы фосфатов (в 2.6 раза) и аммония (в 1.6 раза), чем для станции с низкой (1328 экз./м<sup>2</sup>) численностью полихет. Вместе с тем, запасы нитратов на обеих станциях оказались практически одинаковыми.

4. Деятельности вида-вселенца *Marenzelleria* spp. может способствовать улучшению состояния экосистемы Финского залива в ближайшие три десятилетия за счет улучшения кислородных условий у дна. Согласно модельным результатам SPBEM, учет ирригационной активности полихет может привести к снижению летней биомассы цианобактерий в фотическом слое воды (от 14.9 до 42.8 %) и увеличению запасов фосфора в донных отложениях (от 1.75 до 5.6 %). Эти изменения могут способствовать замедлению или снижению интенсивности процесса эвтрофирования.