

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Российский государственный гидрометеорологический университет»

На правах рукописи



УДК 551.464.38+551.465.8+574.5(26)

Исаев Алексей Владимирович

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ  
ИЗМЕНЧИВОСТИ АБИОТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭКОСИСТЕМЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА НА  
ОСНОВЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

16 ДЕК 2010

Санкт-Петербург  
2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

**Научные руководители:**

доктор физико-математических наук, профессор

*Карлин Лев Николаевич*

доктор физико-математических наук

*Рябченко Владимир Алексеевич*

**Официальные оппоненты:**

доктор географических наук, профессор

*Дмитриев Василий Васильевич*

Санкт-Петербургский Государственный Университет

доктор геолого-минералогических наук

*Рыбалко Александр Евменьевич*

ФГУНПП «Севморгео»

**Ведущая организация**

*Федеральное государственное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова»*

Защита состоится «16» декабря 2010 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, д. 98

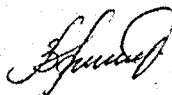
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «15» ноября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат географических наук



Воробьев В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Проблема эвтрофирования вод Балтийского моря и его отдельных районов является международно-признанной. Принципиальным вопросом данной проблемы остается вклад отдельных стран региона в формирование антропогенной нагрузки биогенными элементами, поступающей в море. При этом разработка плана действия по Балтийскому морю, в том числе подразумевает наложение обязательств по снижению биогенной нагрузки на акваторию моря.

К числу наиболее эвтрофированных акваторий Балтийского моря относится и восточная часть Финского залива, основная доля биогенной нагрузки которой традиционно связывается с поступлением соединений азота и фосфора с водосборного бассейна реки Невы и со сточными водами Санкт-Петербурга. Исследования последних лет показывают, что, несмотря на поэтапный ввод в строй очистных сооружений Санкт-Петербурга и наблюдающегося снижения выбросов азота и фосфора, ожидаемого улучшения степени эвтрофирования восточной части Финского залива не происходит. Отсутствие однозначного отклика экосистемы восточной части залива на снижение биогенной нагрузки может являться следствием сложности процессов, протекающих в эстуарной зоне.

Одним из наиболее значимых факторов, характеризующих процесс эвтрофирования, является пространственно-временная изменчивость определяющих для данного бассейна абиотических компонентов: азот и фосфор. Для понимания отклика экосистемы данной акватории на возможные изменения внешней биогенной нагрузки недостаточно качественного описания механизмов, обеспечивающих балансы азота и фосфора, необходимы их количественные оценки.

При этом проблема количественных оценок вклада различных механизмов, в формировании баланса азота и фосфора в восточной части Финского залива, до сих пор остается не до конца изученной.

**В связи с этим целью диссертационной работы является:** количественная оценка пространственно-временной изменчивости абиотических характеристик экосистемы восточной части Финского залива и ее

реакция на снижение антропогенной нагрузки на основе данных природных наблюдений и результатов математического моделирования.

В данном исследовании рассматриваются следующие абиотические характеристики: температура воды, соленость, концентрация растворенного кислорода и концентрации биодоступных форм фосфора и азота, а также потоки, определяющие баланс азота и фосфора в водной толще (выход из донных отложений, седиментация, адвекция, азотфиксация).

**Для достижения поставленных целей предполагается решить следующие задачи:**

1. Выполнить анализ современного состояния абиотических компонентов экосистемы восточной части Финского залива в летний период на основе обобщения выполненных ранее наблюдений и данных природных наблюдений, полученных в рамках летних экспедиционных исследований РГГМУ в период с 2001 по 2010 годы.

2. Воспроизвести пространственную и сезонную динамику компонентов экосистемы Финского залива с помощью модели эвтрофикации Балтийского моря (St.Petersburg Baltic Eutrophication Model, SPBEM).

3. Проанализировать внутригодовую изменчивость составляющих баланса азота и фосфора на основе результатов математического моделирования.

4. Рассчитать составляющие годовых балансов азота и фосфора в восточной части Финского залива в целом и ее отдельных частях на основе результатов математического моделирования.

5. Оценить реакцию экосистемы восточной части Финского залива на снижение биогенной нагрузки с суши.

**Научная новизна полученных результатов:**

1. Впервые по данным природных наблюдений, полученных при проведении экспедиционных исследованиях РГГМУ, выполнены оценки площади гипоксических зон и содержание фосфора-фосфатов в летний период в восточной части Финского залива в период с 2001 по 2010 гг.

2. Впервые на основе математического моделирования получены количественные оценки составляющих балансов азота и фосфора в восточной части Финского залива и его отдельных районов и их внутригодовая изменчивость.

### **Практическая значимость работы.**

1) Количественные оценки составляющих балансов азота и фосфора в восточной части Финского залива и оценки их реакции на уменьшение биогенной нагрузки с суши могут быть использованы при планировании водоочистных мероприятий на акватории Невской губы, а также при разработке национального Плана Действий по Балтийскому Морю, нацеленного на оздоровление моря.

2. Использование результатов исследования важно при планировании и проведении экспедиционных исследований, направленных на изучение процессов эвтрофикации в восточной части Финского залива.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1) Оценка площадей гипоксических зон, а также межгодовая изменчивость содержания фосфора-фосфатов в восточной части Финского залива на основе данных наблюдений абиотических компонент экосистемы в летний период с 2001 по 2010 годы.

2. Количественная оценка годовых балансов азота и фосфора в восточной части Финского залива на основе математического моделирования.

3 Количественные оценки реакции составляющих балансов азота и фосфора на снижение биогенной нагрузки с суши.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на Международных экологических форумах «День Балтийского моря», г Санкт-Петербург (2004, 2005, 2006, 2009 годы); 5 конгрессе «Baltic Sea Science Congress», Сопот, 20 – 24 июня 2005 года; 7 конгрессе «Baltic Sea Science Congress», Таллин 17 – 21 августа 2009 года; международном симпозиуме «EU-Baltic 2008», Таллин 27-29 мая 2008года; заседании ученого совета Санкт-Петербургского отделения Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2009; Итоговой сессии ученого совета Российского Государственного Гидрометеорологического Университета, 2007.

**Личный вклад автора:** Участвовал в планировании и проведении экспедиционных исследований. Самостоятельно выполнил все расчеты по модели SPBEM, обсуждаемые в работе. Участвовал в анализе полученных результатов и написании статей.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы объемом 142 наименования. Рукопись содержит 151 страницу, включая 57 рисунков и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель и основные задачи исследования, отмечается научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** состоит из трех подразделов, в первом дается физико-географическое описание Финского залива, основные морфологические и гидрометеорологические особенности.

Во втором подразделе обсуждается проблема эвтрофирования восточной части Финского залива и рассматриваются основные процессы и факторы способствующие эвтрофированию.

Проблема выявления причин эвтрофирования Балтийского моря и определения соотношения между природными и антропогенными составляющими весьма сложна и до сих пор остается дискуссионной. Сложность ее решения обусловлена специфическими физико-географическими особенностями моря, приводящими к тому, что существенное значение во многих проявлениях эвтрофирования могут иметь чисто природные процессы и факторы (Герлах, 1985).

Так отмечается, что в многолетнем масштабе ведущей причиной эвтрофирования Балтийского моря, и Финского залива в частности, является возрастание антропогенной нагрузки биогенных элементов, в то время как изменение природных факторов определяют лишь фоновые межгодовые колебания, усиливающие или ослабляющие антропогенное воздействие.

Показано, что ключевой задачей экосистемных исследований акватории Финского залива в настоящее время является описание процесса

эвтрофирования с получением количественных оценок отдельных составляющих механизма эвтрофикации и оценка отклика экосистемы водоема на возможные изменения антропогенной нагрузки на него.

В третьем подразделе проводится анализ современного состояния экосистемного моделирования. Дан обзор существующих моделей экосистемы Балтийского моря и его отдельных районов. Рассмотрены основные подходы и результаты исследований, направленных на оценку реакции Финского залива на снижение биогенной нагрузки.

**Во второй главе** проводится анализ данных натуральных наблюдений, полученных в ходе проведения научно-исследовательских экспедиционных исследований РГГМУ в период с 2001 по 2010 годы. На основе обобщения данного массива данных получены среднееголетние поля распределения на поверхностном и придонном горизонтах температуры и солености воды, а также гидрохимических характеристик: содержание растворенного кислорода, фосфора-фосфатов и азота (нитритов+нитратов).

Рассчитаны площади гипоксических зон, а также выполнены количественные оценки содержания фосфора-фосфатов в летний период в восточной части Финского залива.

Показано, что сложившиеся в придонных слоях вод бескислородные условия в 2000-х годах отличались значительными межгодовыми изменениями площадей гипоксических зон. Области с дефицитом кислорода возникали в 2001 (398 км<sup>2</sup>), 2003 (906 км<sup>2</sup>), 2006 (302 км<sup>2</sup>) и 2010 (1760 км<sup>2</sup>) гг., в остальные годы кислородные условия на придонных горизонтах значительно улучшались, и гипоксические зоны отсутствовали (рисунок 1). Данные о многолетней динамике концентрации растворенного кислорода свидетельствуют о тенденции ухудшения кислородных условий в придонных слоях. Это подтверждается крайне низкими (менее 2 мл/л), по сравнению с 80-ми и 90-ми годами значениями концентраций кислорода на станции расположенной в глубоководном районе восточной части Финского залива, когда в течение двух десятилетий гипоксических условий не возникало.

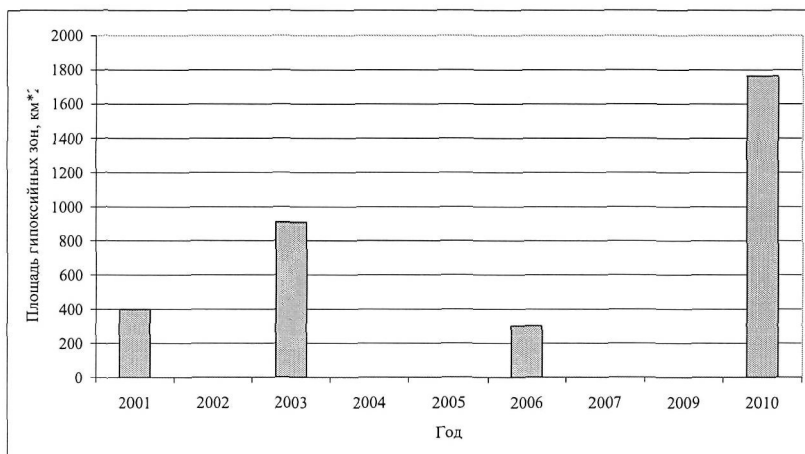


Рисунок 1 – Межгодовая изменчивость площади гипоксических зон в восточной части Финского залива

Многолетняя динамика содержания фосфатов в придонном слое на станции, расположенной в переходном районе, показывает, что наибольшее увеличение концентрации фосфатов наблюдалось в 1996 (Шпаер 1997) и 2003 годах, что связано с адвекцией соленых, обедненных кислородом и обогащенных фосфором вод. Увеличение концентрации фосфатов в 2006 и 2010 годах обусловлено ослаблением вертикального обмена и низким содержанием кислорода в придонном слое. О существенной межгодовой изменчивости содержания фосфатов в толще вод ниже слоя фотосинтеза в летний период свидетельствует расчет динамики их запасов (рисунок 2), выполненный с помощью Системы Анализа Данных (DAS). Полученные результаты показывают, что увеличение содержания минерального фосфора в основном связано с возникновением гипоксических зон, вызванных различными внешними причинами.

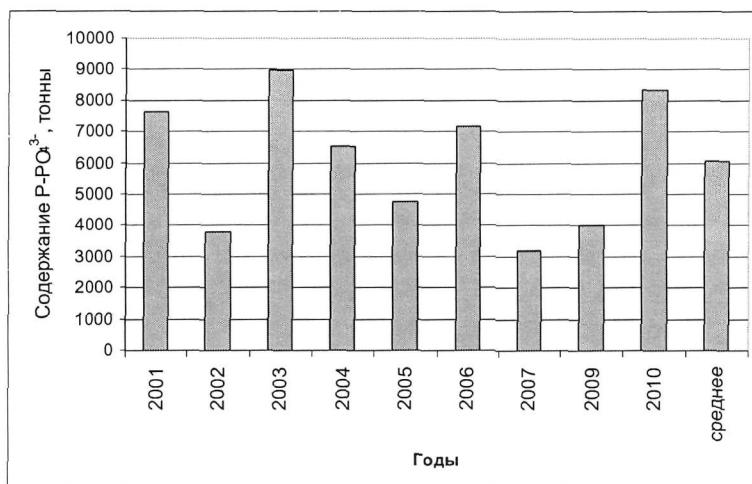


Рисунок 2 - Межгодовая изменчивость запасов фосфора (фосфатов) в толще вод под фотическим слоем в восточной части Финского залива в летний период

**Третья глава** посвящена моделированию внутригодовой изменчивости, компонентов экосистемы восточной части Финского залива, с использованием совмещенной гидродинамической и биогеохимической модели эвтрофикации Балтийского моря (St.Petersburg Baltic Eutrophication Model, SPBEM) (Neelov I.A., 2003).

Модель SPBEM состоит из подмоделей гидротермодинамики (Неелов, 1982) и биогеохимических циклов (Савчук, 1997).

Модель циркуляции моря основана на полных уравнениях гидротермодинамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики, включающих уравнение состояния морской воды в форме, предложенной ЮНЕСКО. Вертикальная турбулентность описывается с использованием *k-l* модели. Рассчитанные в гидродинамическом модуле скорости течений используются в уравнениях переноса и трансформации компонент биогеохимического модуля, описывающего биогеохимические циклы азота, фосфора в водной толще и донных осадках

Основными переменными пелагической подмодели являются биомасса

автотрофов (фитопланктона) и гетеротрофов (зоопланктона), выраженная в азотных единицах, содержание азота и фосфора в детрите, концентрации нитратов, аммония, фосфатов и кислорода, растворенных в морской воде. Суммарные количества биологически доступных фракций всех форм азота и фосфора в верхнем, «активном» слое донных осадков рассматриваются как две основные переменные модели бентосного слоя.

Модель приводится в движение атмосферными воздействиями (скорость ветра, облачность, температура и влажность воздуха в придном слое атмосферы, водные осадки, осаждение биогенов на морскую поверхность), поступлением речных вод из всех крупных рек, впадающих в Балтийское море (Висла, Одер, Неман, Даугава и др.) и Финский залив (Нева, Луга, Нарва, Кюмийоки), нагрузками биогенов и органического вещества (приносимыми с речными водами и имеющими иное происхождение), поступлением воды, тепла, соли, биогенов, живого и мертвого органического вещества через Датские проливы.

Сначала модель интегрируется на сферической сетке для всего Балтийского моря с шагом по горизонтали около 10 км. На втором этапе ищется решение на более мелкой прямоугольной сетке (шаг 2 морских мили  $\approx 3.7$  км) только для Финского залива, причем граничные условия на входе в залив определяются из решения первого этапа. Вертикальное разрешение модели составляет 2 м в слое от 0 до 20 м и 5 м в слое от 20 м до дна. Шаг по времени равен 1.5 часа для Балтийского моря и 0.5 часа для Финского залива.

Одним из преимуществ выбранной модели является возможность с ее помощью исследовать не только изменчивость динамики фитопланктона и биогенных компонентов, но и пространственно-временную изменчивость биогеохимических потоков.

Оценка качества воспроизведения гидрофизических характеристик Финского залива современными трехмерными моделями, включая SPBEM, проводилась в рамках выполнения международного проекта «Ансамблевое моделирование как средство изучения эвтрофикации Балтийского моря и Финского залива» (Eutrophication-MAPS).

Результаты выполненной оценки показали:

– современные трехмерные гидродинамические модели, включая гидродинамический модуль SPBEM, могут быть использованы в качестве основы для трехмерных моделей биогеохимических циклов;

– сравнение результатов моделирования с данными натурных наблюдений показывает, что в целом качество воспроизведения сезонной изменчивости физических процессов в Финском заливе 6 моделями, представленными в проекте Eutrophication-MAPS, оказалось удовлетворительным. Соответствуют наблюдаемым следующие наиболее значимые для воспроизведения характеристик экосистемы Финского залива гидрофизические параметры:

- толщина верхнего квазиоднородного перемешанного слоя в летний период;
- положение и значения температуры холодного промежуточного слоя;
- горизонтальный градиент поверхностной солености, обусловленный стоком реки Нева;
- придонное распространение вод открытой части Балтийского моря по акватории Финского залива

Для исследования механизмов эвтрофикации и реакции экосистемы восточной части Финского залива на снижение биогенной нагрузки поступающей с речным стоком использован подход, который основывается на воспроизведении внутрigoдовой динамики биогеохимических циклов при получении квазистационарного решения задачи.

В качестве начальных условий по температуре, солености, содержанию растворенного кислорода, концентрациям фосфатов, аммония и нитратов были приняты средние трехмерные поля этих океанологических параметров за январь-март с 1998 по 2001 годы.

Для задания начальных полей донных отложений были использованы распределения донных переменных в зависимости от глубины моря, построенным по данным (Carman and Cederwal, 2001).

Атмосферная нагрузка азотом и фосфором задавалась по среднегодовым значениям за период 1998 – 2000 гг.

Речная нагрузка задавалась по данным о среднемесячных (1998 – 2001 гг.) значениях нагрузок из Базы Экосистемных Данных (БЭД) Стокгольмского университета. Нагрузка из точечных источников, соответствующая 2000 г., задана по данным о поступлении азота и фосфора (HELCOM, 2004).

Для исключения влияния межгодовых изменений природных факторов, в данной работе расчеты при повторяющихся внешних воздействиях выполнялись до выхода сезонной динамики на квазистационарный режим, как при получении «опорного» варианта, так и в сценарных численных

экспериментах. Достижение квазистационарного состояния водной среды восточной части Финского залива определялось из условия, что вариация межгодовой динамики содержания азота и фосфора в водной толще не превышала 1 – 2 %.

Проведенные при вышеуказанных краевых условиях модельные эксперименты позволили воспроизвести сезонную динамику основных переменных модели. Для проверки результатов моделирования проведено их сравнение с данными натурных наблюдений полученных СЗ УГМС в рамках программы мониторинга за период с 1998 по 2001 годы. К сожалению, все наблюдения проводились только в безледный период после весеннего цветения и поэтому не позволяют судить о концентрациях биогенных элементов в зимний период.

Сравнение с данными показывает, что на всех станциях выбранных для анализа концентрации растворенного кислорода и биогенных элементов находились в пределах межгодовой изменчивости данных наблюдений. Однако следует отметить, что в воспроизведении фосфатов и суммы нитратов и нитритов при сравнении с данными наблюдались следующие особенности. Так на станции 1, расположенной в мелководном районе, в летний период модельные концентрации фосфатов соответствовали нижней границе наблюдаемых значений, в то время как сумма нитратов и нитритов наоборот соответствовала верхнему диапазону наблюдаемых концентраций. В переходном районе (станция 2) наблюдалось полное исчерпание фосфора в летний период, в то время как сумма нитратов и нитритов достигала следовых концентраций только к концу июля, что не противоречит данным натурных наблюдений. Результаты моделирования сезонной динамики биогенных элементов на станциях 3 и 4, расположенных в глубоководном районе, показывают, что в летний период наблюдалось полное исчезновение минерального азота, что хорошо согласуется с данными наблюдений. Концентрации фосфатов на станциях в глубоководном районе находились в диапазоне 5 – 8 мкг/л, что соответствует верхнему пределу наблюдаемых значений для данного периода времени.

Придонные концентрации фосфатов и суммы нитратов и нитритов во всех районах соответствовали наблюдаемым значениям, хотя и находились ближе к верхней границы диапазона межгодовой изменчивости.

Следует отметить, что модель воспроизводит смену зон влияния

лимитирования биогенами в различных районах восточной части Финского залива. На станциях 1 и 2, которые относятся к району, где лимитирующим биогеном является фосфор, при полном исчерпании фосфатов в летний период оставался некоторый запас минеральных форм азота, в то время как на станциях 3 и 4, расположенных в районе, где лимитирующим является азот, наблюдалась обратная картина.

Сезонные изменения и годовые интегралы модельной первичной продукции согласуются с имеющимися оценками, основанными на разрозненных измерениях, включая ее двукратное увеличение значений в мелководном районе по сравнению с открытыми водами. Азотфиксация в модели также представляется вполне реалистичной как в сопоставлении с имеющимися определениями скоростей данного процесса в открытой Балтике  $11 - 158 \text{ мг N/сут}$ , так и её ограниченным распространением в восточном направлении. Диапазон модельных скоростей гравитационного оседания биогенов ( $20 - 40 \text{ г N/м}^2 \text{ сут}^{-1}$ ,  $3 - 7 \text{ г P/м}^2 \text{ сут}^{-1}$ ) полностью совпадает с диапазоном скоростей, оцененных по данными седиментационных ловушек, вывешенных в восточной части Финского залива в августе 1992 и 1995 гг. .

В модели выход азота и фосфора в воду из донных отложений в восточной части Финского залива в течение года находился в пределах  $10 - 20 \text{ мг N/м}^2 \text{ сут}$ . и  $2 - 5 \text{ мг P/м}^2 \text{ сут}$ ., которые хорошо соответствуют натурным оценкам для аэробной поверхности донных отложений.

Сравнение результатов моделирования с данными натурных наблюдений показывает, что воспроизведенная сезонная динамика экосистемы Финского залива согласуется по фазе и амплитуде с данными натурных наблюдений, как при сравнении концентраций биогенных элементов, так и динамики биогеохимических потоков, отвечающих за круговорот азота и фосфора.

**Четвертая глава** посвящена анализу внутригодовой изменчивости составляющих балансов азота и фосфора в восточной части Финского залива и его отдельных районов, полученных на основе математического моделирования, а также описанию изменения составляющих баланса при снижении внешней биогенной нагрузки с суши.

Годовые значения утилизации азота и фосфора для воспроизведения биомассы фитопланктона в восточной части Финского залива составляют:

- мелководный район 24077 тонн азота и 3440 тонн фосфора;
- переходный район 48331 тонн азота и 6904 тонн фосфора;

– глубоководный район 123383 тонн азота и 17629 тонн фосфора;

Покрытие потребностей на воспроизведение биомассы фитопланктона в азоте и фосфоре за счет минерализации органического вещества в водной толще и экскреции зоопланктоном составляет: 42% для азота и 43% для фосфора в мелководном районе, 48 и 49 % в переходном и 49 и 50% в глубоководном районах. Недостаток азота и фосфора покрывается из внешних источников, таких как выход из донных отложений, поступления с речным стоком и при обмене через жидкие границы.

Расчеты годовых составляющих круговорота азота и фосфора показывают, что в мелководный район за счет выхода из донных отложений поступает 800 тонн фосфора и 11000 тонн азота. Из атмосферы выпадает 17 тонн фосфора и 570 тонн азота. Покрытие за счет выхода из донных отложений и выпадения из атмосферы составляет 30 % от общего потребления азота и 25% фосфора.

В переходном районе за счет выпадения из атмосферы и выхода из донных отложений покрывается 25% потребностей в азоте и 30% в фосфоре.

Потребность глубоководного района в фосфоре на 40 % обеспечивается за счет выпадения из атмосферы и выхода из донных отложений, в азоте покрытие потребности за счет источников, связанных с донными отложениями и поступления из атмосферы, составляет 30 %.

Однако, поскольку в глубоководном районе биогенном, лимитирующим первичную продукцию фитопланктона, является азот, то в данном районе становится ощутимой роль процесса азотфиксации. За счет азотфиксации в данном районе дополнительное поступление азота в систему составляет 5 – 6 % от общего потребления или около 7000 тонн в год.

Недостающая часть азота и фосфора для покрытия воспроизводства первичной продукции поступает за счет обмена через жидкие границы.

Результаты расчета интегрального за год обмена азотом и фосфором через жидкие границы рассматриваемых районов (рисунок 3) показывают, что за пределы комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга в восточную часть Финского залива поступает 32256 тонн азота, что составляет 76% от поступления с суши и 1571 (41%) тонн фосфора.

В мелководном районе задерживается 911 тонн фосфора и 6459 тонн азота. Сравнение количества азота и фосфора удержанного мелководным районом с поступлением биогенных веществ в Невскую губу показывает, что в данном районе удерживается 24 % поступающего фосфора и 15 % азота.

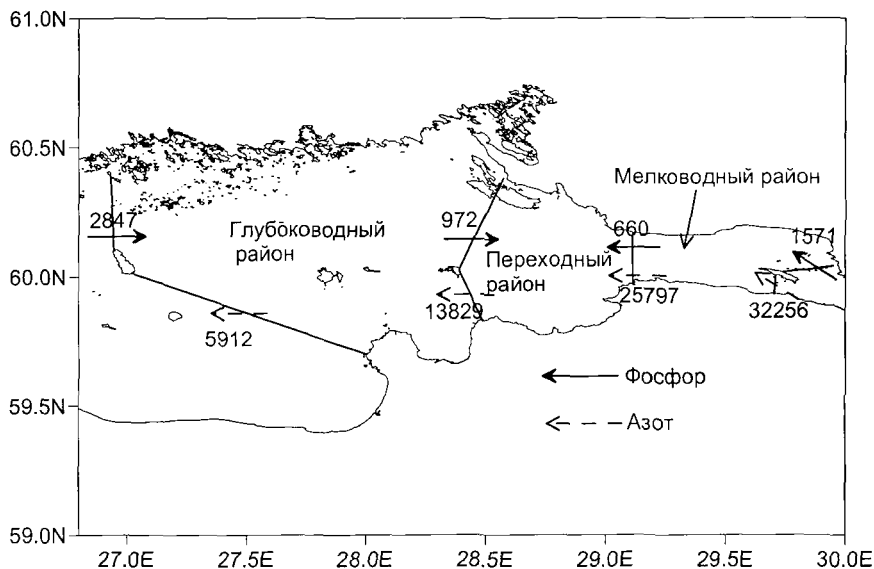


Рисунок 3 – Годовой транспорт азота и фосфора через границы различных районов восточной части Финского залива.

В переходный район поступает 660 тон фосфора, что составляет 17 % от поступления в Невскую губу. Таким образом, модельные расчеты показывают, что весь фосфор, поступивший в восточную часть Финского залива, удерживается мелководным и переходным районами. Дальнейший анализ показывает, что для покрытия потребности в фосфоре восточная часть Финского залива импортирует 2847 тонн из западной части. Причем в глубоководном районе потребляется 1875 тонн, а 972 тонны транзитом поступают в переходный район.

Удержание азотной нагрузки восточной частью Финского залива составляет 62 % от поступления через комплекс защитных сооружений или 86 % от общего поступления в Невскую губу.

Проведенный анализ внутригодовой динамики обмена азотом и фосфором через границы районов восточной части Финского залива показал, что наибольший интерес представляет изменчивость динамики обмена фосфором. Описанный выше годовой транспорт между районами восточной части Финского залива имеет ряд внутригодовых особенностей. В годовом ходе

обмена с западной частью залива выделяются два временных периода с разнонаправленными процессами. В зимние месяцы (декабрь – март) транспорт фосфора направлен в западном направлении. Также транспорт в западном направлении наблюдается в мае в период между весенней и летней фазой фотосинтетической активности. В остальные месяцы года, соответствующие периоду фотосинтетической активности, транспорт фосфора направлен с запада на восток.

Основные особенности перераспределения фосфора внутри восточной части Финского залива соответствуют динамике обмена с западной частью. В вегетативный период поток фосфора направлен на восток, а в период осенне-зимнего накопления транспорт осуществляется в западном направлении. За исключением границы между Невской губой и мелководным районом. На данной границе транспорт фосфора направлен в западном направлении в течение всего года.

За счет процесса седиментации из водной толщи выводится:

- в мелководном районе 1700 тонн фосфора и 12216 тонн азота;
- в переходном районе 3490 тонн фосфора и 24591 тонн азота;
- в глубоководном районе 9328 тонн фосфора и 64585 тонн азота.

Сопоставление годовых значений оседания азота и фосфора с воспроизведенной биомассой фитопланктона говорит о том, что удержание азотной и фосфорной нагрузки восточной частью Финского залива происходит за счет осаждения органического вещества, как образовавшегося на акватории района, так и принесенного из сопредельных областей.

Численные эксперименты по оценке реакции экосистемы на снижение биогенной нагрузки с суши проводились при нескольких сценариях снижения биогенной нагрузки, поступающей в Невскую губу. Выбор сценариев основан на предположении о возможной очистке сточных вод Санкт-Петербурга по фосфору и снижении его содержания в них на 24 %, а также гипотетической, в виду ее чрезвычайно высокой стоимости, очистке по азоту на 15 %.

Были приняты следующие сценарии снижения биогенной нагрузки:

- 1) снижение фосфорной нагрузки на 24 % при сохранении задаваемой в первоначальном расчете азотной нагрузки (Сценарий – Ф);
- 2) снижение азотной нагрузки на 15 % при сохранении уровня фосфорной нагрузки (Сценарий – А);
- 3) совместное снижение фосфорной и азотной нагрузки на 24 % и 15 %,

соответственно (Сценарий – ФА).

Оценка реакции системы, на изменение нагрузки, поступающей с суши, выполнялась по годовым интегралам первичной продукции и азотфиксации для отдельных районов восточной части Финского залива (таблица 1).

Таблица 1 – Изменения (в процентах) интегральных (по году и району) потоков первичной продукции (ПП) и азотфиксации (АФ) при различных сценариях сокращения нагрузки по отношению к «опорным» значениям в восточной части Финского залива

Район	Мелководный район			Переходный район			Глубоководный Район		
	Ф	А	ФА	Ф	А	ФА	Ф	А	ФА
ПП	-4.3	0.8	-3.5	-0.2	-5.3	-3.6	0.3	-0.5	-1.3
АФ	-14.6	16.3	-3.1	-24.5	100.9	31.7	-12.0	24.6	11.8

В мелководном районе наблюдается уменьшение первичной продукции на 4.3 % при снижении только фосфорной нагрузки и на 3.5 % при совместном снижении. Снижение только азотной нагрузки не приводит к изменению продуктивности данного района. Реакция переходного района наиболее заметна при снижении только азотной нагрузки (снижение на 5.3 %) и совместном снижении азотной и фосфорной нагрузки (снижении на 3.6 %), а при Ф-сценарии изменения первичной продукции не наблюдается. Уменьшение первичной продукции в глубоководном районе проявляется только при совместном снижении нагрузки и составляет 1.3 %

Более существенные изменения наблюдаются, если рассматривать отдельно процесс азотфиксации. Так снижение азотфиксации на 12 % в глубоководном районе наблюдается только при Ф-сценарии, а при А-сценарии и АФ-сценарии наоборот доля азотфиксации возрастает до 24.6 и 11.8% соответственно. Увеличение роли азотфиксации при А и АФ сценариях в формировании первичной продукции дополнительно вносит в систему 1700 и 800 тонн азота в год, что составляет 10 и 5 % от среднегодового содержания азота в водной системе глубоководного района.

Увеличение азотфиксации на 100 % в мелководном районе при А-сценарии приводит к дополнительному поступлению азота в водную среду в количестве

280 тонн азота в год, что составляет 4 % от среднегодового содержания азота в водной толще для данного района.

Для выявления причин столь незначительного отклика экосистемы на снижение биогенных нагрузок были рассмотрены годовые интегралы основных звеньев круговорота азота и фосфора в восточной части Финского залива при различных сценариях.

Анализ результатов показал, что основным механизмом, обеспечивающим сохранение продуктивности восточной части Финского залива, является перераспределение адвективных потоков азота и фосфора как при обмене с западной частью залива в целом, так и между отдельными районами внутри исследуемой акватории.

### **В заключении сформулированы основные результаты работы.**

1) На основе данных наблюдений за период с 2001 по 2010 год рассчитаны площади распространения гипоксических зон в летний период в восточной части Финского залива. Максимальные значения площади распространения гипоксических зон наблюдались в 2003 (900 км<sup>2</sup>) и 2010 (1700 км<sup>2</sup>) годах.

2) На основе данных наблюдений показано, что увеличение содержания фосфатов в придонных слоях восточной части Финского залива в отдельные годы в летний период 2001-2010 годов по сравнению с 80-ми и 90-ми годами XX столетия обеспечивалось следующими механизмами:

- поступление фосфатов в результате водообмена с западной частью залива;
- нарушение условий вертикального обмена, за счет усиления стратификации и как следствие ослабления вертикального обмена;
- аккумуляция фосфора в переходном районе;
- расширение и частота возникновения гипоксических зон.

3) Воспроизведена сезонная динамика биогеохимических циклов восточной части Финского залива с использованием модели SPBEM. Сравнение результатов моделирования с данными натурных наблюдений показало, что воспроизведенная сезонная динамика экосистемы Финского залива согласуется по фазе и амплитуде с данными натурных наблюдений, как при сравнении концентраций биогенных элементов, так и динамики биогеохимических потоков, отвечающих за круговорот азота и фосфора. Численные оценки внутригодовой изменчивости составляющих круговорота азота и фосфора в экосистеме восточной части Финского залива, выполненные на основе

результатов воспроизведенной сезонной динамики, реалистично отражают отдельные механизмы процесса эвтрофирования.

4) Оценка вклада источников поступления азота и фосфора, связанных с выходом из донных отложений, обменом через жидкие границы и поступлением из атмосферы в различных районах восточной части Финского залива показывает:

– в мелководном районе основную роль играет процесс обмена через жидкие границы;

– в переходном районе выход из донных отложений и обмен через жидкие границы имеет одинаковое влияние.

– в глубоководном районе наибольшее влияние оказывает выход из донных отложений. Это говорит о том, что прямое влияние стока реки Невы на экосистему восточной части Финского залива распространяется только на мелководный район.

В то же время основным механизмом вывода азота и фосфора из водной среды во всех районах является седиментация.

6) Формирование биомассы азота и фосфора в летний период на 80 % обеспечивается за счет минерализации органического вещества и экскреции гетеротрофами, в то время как весеннее цветение обеспечивается запасом биогенных элементов, накопленным в осенне-зимний период.

7) Потребность в фосфоре восточной части Финского залива для воспроизведения биомассы фитопланктона превышает его поступление за счет выноса из Невской губы, стока с суши, выхода из донных отложений и выпадения из атмосферы, недостающая часть импортируется из западной части залива. При этом доля импорта составляет 2800 тонн фосфора в год, что составляет 75 % от поступления со стоком реки Невы и превышает на 57 % количество фосфора, поступающего в восточную часть залива из Невской губы.

8) Анализ результатов численных экспериментов по снижению нагрузки выявил следующие особенности реакции системы:

– снижение только фосфорной нагрузки привело к незначительному (4.3%) снижению первичной продукции в мелководном районе и практически не изменило величину первичной продукции в переходном и глубоководном районах;

– снижение только азотной нагрузки показало, что заметное снижение (5.4 %) первичной продукции наблюдается только в переходном районе (IIIa),

но при этом следует отметить возрастание роли азотфиксации в глубоководном районе (Шб). Увеличение азотфиксации для этого района составило 24.2 %;

– совместное снижение азота и фосфора привело к незначительному (около 3 %) снижению первичной продукции во всех исследуемых районах, но и как в сценарии со снижением только азотной нагрузки произошло более существенное изменение роли азотфиксации. Увеличение потока азота за счет азотфиксации составило 12 % в глубоководном районе (Шб).

9) Основным механизмом, обеспечивающим незначительную реакцию экосистемы восточной части Финского залива на снижение биогенной нагрузки является перераспределение обмена через жидкие границы. Уменьшение поступления фосфора через комплекс защитных сооружений компенсируется увеличением экспорта из западной части Финского залива.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Ivan A. Neelov, Tatyana R. Eremina, **Alexey V. Isaev**, Vladimir A. Ryabchenko, Oleg P. Savchuk, Roman E. Vankevich, 2003. A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with 3-D model. // Proc.Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.– 2003.– № 52.– pp. 346-359. (E)
2. Oleg P. Savchuk, Tatjana R. Eremina, **Alexey V. Isaev**, Ivan A. Neelov Response of eutrophication in the eastern Gulf of Finland to nutrient load reduction scenarios. Hydrobiologia, 2009.– No 629.– pp.225–237.
3. Kai Myrberg, Vladimir Ryabchenko, **Alexey Isaev**, et.al. Validation of three-dimensional hydrodynamic models of the Gulf of Finland. BOREAL ENVIRONMENT RESEACH, 2010.– No 15.– pp.453–479.

Остальные публикации:

4. А.С. Аверкиев, А.В. Исаев. Гидрологические условия в Балтийском море /«Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна (проект подпрограммы «Исследование природы Мирового океана» федеральной целевой программы «Мировой океан»)». Вып. 1. Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2004. – С.160-173.
5. Eremina T, Karlin L, Isaev A. Analyses of the hydrochemical conditions in the Eastern part of the Gulf of Finland using long-term observations. Abs. V

- Intern. Environ. Forum «Baltic Sea Day», St.-Petersburg, 22-25 March 2004.– pp.157-158.
6. . Eremina T, Isaev A., Karlin L.N. The estimation of the influence of natural and antropogenic factors on nutrients in the Eastern part of the Gulf of Finland, // Abst. VI Intern. Environ. Forum «Baltic Sea Day», St.-Petersburg, 21-23 марта, 2005.– pp.63.
  7. Tatyana Eremina, Alexey Isaev, Alexey Nekrasov. Changes in function and dynamics of the components of the Eastern Part Gulf of Finland ecosystem. //Abs. 5th Baltic Sea Science Congress, Sopot, 20-24 June, 2005.
  8. T. Eremina, A. Isaev, I. Neelov, O.Savchuk Modelling of changing trophic conditions in the eastern gulf of finland under different scenarios of nutrient loading //Abst.. VII, Intern. Environ. Forum «Baltic Sea Day», 21-23 марта, 2006.– pp.109-111.
  9. Tatyana R. Eremina, Alexey V. Isaev, Oleg P. Savchuk, Ivan A. Neelov, 2006. The Modeling of Ecological Effects of Nutrients Reduction in the Eastern Part of the Gulf of Finland. //Environment. Res., Ing. and Manag.– 2006.– № 4(38).– pp.12-18.
  10. Ерёмкина Т.Р., Карлин Л.Н., Исаев А.В. Динамика содержания биогенных элементов в восточной части Финского залива по данным натурных наблюдений // Сб. тез. VIII-й Международный экологический форум «День Балтийского моря». Санкт-Петербург, 21-23 марта 2006 г. - С. 367
  11. Ryabchenko V., Neelov I., Vankevich R., Isaev A., Savchuk O., Eremina T. 2008. 3D modelling the Baltic sea ecosystem under different land loads. International Symposium "US-EU-Baltic 2008", Tallinn, Estonia, May 27-29, 2008. IEEE Conference Proceeding, CD-ROM, 10 p.
  12. Рябченко В.А., Неслов И.А., Ванкевич Р.Е., Исаев А.В., Савчук О.П., Еремина Т.Р. Трехмерное моделирование изменчивости экосистем Балтийского моря при различных биогенных нагрузках с суши. // Тез. Докл. IX Междунар.Форума «День Балтийского моря», г. Санкт-Петербург, 11-13 марта 2009.– С. 298-299.
  13. Еремина Т.Р., Хаймина О.В., Исаев А.В., Ланге Е.К., Максимов А.А., Зайцев В.М., Марковец И.М. Оценка состояния восточной части Финского залива и Невской губы по данным мониторинга в 2008 году // Тез. Докл. X Междунар.Форума «День Балтийского моря», г. Санкт-Петербург, 17-19 марта 2009.

Подписано в печать 12.11.2010 г.  
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз.  
Заказ № 1794.

Отпечатано в ООО «Издательство "ЛЕМА"»  
199004, Россия, Санкт-Петербург, В.О., Средний пр., д. 24  
тел.: 323-30-50, тел./факс: 323-67-74  
e-mail: [izd\\_lemma@mail.ru](mailto:izd_lemma@mail.ru)  
<http://www.lemaprint.ru>