Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Исследование биогеохимических процессов в Балтийском море

Исполнитель Колесникова Вероника Дмитриевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Волощук Екатерина Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой _____
(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«10» июня 2026 г.

Санкт-Петербург

2026

Оглавление

Введение.....3
Глава 1. Физико-географическое описание Балтийского моря.....5
1.1.1 Географическое положение и границы моря.....5
1.1.2 Основные морфометрические характеристики.....6
1.1.3 Гидрология и динамика вод.....7
1.1.4 Стратификация и водообмен.....8
1.1.5 Микробиота.....9
1.1.6 Значение Балтийского моря для человека.....10
1.2 Ботнический залив.....12
1.3 Рижский залив.....15
1.4 Циклы азота и фосфора в морской среде.....17
1.5 Эвтрофирование Балтийского моря.....21
1.6 Кислород.....22
Глава 2. Применение моделей SANBALTS и BALTSEM. Анализ изменения концентрации биогенов за 2000 и 2013-2017 года.....24
2.1 Система поддержки принятия решений для управления Балтийским морем Nest.....24
2.1 Анализ межгодовой изменчивости компонентов биогенной нагрузки на Рижский и Ботнический заливы.....33
Глава 3. Прогноз изменения концентрации биогенов в Ботническом и Рижском заливах на 2098 год.....42
Заключение.....52
Список использованных источников.....54

\

Введение

В настоящее время эвтрофирование Балтийского моря является одной из наиболее серьёзных и комплексных экологических проблем региона. Повышенные поступления соединений азота и фосфора с речным стоком, атмосферными осадками и точечными источниками приводят к усилению первичной продукции, росту биомассы фитопланктона и увеличению потока органического вещества в донные отложения. Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью оценки того, насколько используемые модельные представления соответствуют реальным биогеохимическим процессам, протекающим в Балтийском море. Сопоставление модельных результатов с наблюдаемыми характеристиками экосистемы позволяет выявить сильные и слабые стороны модели, определить границы её применимости и уточнить интерпретацию получаемых оценок.

Целью работы является изучение механизмов формирования эвтрофирования водоемов под влиянием биогенной нагрузки на примере Ботнического и Рижского заливов и определение влияния данной нагрузки на экосистему водоемов в долгосрочной перспективе.

Для достижения поставленной цели в ходе практики решались следующие задачи:

– провести обзор физико-географических, гидрологических и биогеохимических особенностей Балтийского моря;

– описать основные биогеохимические циклы азота и фосфора и механизмы формирования гипоксии;

– проанализировать концептуальные основы и структуру моделей SANBALTS и BALTSEM;

– изучить работу биогеохимических циклов в Ботническом и Рижском заливах за разные периоды времени;

– составить прогноз развития биогеохимических циклов в Ботническом и Рижском заливах;

– сопоставить модельные результаты с данными наблюдений и оценками состояния экосистемы Балтийского моря.

Объектом исследования являются биогеохимические циклы азота и фосфора в Балтийском море, а также процессы седиментации, денитрификации и накопления биогенов в донных отложениях. Предмет исследования - долгосрочная динамика концентраций биогенных элементов и их потоков в Ботническом и Рижском заливах.

Структура работы включает введение, три главы и заключение. В первой главе даётся физико-географическая характеристика Балтийского моря, описываются циклы азота и фосфора, механизмы гипоксии и эвтрофирования. Во второй главе анализируются внешние нагрузки и внутренние биогеохимические потоки для Ботнического и Рижского заливов. В третьей главе представлен прогноз изменения концентраций биогенов и сопряжённых процессов до 2098 года. В заключении подводятся итоги и формулируются основные выводы.

Глава 1. Физико-географическое описание Балтийского моря

1.1.1 Географическое положение и границы моря

Балтийское море – это крупное, но неглубокое внутреннее моря, с центром в точке 59,45^{o} с.ш. и 19,48^{o} в.д и границами, простирающимися от восточных берегов Финляндии до севера Германии и Польши. Располагается оно на северо-западе Европы и является окраиным морем Атлантического океана и частью системы северных морей Европы, играя роль важного сообщающего звена между Атлантикой и Европой.

В состав Балтийского моря входит ряд крупных подбассейнов: Ботнический залив, Ботническое море, Финский залив, Центральная Балтика, Рижский залив, Датские проливы и Пролив Каттегат.

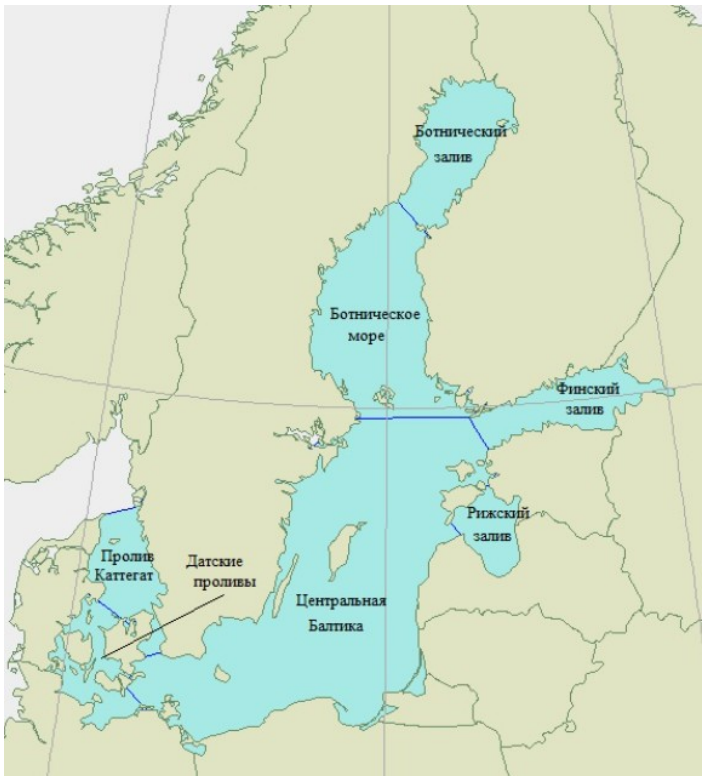


Рисунок 1 - Карта подбассейнов Балтийского моря

Связь моря с мировым океаном осуществляется через Датские проливы, включающие Малый Бельт, Большой Бельт и Эресунн (Зунд), через которые проходят суда из Северного моря через проливы Каттегат и Скагеррак. В связи с тем, что данные проливы достаточно узкие, водообмен, обеспечиваемый ими ограничен, а поскольку море еще и глубоко врезается в сушу, оно является

полузамкнутым водоемом, где полноценный водообмен занимает от 30 до 50 лет.

На территории моря располагаются крупные острова – Готланд – крупнейший остров Швеции в самом центре моря, Эланд, так же принадлежащий Швеции и являющийся вторым по величине, после Готланда, Сааремаа – крупнейший остров Эстонии и наконец Борнхольм, принадлежащий Дании.

В Балтийское море впадает около 260 рек. В их составе самыми крупными несомненно являются Висла (более 1000 км), Западная Двина, Неман, питающая Калининградскую область, Одер, Нева, вытекающая из Ладожского озера и Нарва. Из скандинавских рек можно так же упомянуть Кемийоки, Умеэльвен и Вантау [2].

1.1.2 Основные морфометрические характеристики

Площадь Балтийского моря составляет около 415–425 тыс. км², что делает его вторым по величине внутренним морем в Европе после Средиземного. Его средняя глубина составляет 50 м, максимальная - 470 м, а минимальная около 12 м. Самой глубокой впадиной моря считается Готландская котловина (249 м), в центральной части моря, второй же по глубине (116 м) является Гданьская котловина, расположеная на юге, между польским побережьем и Готландской котловиной. Рельеф дна Балтийского моря, располагая немалым числом впадин и возвышенностей и порогами, разделяющие бассейны на большей его части, является крайне неровным.

Осадочные отложения дна Балтийского моря достаточно богаты и разнообразны, подразделяясь на плейстоценовые, раннеголоценовые и современные [2].

1.1.3 Гидрология и динамика вод

Температурный режим вод Балтийского моря характеризуется выраженной сезонной и вертикальной изменчивостью, обусловленной климатическими условиями региона, малой средней глубиной моря и ограниченным водообменом с Северным морем. Температура поверхностных вод колеблется в течение всего года. Так зимой она понижается, доходя до точки замерзания в северных и восточных районах, а летом может подниматься до 15, а то и 20°C в прибрежных и мелководных районах, включая Финский и Рижский заливы. Центральная часть моря в теплое время как правило сохраняет температуру 14-17°C, однако в отдельные годы могут фиксироваться и более высокие значения при устойчивых антициклонических условиях. Зимой поверхностная температура воды в большинстве районов Балтики варьирует в пределах 0–2°C, что в сочетании с низкой солёностью способствует формированию ледяного покрова в северных бассейнах.

Распределение температуры воды по вертикали имеет чётко выраженную стратификацию в тёплый период года. Весной, на глубинах от 15 до 40 м, формируется термоклин, за счет постепенного прогрева поверхностного слоя. Выше термоклина находится хорошо прогретый и относительно перемешанный поверхностный слой, тогда как ниже него температура воды резко снижается и остаётся относительно стабильной в течение года. В глубоководных котловинах, таких как Борнхольмская и Готландская впадины, температура придонных вод, как правило, остается относительно устойчивой на уровне 4–6 °C, на что оказывают влияние притоки более солёных и тёплых вод Северного моря. В осенне-зимний период сезонная стратификация разрушается в результате охлаждения поверхности и усиления ветрового перемешивания, однако в глубоких районах плотностная стратификация может сохраняться за счёт солёностных различий.

Соленость Балтийского моря считается низкой, из-за значительного пресноводного стока, при этом варируется в зависимости от района - от 11‰ на западе моря, до 2-3‰ в Финском и Ботническом заливах. У дна же она

может достигать 13‰. Наиболее высокие значения солёности наблюдаются в юго-западной части Балтики, вблизи Датских проливов, где солёность поверхностных вод может достигать 15‰, вследствие поступления более солёных вод Северного моря.

В Балтийском море наблюдается четкое вертикальное расслоение солености. В то время как поверхностные воды опреснены из-за речного стока, глубины, особенно в котловинах, имеют куда более высокую соленость из-за более соленые благодаря поступления морских вод через Датские проливы. Из-за этого идет образование постоянного слоя галоклина на глубине 40-80 метров, с резким увеличением солености и плотности воды, препядствующим вертикальному перемешиванию водных масс. В результате этого в глубоких районах Балтийского моря формируются устойчиво изолированные придонные воды с ограниченным доступом кислорода. Такая структура солёностного поля сохраняется на протяжении большей части года и играет ключевую роль в развитии гипоксии и аноксии в глубоководных бассейнах [2,8].

1.1.4 Стратификация и водообмен

Стратификация вод Балтийского моря формируется под совместным воздействием температурных и солёностных различий и отличается высокой устойчивостью, особенно в глубоководных районах моря. Значительное влияние на это оказывает двухслойный водообмен Балтики с Северным морем: в поверхностном слое осуществляется вынос более пресной балтийской воды в сторону Северного моря, тогда как в придонных слоях наблюдается приток более солёных и плотных вод атлантического происхождения. Однако такие притоки, способные достигать глубоководных котловин Балтийского моря, происходят нерегулярно и зависят от сочетания гидрометеорологических условий, включая устойчивые западные ветры и значительные перепады уровня моря между Северным морем и Балтикой.

Речной сток играет черезычайно важную роль в водообмене Балтики, при том что его водосборный бассейн по площади почти вчетверо превышает

само море, охватывая земли более десяти европейских государств. В него впадают сотни рек, создавая мощный приток пресной воды. Этот приток формирует устойчивый положительный водный баланс, что является главной причиной низкой солёности моря. Реки играют решающую роль в экосистеме Балтики. Они служат основным каналом поступления биогенных элементов, особенно фосфора, и загрязняющих веществ с суши.

Пресный речной сток также создаёт стабильный поверхностный слой, который препятствует вертикальному перемешиванию вод. Это усиливает стратификацию и задерживает питательные вещества в верхних слоях, повышая риск эвтрофирования. В прибрежных зонах, куда непосредственно попадают речные воды, часто наблюдаются интенсивное цветение фитопланктона и высокая сезонная изменчивость, что делает эти районы наиболее чувствительными к антропогенному воздействию с суши [2,8].

1.1.5 Микробиота

Из-за своей низкой солености биота Балтийского моря не столь разнообразна как в других морях. Многие виды, живя в условиях постоянной солености и закономерного изменения температур, являются очень чувствительными к изменениям окружающей среды, вызванной в частности антропогенными действиями. Как правило, численность видов и скорость их роста напрямую коррелирует с соленостью, что приводит к значительному повышению показателей в южных и юго-западных регионах, с наибольшим притоком соленых вод из Северного моря, что хорошо заметно на рисунке 2.

Самыми же бедными районами являются наиболее глубокие места и впадины в центральной части моря [7,8].

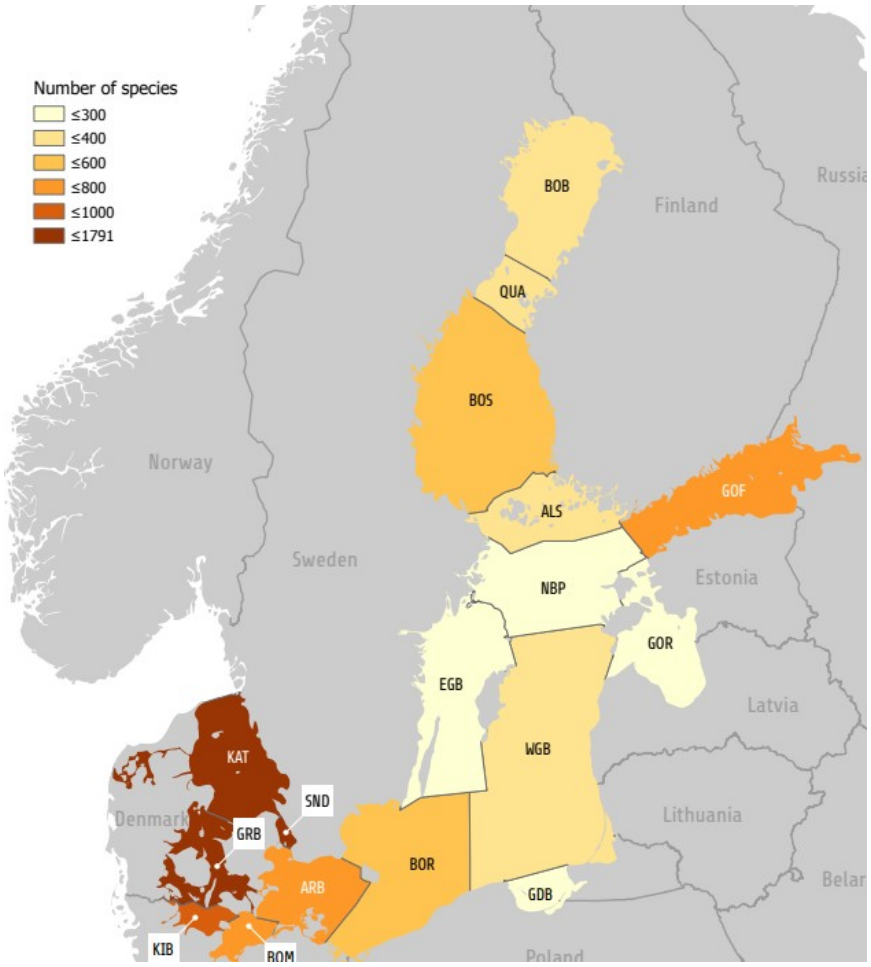


Рисунок 2 - Видовое разнообразие в различных районах Балтийского моря.

1.1.6 Значение Балтийского моря для человека

Балтийское море имеет исключительно большое социально-экономическое и культурное значение для стран, расположенных в его бассейне, и играет важную роль в жизни населения Северной и Восточной Европы. Побережье Балтийского моря является зоной высокой концентрации населения, развитой инфраструктуры и интенсивной хозяйственной деятельности, что обусловливает как экономическую ценность моря, так и высокую степень антропогенной нагрузки на его экосистему. Через Балтийское море осуществляется значительная часть международных морских перевозок, включая транспортировку нефти, нефтепродуктов, химических грузов и контейнерных грузов, что делает регион одним из наиболее загруженных судоходных районов мира. Крупные порты, такие как Санкт-

Петербург, Гданьск, Киль, Росток, Хельсинки и Стокгольм, являются важнейшими транспортными узлами, обеспечивающими связь между странами Балтийского региона и мировыми рынками.

Балтийское море традиционно имеет большое значение для рыболовства, которое на протяжении столетий являлось важным источником продовольствия и занятости для прибрежных сообществ. Основными промысловыми видами являются сельдь, килька, треска и камбала, однако состояние рыбных запасов в последние десятилетия вызывает серьёзную озабоченность. Изменения гидрологических условий, эвтрофирование, гипоксия придонных вод и чрезмерный вылов привели к сокращению численности некоторых ключевых видов, особенно трески, что подчёркивает уязвимость биологических ресурсов Балтийского моря к совокупному воздействию природных и антропогенных факторов. В этой связи устойчивое управление рыбными ресурсами рассматривается как одна из приоритетных задач экологической политики стран региона.

Значительную роль Балтийское море играет и в сфере рекреации и туризма. Прибрежные зоны используются для отдыха, водных видов спорта и курортной деятельности, а качество морской воды непосредственно влияет на привлекательность региона для населения и туристов. Массовые цветения фитопланктона, снижение прозрачности воды и эпизоды появления токсичных цианобактерий оказывают негативное воздействие на рекреационное использование побережья и могут представлять угрозу для здоровья человека. Таким образом, экологическое состояние моря напрямую связано с качеством жизни населения и экономическим благополучием прибрежных территорий [8].

1.2 Ботнический залив

Ботнический залив является одним из важнейших подбассейнов Балтийского моря, а так же одним из крупнейших, имея площадь около 117 тыс. км2 и максимальную глубину 295 м. Ботнический залив, включающий Ботническое море, Кваркен и Ботнический залив в узком смысле, расположен в северной части Балтики между Финляндией и Швецией и характеризуется меньшей плотностью населения водосборного бассейна, более низкой соленостью и сравнительно меньшей антропогенной нагрузкой. Одной из главных характеристик является крайне низкая солёность воды, вызванная значительным речным стоком и ограниченным водообменом с центральной Балтикой, которая в северной части может составлять менее 3-4‰. Кроме того, для Ботнического залива характерны длительный ледовый покров зимой, сравнительно низкие температуры воды и меньшая плотность населения на водосборной территории по сравнению с Финским или Рижским заливами [11].

На протяжении долгого времени Ботнический залив считался одной из наименее загрязнённых частей Балтийского моря. В отличие от южных районов, здесь отсутствуют крупные мегаполисы и интенсивное сельское хозяйство, поэтому масштабы антропогенной нагрузки были значительно ниже. Однако исследования HELCOM последних лет показывают, что даже этот регион испытывает последствия эвтрофикации и климатических изменений. Основными источниками поступления биогенных веществ являются речной сток с территории Финляндии и Швеции, атмосферное выпадение соединений азота, лесопромышленный комплекс и коммунальные сточные воды. Хотя сельское хозяйство играет здесь меньшую роль, чем в южной Балтике, его влияние также присутствует в прибрежных районах.

Согласно данным HELCOM за период 2016–2021 годов, концентрация растворённого неорганического азота в Ботническом море составляла около 3,63 мкмоль/л, а общего азота - около 17,12 мкмоль/л. Для собственно Ботнического залива значения были несколько выше по растворённому азоту

и составляли примерно 6,10 мкмоль/л при концентрации общего азота около 17,87 мкмоль/л. Концентрации растворённого фосфора оставались относительно низкими и составляли около 0,44 мкмоль/л в Ботническом море и около 0,09 мкмоль/л в Ботническом заливе. Общий фосфор находился на уровне 0,48 и 0,21 мкмоль/л соответственно. Эти показатели значительно ниже, чем в Финском или Рижском заливах, что долгое время рассматривалось как свидетельство благополучного экологического состояния северной Балтики [3,11].

Тем не менее ситуация оказалась более сложной. По данным долгосрочных наблюдений HELCOM, начиная примерно с 1990-х годов в Ботническом море наблюдается устойчивый рост концентраций фосфора и фосфатов. Одновременно фиксируется постепенное снижение концентрации кислорода в глубинных водах, что является одним из наиболее тревожных признаков развития эвтрофикации. Снижение кислородного содержания приводит к усилению процессов внутренней нагрузки, когда фосфор начинает высвобождаться из донных осадков обратно в водную толщу. Этот процесс особенно опасен тем, что даже при сокращении внешних поступлений биогенных элементов экосистема продолжает получать дополнительный фосфор из собственных донных отложений [11,12].

Нитрификация играет важную роль в азотном цикле Ботнического залива. В нормальных условиях аммоний, поступающий с речным стоком и образующийся при разложении органического вещества, окисляется нитрифицирующими бактериями до нитритов и нитратов. Однако при снижении концентрации кислорода эффективность нитрификации уменьшается, а в придонных слоях начинают активнее развиваться процессы денитрификации и анаэробного разложения органики. С одной стороны, денитрификация позволяет удалять часть азота из системы в виде газообразного азота, но одновременно ухудшение кислородного режима способствует высвобождению фосфора из донных осадков, что усиливает дисбаланс между азотом и фосфором. В результате возрастает вероятность

развития цианобактерий, способных фиксировать атмосферный азот и поддерживать высокий уровень первичной продукции даже при недостатке растворённы х соединений азота.

Исторически Ботнический залив не испытывал столь сильного воздействия эвтрофикации, как южные районы Балтийского моря. Однако HELCOM подчёркивает, что именно северные бассейны демонстрируют одни из наиболее заметных негативных изменений за последние десятилетия. Несмотря на снижение внешнего поступления биогенных веществ по сравнению с пиковыми значениями второй половины XX века, показатели фосфора продолжают расти. Это свидетельствует о том, что накопленные за десятилетия загрязнения начали оказывать долговременное воздействие на экосистему. Кроме того, изменение климата приводит к повышению температуры воды, сокращению ледового покрова и усилению стратификации водных масс, что дополнительно ухудшает кислородный режим [11,12].

Несмотря на ухудшение отдельных показателей, в Ботническом заливе наблюдаются и признаки положительных изменений. HELCOM отмечает улучшение прозрачности воды и снижение концентрации хлорофилла-а в ряде районов Ботнического залива. Это может свидетельствовать о частичном восстановлении экосистемы в ответ на сокращение внешней нагрузки. Однако общий экологический статус многих участков всё ещё не соответствует критериям хорошего состояния морской среды.

Основными направлениями борьбы с загрязнением Ботнического залива считаются дальнейшее сокращение поступления фосфора и азота из речного стока, совершенствование очистки сточных вод, снижение атмосферных выбросов оксидов азота и контроль за промышленными выбросами. HELCOM также подчёркивает необходимость адаптации природоохранных мер к изменению климата, поскольку повышение температуры способно нивелировать часть положительных результатов, достигнутых за счёт снижения загрязнения. По мнению специалистов, восстановление экологического состояния Ботнического залива потребует многих

десятилетий из-за значительных запасов биогенных веществ, накопленных в донных отложениях [11,12].

1.3 Рижский залив

Рижский залив является одним из самых малых заливов Балтийского моря и располагается между побережьями Латвии и Эстонии. От основной акватории Балтики он отделён островами Сааремаа и Муху, а связь с открытым морем осуществляется через Ирбенский пролив и систему проливов Моонзундского архипелага. Площадь Рижского залива составляет около 18 тысяч км², а средняя глубина не превышает 26–27 метров, что делает его относительно мелководным водоёмом. В залив впадают крупные реки, прежде всего Даугава, Лиелупе и Гауя, которые обеспечивают значительный приток пресной воды и одновременно являются основными путями поступления загрязняющих веществ.

Из-за ограниченного водообмена с центральной Балтикой Рижский залив особенно чувствителен к антропогенным воздействиям. Уже во второй половине XX века он стал одним из наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря. Основными источниками загрязнения являются сельское хозяйство, коммунальные сточные воды, промышленность и речной сток. Наибольшая часть азота и фосфора поступает именно через реки, водосборные бассейны которых охватывают значительные сельскохозяйственные территории Латвии и южной Эстонии [11].

Согласно оценке HELCOM за 2016–2021 годы, Рижский залив остаётся районом с высоким уровнем биогенной нагрузки. Средняя концентрация растворённого неорганического азота составляла около 5,73 мкмоль/л, общего азота - 27,75 мкмоль/л, растворённого фосфора - 0,62 мкмоль/л, а общего фосфора - около 0,91 мкмоль/л. Концентрация хлорофилла-а достигала примерно 5,7 мкг/л, что является одним из наиболее высоких показателей среди суббассейнов Балтийского моря. Прозрачность воды оставалась низкой и составляла около 3,8 метра по диску Секки [3].

Высокие концентрации азота и фосфора создают благоприятные условия для интенсивного развития фитопланктона и цианобактерий. Особенно сильные цветения наблюдаются в тёплые летние месяцы. Массовое развитие водорослей приводит к увеличению количества органического вещества, которое затем оседает на дно и подвергается разложению. Этот процесс сопровождается потреблением кислорода и может приводить к развитию гипоксии в придонных слоях. Хотя масштабы кислородного дефицита здесь обычно меньше, чем в центральной Балтике, локальные зоны ухудшения кислородного режима фиксируются регулярно [11,12].

Процессы нитрификации в Рижском заливе тесно связаны с сезонной динамикой кислорода и биогенных веществ. При достаточном содержании кислорода аммоний активно преобразуется бактериями в нитраты, которые затем используются фитопланктоном. Однако при интенсивном разложении органического вещества и снижении концентрации кислорода скорость нитрификации уменьшается. Одновременно усиливаются процессы денитрификации, в ходе которых часть азота удаляется из экосистемы в атмосферу. Несмотря на это, высокий приток новых соединений азота через речной сток компенсирует потери и поддерживает высокий уровень продуктивности экосистемы.

Исторические данные показывают, что максимальные уровни эвтрофикации наблюдались в конце XX века, когда поступление биогенных веществ достигало наиболее высоких значений/ После внедрения природоохранных мер ситуация начала постепенно улучшаться. Согласно HELCOM, поступление фосфора в Рижский залив сократилось значительно сильнее, чем во многие другие районы Балтийского моря. Улучшение связано прежде всего с модернизацией очистных сооружений, сокращением использования фосфатных моющих средств и совершенствованием экологического законодательства в странах бассейна.

Тем не менее экологическое состояние Рижского залива до сих пор оценивается как неудовлетворительное. Несмотря на снижение внешней

нагрузки, последствия многолетнего накопления биогенных веществ сохраняются. Значительная часть фосфора продолжает циркулировать внутри экосистемы благодаря внутренней нагрузке донных отложений. Кроме того, изменение климата способствует увеличению температуры воды и удлинению периода вегетации фитопланктона, что создаёт дополнительные условия для развития цветений водорослей [11].

HELCOM считает, что дальнейшее улучшение экологического состояния Рижского залива возможно только при продолжении международного сотрудничества и последовательном сокращении поступления биогенных веществ с водосборной территории. Особое значение имеют экологизация сельского хозяйства, уменьшение выноса удобрений с полей, развитие современных очистных сооружений и контроль за промышленными стоками. Поскольку Рижский залив обладает ограниченным водообменом с основной акваторией Балтики, даже относительно небольшие объёмы загрязнения способны оказывать здесь заметное воздействие, поэтому эффективность природоохранных мер в этом регионе особенно важна для общего экологического состояния Балтийского моря [11].

1.4 Циклы азота и фосфора в морской среде

1.4.1 Цикл Фосфора

Фосфор является крайне важным элементом в биогеохимическом цикле водоема, влияя на рост водорослей и служа пропитанием для планктонных организмов и вызывая цветение водоемов. В отлчии от азота, находящегося преимущественно в толще воды, большая часть резерва фосфора находится в захороненном виде на дне водоемов. При этом процесс выделения фосфора из донных отложений обратно в среду достаточно долгий и не эффективный, из-за чего в год на сушу из океана возвращается около 60 тыс. тонн фосфора, при ежегодной добыче 1-2 млн. тонн. Это делает фосфор достаточно редким и труднодобывемым веществом [9].

Фосфор поступает в среду как в органических, так и в минеральных формах, количества которых соизмеримы. Органические формы фосфора поступают как правило с органическими веществами фитопланктона, в процессе минерализации переходящим в подвижное состояние. В донных отложениях минерализации подвергается 40-80% поступающего органического фосфора. Объем минерализованного фосфора напрямую коррелирует с объемом углерода, где на 200 атомов углерода минерализуется 1 атом фосфора [9].

Минеральные формы фосфора в донных отложениях как правило представлены в виде апатитного и неапатитного фосфора, где объем апатитного фосфора как правило больше. Минеральный фосфор может быть представлен в большей степени ортофосфатами, чья концентрация зависит от Ph, солености воды и окислительно-восстановительных условий. Концентрация минерального фосфора в верхних слоях донных отложений зависит от скорости высвобождения в результате разрушения органического вещества, а также скорости оседания фосфора на твердых частицах.

Минеральный фосфор сорбируется глинистой составляющей иловых отложений и в аэробных условиях выход фосфатов из данных отложений в воду происходит в 5-10 раз медленнее, чем в анаэробных.

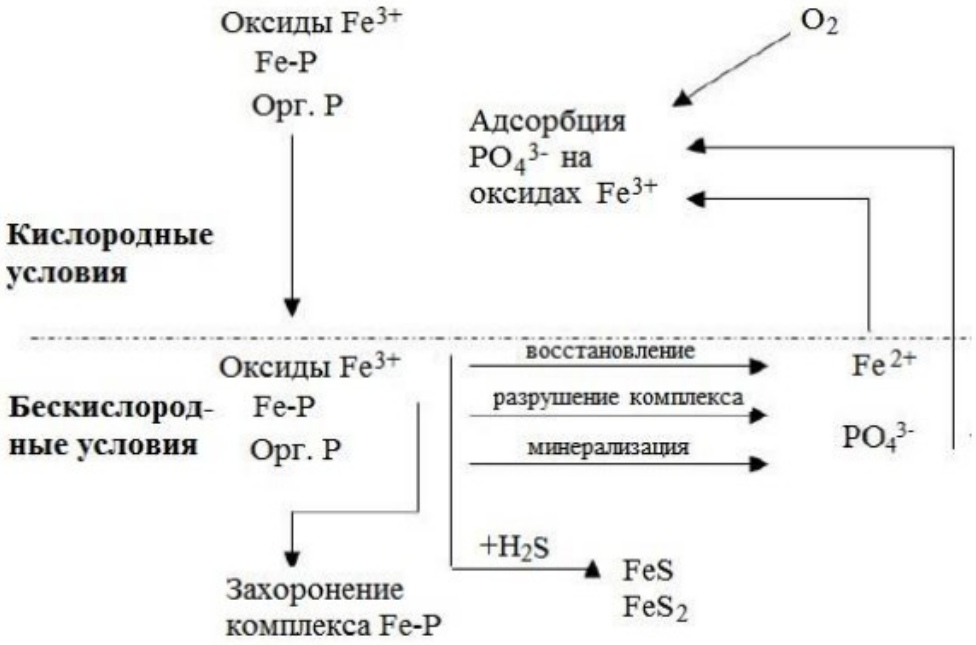


Рисунок 3 - Потоки соединений фосфора и железа в донных отложениях в окислительных и восстановительных условиях.

Хорошо известно также и то, что в условиях окисления фосфаты имеют свойство адсорбироваться на поверхности частиц металлов, а чаще всего железа, образуя прочный комплекс Fe-P. Именно это помогает фосфатам при захоронении на дне водоемов, где они остаются вместе с донными осадками. Однако при аноксийных условиях, когда в воде, при процессах разложения органики, появляется сероводород, связывающийся с Fe+2 в ходе реакции восстановления, комплекс разрушается. Однако, чем дольше длится процесс удержания фосфатов в донных осадках, тем прочнее становится связь комплекса Fe-P.

На объем захоронения фосфатов непосредственно влияют кислородные условия и обогощение воды металлами, в частности железом.

1.4.2 Цикл азота в донных отложениях

Азот является ключевым биогенным элементом, определяющим первичную продуктивность водных экосистем. В отличие от фосфора, чей основной резерв находится в донных отложениях, азот в большей степени циркулирует в толще воды. В донные отложения азот поступает в составе органического веществ, таких как белки, нуклеиновые кислоты или хлорофилл, а также адсорбируется на взвешенных частицах неорганических ионов аммония (NH_4^+), нитритов (NO_2^-) и нитратов (NO_3^-).

В отличие от фосфора, захоронение которого во многом определяется адсорбцией на железе, биогеохимические превращения азота в первую очередь зависят от окислительно-восстановительных условий среды и активностью специфических групп микроорганизмов. В донных отложениях реакции, связанные с азотом, включают в себя аммонификацию (разложение органического азота до NH_4^+), нитрификацию (окисление NH_4^+ до NO_2^- и NO_3^- в присутствии кислорода) и денитрификацию (восстановление NO_3^- до газообразного N_2 в аноксийных условиях). Последний процесс критически

важен, так как он выводит азот из экосистемы и является основным механизмом его удаления из морской среды. Бентосная денитрификация обеспечивает более 50% общего удаления связанного азота в океане [5].

Основной формой азота в поровых водах донных отложений является аммонийный азот (NH_4^+). Он накапливается в анаэробных условиях как конечный продукт разложения органического вещества. Как правило, чем глубже слой осадка и чем более восстановительная обстановка, тем выше концентрация аммония в поровых водах. При этом часть аммония сорбируется на глинистых частицах и органическом веществе, что замедляет его выход в воду.

Нитриты и нитраты в поровых водах обычно присутствуют в значительно меньших количествах, так как являются промежуточными или конечными продуктами окислительных процессов. Их присутствие характерно для верхних, более окисленных слоев осадка, где еще есть кислород или нитрат из придонной воды проникает в осадок. В присутствии кислорода и на границе с ним нитрат как правило используется бактериями в процессе денитрификации, восстанавливаясь до газообразного азота (N_2), который улетучивается, тем самым выводя азот из системы и снижая эвтрофикацию, либо восстанавливается до аммония, который остается в системе [6].

Минерализация органического азота в донных отложениях также зависит от соотношения углерода и азота в осаждающемся материале. В окислительных условиях происходит нитрификация, когда аэробные бактерии окисляют аммоний до нитритов и нитратов, в то время как в аноксийных условиях этот процесс блокируется.

В отличие от фосфора, для которого захоронение является основным путем вывода из круговорота, захоронение азота в осадках имеет меньшее значение в глобальном масштабе, так как большая его часть возвращается в воду или удаляется через денитрификацию. Основной формой захороненного азота является органический азот $N_{or}g$, недоступный для разложения.

Эффективность захоронения зависит от скорости осаждения вещества и глубины слоя, куда проникает кислород [6].

1.5 Эвтрофирование Балтийского моря

Эвтрофированием называют повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов под действием естественных или антропогенных факторов [18].

Эвтрофирование негативно влияет на водоёмы, особенно, когда процесс ускоряется деятельностью человека. Антропогенное эвтрофирование приводит к несбалансированному функционированию системы, что выражается в интенсивном росте водорослей, образовании избытка органического вещества, увеличении потребления кислорода, гибели бентосных организмов и развитии гипоксии [18].

Эвтрофирование является одной из наиболее серьёзных причин изменения экосистем Балтийского моря, поскольку сравнительно небольшой объём моря и длительный период обновления вод за счет малой интенсивности течений в проливах способствуют прогрессирующему эвтрофированию. На Балтике основные признаки эвтрофирования были установлены раньше, чем в других морских акваториях и во многом именно черезмерные нагрузки азотом и фосфором с различных источников являются главной причиной этой проблемы. Внешними источниками биогенов как правила становятся неочищенные или недостаточно очищенные муниципальные и промышленные сточные воды, рассредоточенные источники, такие как сельское хозяйство, разбросанные поселения без систем водоотведения и очистки, а так жеатмосферное загрязнение. К внутренним источникам относят большие запасы азота и фосфора, которые могут поступать в водную толщу из донных отложений, увеличивая первичную продукцию водорослей.

Многолетний анализ вод показывает динамику увеличения биогенной нагрузки на бассейн в период 1970-1980-х годов, после чего наступило постепенное снижение с 1980-х годов. Однако современные значения нагрузок

всё ещё сохраняются высокими, близкими к уровню 1960-х годов и превышающими целевой уровень, установленный HELCOM [18].

1.6 Кислород

Растворённый кислород является ключевым фактором, определяющим функционирование водных экосистем. Большинство многоклеточных растений и животных в прибрежных водах нуждаются в кислороде для нормальной физиологической деятельности. Пространственные и временные вариации кислорода играют центральную роль в изучении прибрежной экологии и биогеохимии. [1]

Кислородное истощение в придонных слоях (гипоксия) обычно определяется как концентрация. Возникновение гипоксии связано с дисбалансом между потреблением и поступлением кислорода в среду. Механизмы, участвующие в колебании уровня растворённого кислорода, - это дыхание гидробионтов, дезоксигенация при разложении органики, фотосинтез и диффузия из атмосферы.

Антропогенное эвтрофирование – главная причина ускорения гипоксии в прибрежных водах мира. Избыток биогенов, таких как азот и фосфор вызывает цветение водорослей. Когда водоросли отмирают, бактерии разлагают эту органику и потребляют кислород. При устойчивой стратификации (расслоении воды на слои разной плотности, когда пресная вода скапливается над солёной) вертикальное перемешивание затрудняется, и кислород из атмосферы не поступает в придонные слои. В результате формируются мёртвые зоны - участки дна, непригодные для жизни [1,18].

Особенностью гидрохимического режима глубоководных районов Балтийского моря является возникновение и длительное существование гипоксийно-аноксийных условий, что приводит к гибели животных и образованию мёртвых зон. Механизм возникновения гипоксии в море связан с двумя основными факторами - физическими процессами, определяющие

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 уничтожает остатки придонного кислорода, что приводит к полной аноксии и образованию сероводорода [18].

Основными же причинами возникновения гипоксии в Балтике считается его слабая проточность и постепенный нагрев глубоководных участков, приводящих к уменьшению количества удерживаемого кислорода.

Глава 2. Применение моделей SANBALTS и BALTSEM. Анализ изменения концентрации биогенов за 2000 и 2013-2017 года.

2.1 Система поддержки принятия решений для управления Балтийским морем Nest

Система поддержки и принятия решений NEST направлена на экспресс-моделирование состояния экосистемы при различных сценариях внешней нагрузки и среднегодовых величинах потоков биогенов. Для того чтобы связать поступление биогенных веществ с их концентрацией и другими показателями качества окружающей среды, модель NEST должна быть достаточно быстрой, чтобы служить частью интерактивной системы NEST, достаточно надежной для описания динамики питательных веществ во всем Балтийском море, достаточно правдоподобной в сценариях снижения нагрузки питательных веществ и климатических изменений.

Для анализа биогеохимических циклов азота и фосфора в Балтийском море в рамках системы поддержки принятия решений Nest была разработана модель SANBALTS. Основная цель данной модели установить количественную связь между внешними поступлениями биогенных веществ, к которым относились речные, точечные, атмосферные источники, и показателями качества морской среды, при неизменяемых заданных условиях.

Являясь стационарной моделью SANBALTS рассчитывает равновесное состояние экосистемы, к которому система стремится при длительном действии постоянных внешних нагрузок. Модель разделяет Балтийское море на 8 подбассейнов – поверхностную часть (BPs) и глубинную часть (BPd) центральной Балтики, Ботническое море (BS), Ботнический залив (BB), Финский залив (GF), Рижский залив (GR), Датские проливы (DS) и пролив Каттегат (KT). Все расчёты проводятся в годовом осреднении, получаемые выходные переменные модели выражаются в т/км^3 для концентраций биогенов в воде, т/км^2 для концентрации биогенов в донных отложениях.Основными биогеохимическими процессами, которые описывает

модель являются первичная продукция – потребление поступающих в воду неорганических форм азота и фосфора фитопланктоном, азотфиксацию, регенерацию биогенов, седиментацию, денитрификацию, сквестрацию фосфора и захоронение биогенов в глубоких осадочных слоях на дне.

Особенностью SANBALTS является учёт окислительно-восстановительных условий в глубокой части Балтийского моря. Концентрация растворённого кислорода (OX) в придонных водах рассчитывается на основе баланса между вентиляцией (притоком солёных вод из Датских проливов) и потреблением при минерализации органики. При снижении кислорода ниже 2 мл/л формируются зоны аноксии, в которых денитрификация прекращается, а фосфор начинает высвобождаться из донных захоронений, что в последствии стимулирует работу цианобактерий, вызывая цветение.

В рамках настоящей работы модель использовалась для расчёта стационарных концентраций растворённого неорганического азота и фосфора в подбассейнах Балтийского моря при различных уровнях внешней нагрузки, оценки потоков седиментации, денитрификации и моделирования бентосных запасов.

Таким образом, использование модели SANBALTS в данной работе позволяет не только проанализировать биогеохимические процессы в Балтийском море, но и оценить применимость упрощённых модельных представлений для описания реальной экосистемы. Полученные результаты служат основой для обсуждения сильных и слабых сторон стационарного моделирования и для интерпретации наблюдаемых экологических проблем Балтийского моря в контексте взаимодействия физических, биологических и антропогенных факторов.

Для анализа долгосрочной динамики биогенных элементов в Балтийском море используют результаты расчётов, выполненных с помощью модели BALTSEM. Данная модель разделяет акваторию Балтийского моря на 13 взаимосвязанных бассейнов, каждый из которых считается горизонтально однородным, но описывается с высоким вертикальным разрешением. Так же

она учитывает гидродинамические процессы такие как водообмен между бассейнами, вертикальное перемешивание, сезонную стратификацию, биогеохимические циклы азота, фосфора и кремния, а также взаимодействие водной толщи с донными отложениями. Выходными переменными модели являются концентрации растворённых неорганических форм азота и фосфора, потоки седиментации, денитрификации, а также запасы биогенов в бентосных отложениях [15].

В то время как модель SANBALTS рассматривает равновесное состояние среды с годовым осреднением и неизменными данными, BALTSEM имея высокое вертикальное разрешение и учитывая сезонную динамику, дает возможность производить долгосрочные прогнозы, рассчитывая ключевые экологические индикаторы и моделируя кислородный режим. Таким образом данная модель показывает, как именно экосистема будет меняться год от года, учитывая сезонные и межгодовые колебания, под влиянием меняющихся климата и нагрузок.

В настоящей работе использовались результаты модельных расчётов BALTSEM за период 1970–2098 гг. для двух подбассейнов Балтийского моря - Рижского залива и Ботнического залива. Данные были предоставлены в виде временных рядов с годовым разрешением. Концентрации биогенов представлены в микрограммах на литр (мкг/л), что соответствует стандартным единицам измерения для данного типа модельных выходов [15].

2.2 Анализ влияния различных уровней внешней нагрузки на состояние экосистемы и биогеохимические потоки веществ в Рижском и Ботническом заливах

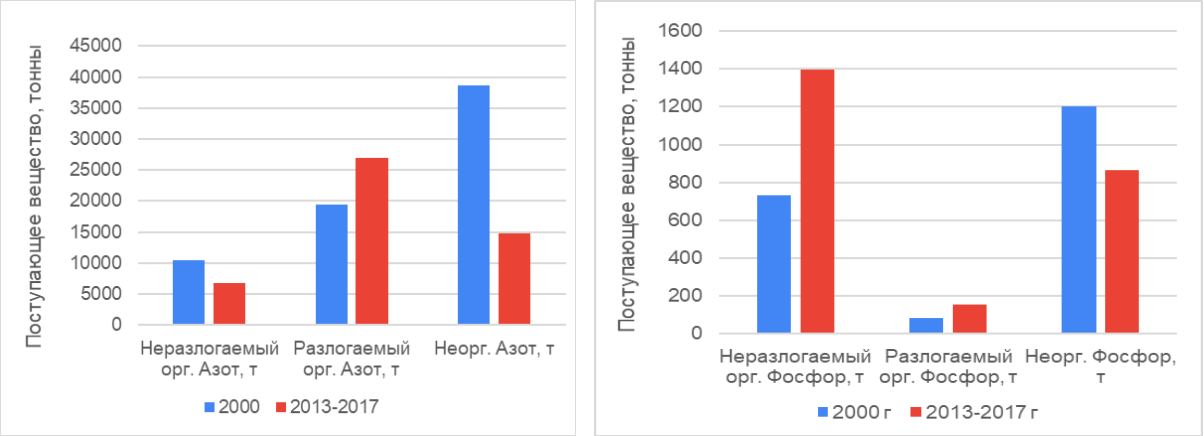
В работе для проведения анализа влияния уровней внешней нагрузки на состояние экосистемы были взяты данные из описанных ранее Ботнического и Рижского заливов в 2000 г и 2013-2017 гг. Для составления полной картины биогеохимических потоков, необходимо было выбрать данные о стоках азота и фосфора из рек, атмосферы и точечных источников, попадавших в

подбассейны. В частности, были изучены именно объемы стоков отдельных форм азота и фосфора – органической слаборазлагаемой, органической легкоразлагаемой и неорганической. Сравнения проводились как между стоками в различные временные периоды, так и в разных подбассейнах. Анализ так же был подкреплен официальными данными о результатах деятельности межправительственной организации HELCOM в указанных районах.

Таблица 1. Соотношение величины речного стока в рижском и Ботническом заливах за 2000 и 2013-2017 гг.

Рижский залив			Ботнический залив		
Вещество	2000	2013-2017	Вещество	2000	2013-2017
Неразлогаемый орг. Азот, т	10494,4	6741	Неразлогаемый орг. Азот, т	9184,52	5544
Разлогаемый орг. Азот, т	19489,6	26963	Разлогаемый орг. Азот, т	36738,08	22175
Неорг. Азот, т	38707,5	14729	Неорг. Азот, т	20730,4	45482
Неразлогаемый орг. Фосфор, т	731,88	1398	Неразлогаемый орг. Фосфор, т	2001,51	942
Разлогаемый орг. Фосфор, т	81,32	155	Разлогаемый орг. Фосфор, т	222,39	105
Неорг. Фосфор, т	1202,5	863	Неорг. Фосфор, т	1102,7	1001

А)



Б)

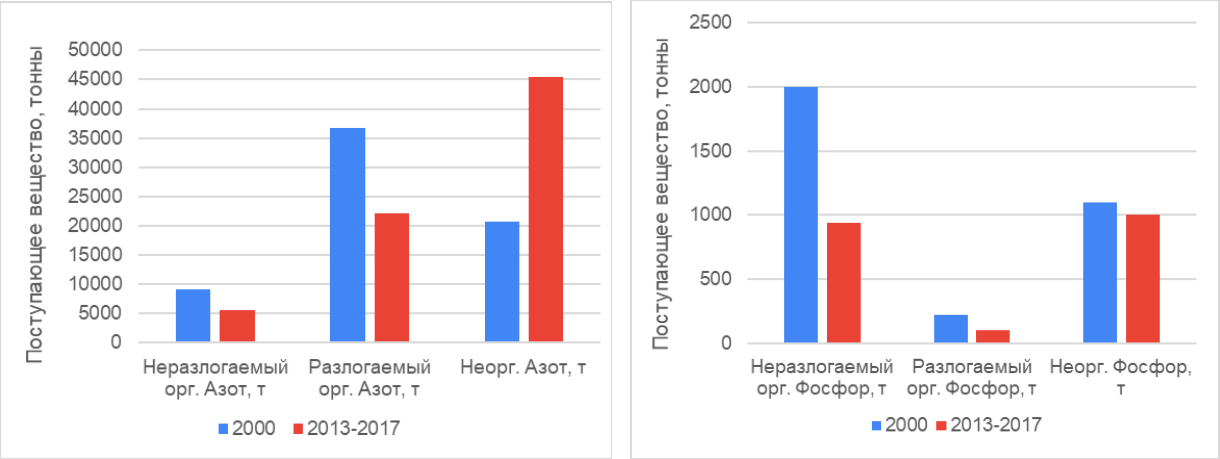


Рисунок 4 - Соотношение величины речного стока в Рижском (а) и Ботническом (б) заливах за 2000 и 2013-2017 года.

Различия в динамике веществ, приносимых в бассейн речным стоком, зависят от их формы. Так в Рижском заливе с течением времени наблюдалось заметное повышение разлагемого органического азота на 28%, в то время количество поступавшего речным стоком неразлагаемого органического и неорганического азота заметно уменьшилось на 62% и 36% соответственно. Динамика стока фосфатов отличается здесь тем, что количество органического вещества с течением лет увеличилось на 48%, в то время как количество веществ неорганической фракции так же уменьшилось – на 339,5 т или на 28%.

В это же время в Ботническом заливе ситуация складывалась иным образом. На графики можно заметить, что сток органического азота значительно уменьшается с течением времени на 3640,5 т для разлагаемого и

14563 т для неразлагаемого азота, что составило 40% для каждого из показателей. Неорганический азот в то же время в период 2013-2017 года значительно вырастает в сравнении с 2000 годом в два с половиной раза. Количество поступающего со стоками органического фосфора сократилось в двое, а неорганического уменьшилось на 101 т.

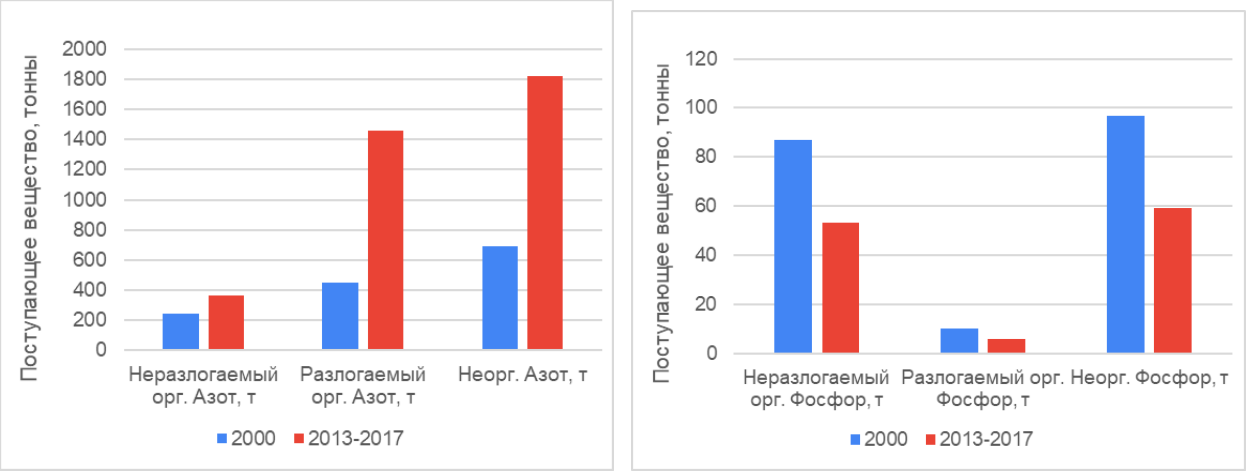
Данные изменения вероятнее всего были связаны с модернизацией очистных сооружений и при этом колебаний в объемах речного стока – в Ботническом заливе объем увеличивался, в Рижском уменьшался.

Таблица. 3.

Соотношение величины стока из точечных источников в рижском и ботническом заливах за 2000 и 2013-2017 года.

Рижский залив			Ботнический залив		
Вещество	2000	2013-2017	Вещество	2000	2013-2017
Неразлогаемый орг. Азот, т	242,31	364	Неразлогаемый орг. Азот, т	352,82	54
Разлогаемый орг. Азот, т	450	1458	Разлогаемый орг. Азот, т	1411,28	216
Неорг. Азот, т	692,3	1822	Неорг. Азот, т	1764,1	270
Неразлогаемый орг. Фосфор, т	87,12	53	Неразлогаемый орг. Фосфор, т	56,16	24
Разлогаемый орг. Фосфор, т	10,00	6	Разлогаемый орг. Фосфор, т	6,00	3
Неорг. Фосфор, т	96,8	59	Неорг. Фосфор, т	62,4	27

А)



Б)

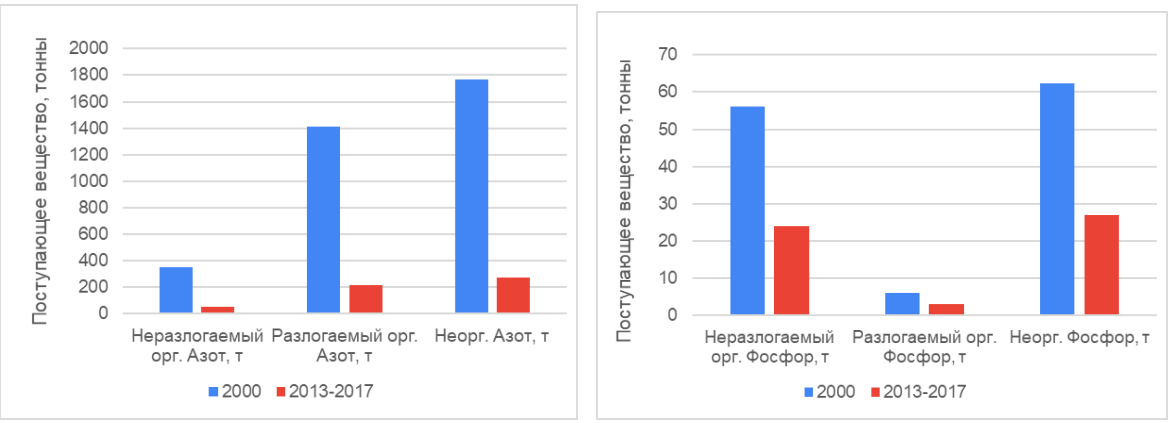


Рисунок 5 - Соотношение величины стока из точечных источников в Рижском (а) и Ботническом (б) заливах за 2000 и 2013-2017 года.

В сравнении с речным стоком, в случае стоков химических веществ из точечных источников, расположенных на побережье подбассейнов Балтийского моря, коими могут являться предприятия, населенные пункты или канализационные стоки, мы наблюдаем несколько иную ситуацию для стоков азота. В случае Рижского залива видно значительное повышение стока биогенного вещества в более поздний период времени – количество органического азота выросло на 1129 т/км^3, неорганического – на 1130 т/км^3 или 62% в общем, так что суммарное количество азота попадающего в оду через локальные стоки на момент периода 2013-2017 г, составило 3644 т/км^3, что является высоким показателями для такого небольшого подбассейна. Такая высокая величина стока азота может приводить к эвтрофикации

прибрежных участков залива. В то же самое время величина попадающего в воду фосфора с течением времени наоборот несколько сократилась на 30 т/км3 или 39%.

В Ботническом заливе с течением времени количество поступающего азота из точечных источников значительно сократилось, с 3528 т/км^3 до 540 т/км^3 – примерно на 84%, а фосфора с 124, 6 т/км^3 до 54 т/км^3 – примерно на 56%, значительно понизив риски эвтрофикации в пребрежных зонах.

Во многом достаточно положительные тенденции для Балтийского залива были обеспечены деятельностью государств, входящих в комиссию HELCOM, план которой во многом был обговорен на собрании 2010 года. Было принято решение достичь максимального сокращения сельскохозяйственных стоков в воды Ботнического залива и реки, ведущие к нему, обеспечить доступ местного населения к центральному водоканалу, а так же повысить готовность реагирования службы охраны вод на разливы нефти подбассейне [9].

В то же самое время, увеличение концентрации загрязняющих веществ в Рижском заливе связано с увеличением населения и меньшим контролем за очистными сооружениями на предприятиях.

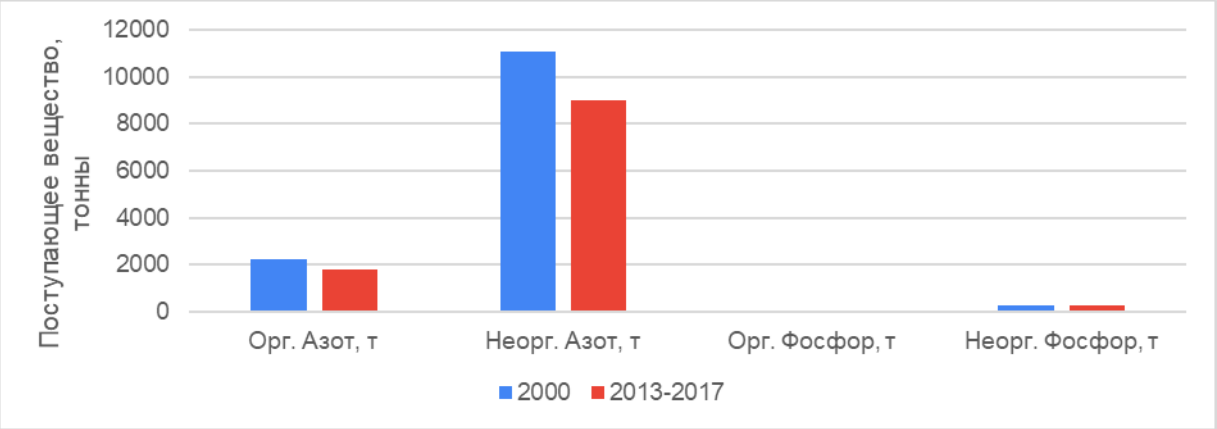
Причина же несоответствия тенденции изменений количества фосфора и азота, состоит в том, что на очистных производствах фосфор легче удаляется из воды, путем осаждения, в то время как азот требует дорогостоящего оборудования и химических реагентов для хлорирования воды или уф облучения [13,14].

Таблица 4.

Атмосферный сток в Рижском и Ботническомзаливах за 2008-2012 и 2013-2017 года

Рижский залив			Ботнический залив		
Вещество	2000	2013-2017	Вещество	2000	2013-2017
Орг. Азот, т	2209,9	1804	Орг. Азот, т	2285,1	1503
Неорг. Азот, т	11049,3	9018	Неорг. Азот, т	11425,6	7514
Орг. Фосфор, т	0	0	Орг. Фосфор, т	0	0
Неорг. Фосфор, т	270,1	263	Неорг. Фосфор, т	561,9	548

А)



Б)

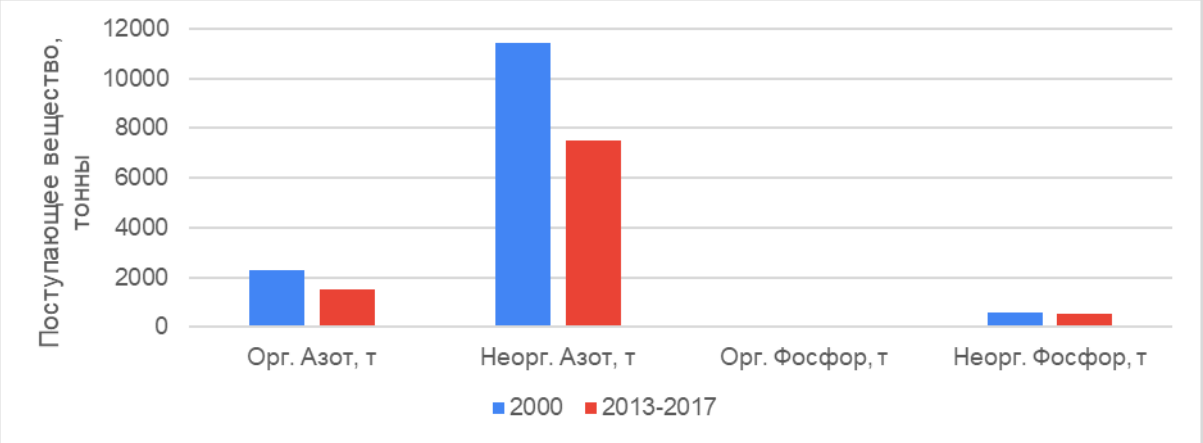


Рисунок 6 – Поступление биогенов из атмосферы в Рижском (а) и Ботническом (б) заливах за 2000 и 2013-2017 годы

Атмосфера обеспечивает значительный вклад в объем поступающих в бассейн биогенов. На графиках отчетливо видно, что в более ранний период в водоем поступало больше органических и неорганических фракций азота и фосфора, в то время как в поздний период их объем сократился, что вероятнее всего связано с переоборудованием систем фильтрации на производствах.

Разница поступления из атмосферы между водоемами не велика, однако объем поступающего из атмосферы азота в 2000 году был выше именно в Ботническом

заливе, а в 2013-2017 годах в Рижском. Объем неорганического фосфора, поступающего из атмосферы, на протяжении всего обозримого времени, был выше в Ботническом заливе.

2.1Анализ межгодовой изменчивости компонентов биогенной нагрузки на Рижский и Ботнический заливы

В основе моделирования круговорота биогенных элементов лежит разделение всех форм азота и фосфора на несколько групп, связанных потоками вещества. Группы определяются шестью пелагиальными составляющими, к которым относятся разлагаемые органические, неразлогаемые органические и неорганические формы азота и фосфора и донными отложениями, где рассматриваются две бентосные составляющие азота и фосфора.

Все процессы описываются в годовом осреднении. Центральным звеном биогеохимического цикла является так называемая первичная продукция - потребление растворённых неорганических форм фитопланктоном. В ходе этого процесса неорганический азот (DIN) и неорганический фосфор (DIP) ассимилируются и переходят в состав органических форм азота (ORN) и фосфора (ORP).

Значительная часть синтезированного органического вещества не покидает водную толщу, а подвергается бактериальному разложению, который так же называют процессом рециклинга. В ходе рециклинга органическое вещество (ORN и ORP) минерализуется, переходя обратно в неорганические формы азота и фосфора, становясь доступной для потребления фитопланктоном.

Часть органического вещества постепенно выводится из верхних слоёв воды в результате гравитационного оседания на дно (седиментации), где входит в состав донных слоев. Именно там происходит дальнейшая трансформация под действием бентосных микроорганизмов. Органическое вещество минерализуется с образованием DIN и DIP. Часть этих

неорганических форм возвращается в водную толщу - этот процесс обозначается как выход (высвобождение из осадков).

Принципиальное различие в поведении азота и фосфора связано с наличием газообразной фазы. Азот может удаляться из экосистемы через денитрификацию - бактериальный процесс восстановления DIN до молекулярного азота N_2, который улетучивается в атмосферу. Противоположным по направленности процессом является азотфиксация - биологическое связывание атмосферного N_2 с образованием DIN.

Часть биогенов в осадках окончательно выводится из активного круговорота путём захоронения. Захоронение представляет собой погребение осадочного материала под вышележащими слоями, что делает его недоступным для организмов в толще воды и придонном слое.

Важной характеристикой системы являются величины бентосных запасов азота (BEN) и фосфора (BEP), которые представляют собой аккумулированное в активном слое осадков количество биогенных элементов. [16].

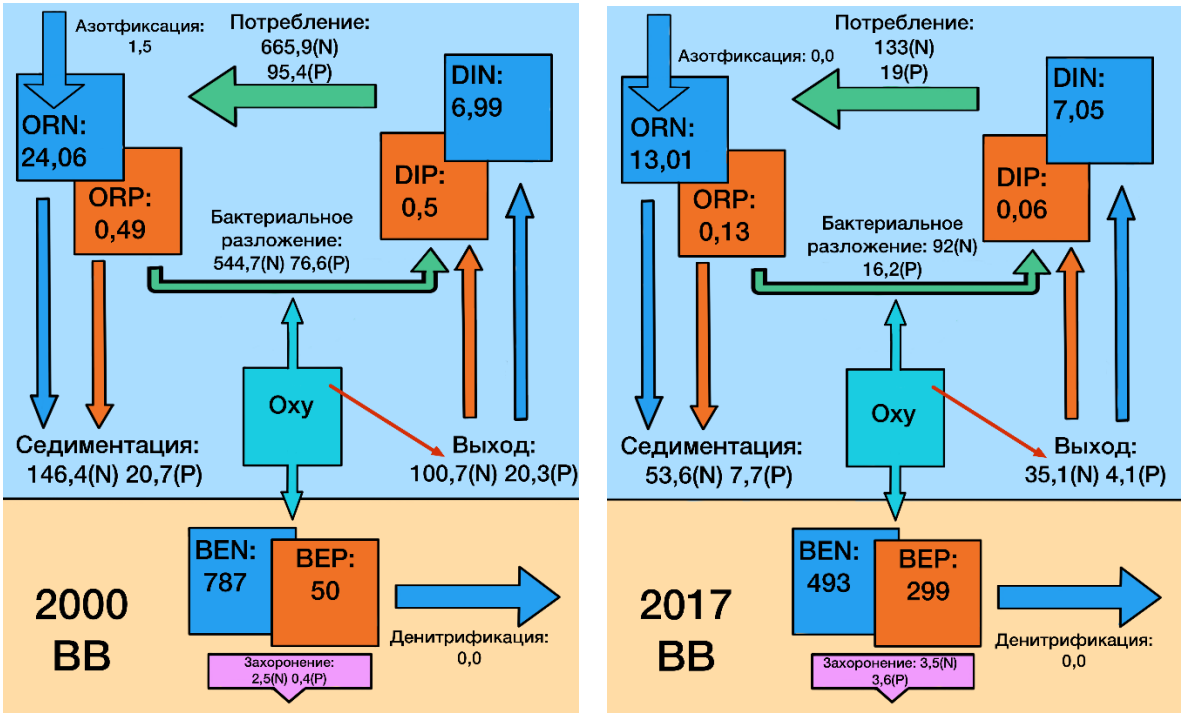


Рисунок 7 - Переменные состояния и внутренние биогеохимические процессы в блоках модели для Ботнического залива в периоды 2000 г и 2013-2017 годов.

В представленных данных для Ботнического залива величина потребляемого фитопланктоном азота в 2000 году составил 665,9 т/км^3, фосфора – 95,4 т/км^3, что отражает масштаб связывания биогенов в органику. В то же время в период 2013-2017 величина потребляемого азота составила 133 т/км^3, фосфора – 19 т/км^3, что указывает на общее снижение потребляемых питательных веществ, а в связи с этим снижения активности фитопланктона с течением лет.

В Ботническом заливе поток бактериального разложения органического азота до неорганических составляющих на момент 2000 года составляет 544,7 т/км^3, фосфора – 76,6 т/км^3, что обеспечивает 82% и 80% от потребления соответственно. Таким образом, система функционирует преимущественно в регенеративном режиме. В период 2013-2017 г. поток разложения азота составил 92 т/км^3, а фосфора – 16,2 т/км^3, что в связи с общим уменьшением биогенных веществ. При этом величина разложения на этот период составила 85% для азота и для фосфора, что указывает на увеличившуюся активность бактерий-редуцентов в пелагеальных слоях бассейна.

Величина потока седиментации азота в 2000 г. составила 146,4 т/км^3 для фосфора – 20,7 т/км^3, что соответствует примерно 22% от первичной продукции. Величина потока седиментации азота в период 2013-2017 г. составила 53,6 т/км^3 а для фосфора – 7,7 т/км^3, что соответствует примерно 22% от первичной продукции Осевшее органическое вещество поступает в донные отложения.

Поток выхода азота из осадочных пород в 2000 г составил 100,7 т/км^3, фосфора – 20,3 т/км^3. В то же время поток выхода азота в 2013-2017 г составил около 35,1 т/км^3 для азота и 4,1 т/км^3 для фосфора. Выход из осадков наряду с разложением в воде формирует пул доступных биогенов, поддерживающий вторичную продукцию, что, в связи с скращением потока выхода в поздний период, указывает на уменьшение акивности и распространения

фитопланктона в воде, что предотвращает риск цветения и эвтрофикации воды.

Денитрификация, как показано на представленной схеме, как в 2000 году, так и в период 2013-2017 г отсутствовала, будучи равной 0 т/км^3, что указывает на окислительные условия в осадках и воде, в то время как вклад азотофикации в Ботническом заливе составил 1.5 т/км^3 в 2000 г и 0 т/км^3 в период 2013-2017 г.

Захоронения азота в 2000 году составило 2,5 т/км^3, фосфора – 0,4 т/км^3, что на порядки ниже величины седиментационного потока. Это свидетельствует о высокой эффективности минерализации в осадках и преобладании возврата биогенов в воду над их окончательной элиминацией.

В Ботническом заливе бентосный азот составляет 787 т/км^3., бентосный фосфор - 50 т/км^3 Высокое отношение бентосных отложений азота к бентосным отношениям фосфора (~15,7) отражает существенно большую ёмкость осадков по азоту по сравнению с фосфором, что обусловлено различиями в механизмах сорбции.

Общая проверка баланса масс подтверждает корректность описания. В 2000 году для азота суммарный приход в растворённую неорганическую форму (рециклинг + выход + азотфиксация = 544,7 т/км^3 + 100,7 т/км^3 + 1,5 т/км^3 = 646,9 т/км^3) практически равен потреблению (665,9 т/км^3). Для фосфора (рециклинг + выход = 76,6 т/км^3 + 20,3 т/км^3 = 96,9 т/км^3) также близок к потреблению (95,4).

В 2013-2017 гг. суммарный приход для азота составлял 92 т/км^3 + 35,1 т/км^3 + 0,0 т/км^3 =127 т/км^3, что немного меньше чем потребление, равное 133 т/км^3. Для фосфора этот приход был равен 16,2 т/км^3 + 4,1 т/км^3=20,3 т/км^3, что немного превышает потребление, равное 19 т/км^3.

Небольшие расхождения находятся в пределах погрешности округления и допущений модели в обоих временных периодах.

Таким образом, система в Ботническом заливе в 2000 году находилась в достаточно стабильном состоянии, с доминированием объема входящего вещества над поглощаемым. В то же время в 2013-2017 гг система оставалась

в том же стабильном состоянии, и более того, для азота в этот период суммарный приход вещества в воду стал меньше потребления, что говорит о снижающейся вероятности эвтрофикации. Всецело можно легко проследить тенденцию того, что с течением лет объем биогенных веществ, циркулирующих в системе Ботнического залива, значительно сократился, на что повлияли принятые меры по очищению сточных вод и сокращению производственных выбросов в данном районе.

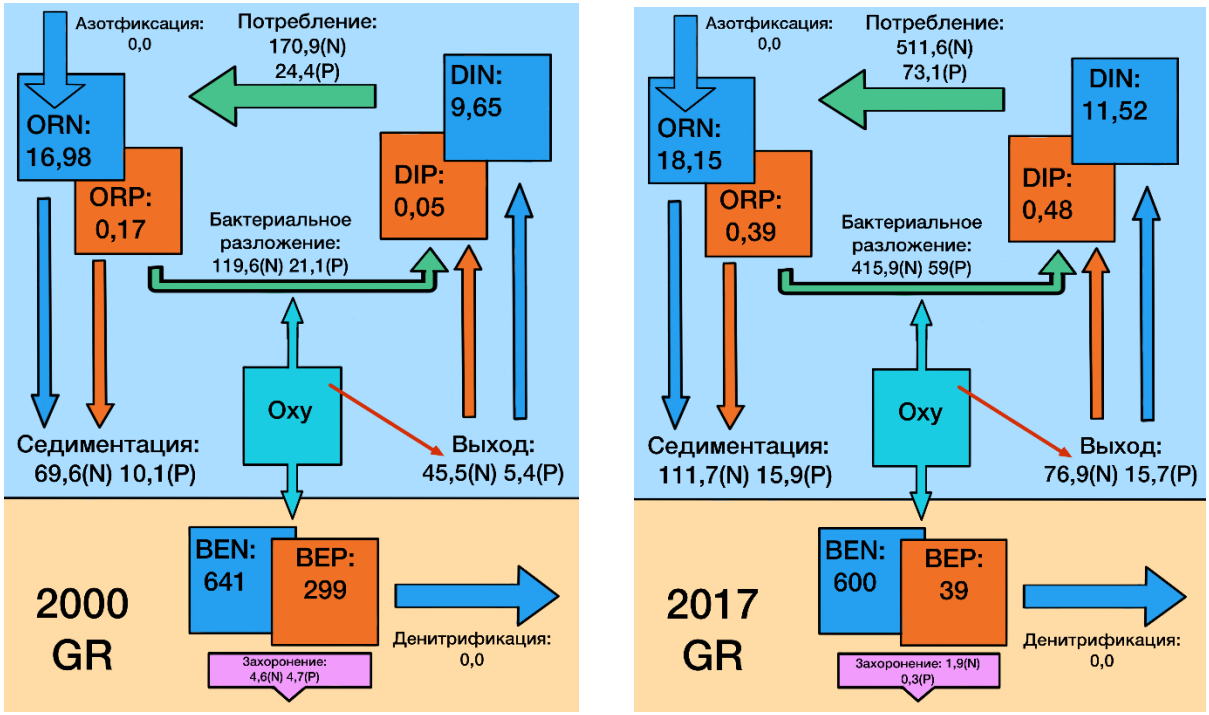


Рисунок 8 - Переменные состояния и внутренние биогеохимические процессы в блоках модели для Рижского залива в периоды 2000 г и 2013-2017 годов

В представленных данных для Рижского залива величина потребляемого фитопланктоном азота в 2000 году составил 170,9 т/км^3, фосфора – 24,4 т/км^3, что отражает масштаб связывания биогенов в органику. В то же время в период 2013-2017 гг. величина потребляемого азота составила 511,6 т/км^3, фосфора - 73,1 т/км^3, что указывает на общее повышение потребляемых

питательных веществ, а в связи с этим рост активности фитопланктона с течением лет.

В Ботническом заливе поток разложения азота до неорганических составляющих на момент 2000 года составляет 119,6 т/км^3, фосфора –21,1 т/км^3, что обеспечивает 82% и 80% от потребления соответственно. Таким образом, система функционирует преимущественно в регенеративном режиме. В период 2013-2017 гг. поток разложения азота составил 415,9 т/км^3, а фосфора – 59 т/км^3, что в связи с общим уменьшением биогенных веществ. При этом величина разложения на этот период составила 85% для азота и для фосфора, что указывает на увеличившуюся активность бактерий-редуцентов в пелагеальных слоях бассейна.

Величина потока седиментации азота в 2000 г. составила 69,6 т/км^3 для фосфора – 10,1 т/км^3, что соответствует примерно 22% от первичной продукции. Величина потока седиментации азота в период 2013-2017 г. составила 111,7 т/км^3 а для фосфора – 15,9 т/км^3, что соответствует примерно 22% от первичной продукции Осевшее органическое вещество поступает в донные отложения.

Поток выхода азота из осадочных пород в 2000 г составил 45,5 т/км^3, фосфора – 5,4 т/км^3. В то же время поток высвобождения азота в 2013-2017 г составил около 76,9 т/км^3 для азота и 15,7 т/км^3 для фосфора. Из-за достаточно высокого показателя выхода можно предположить, что активность фитопланктона в этом районе высока, из-за чего велик риск эвтрофикации вод.

Денитрификация, как показано на представленной схеме, как в 2000 году, так и в период 2013-2017 г отсутствовала (0 т/км^3), что указывает на окислительные условия в осадках и воде. Так же и вклад азотофикации в Рижском заливе составил 0 т/км^3 в 2000 г и 0 т/км^3 в период 2013-2017 г.

Захоронения азота в 2000 году составило 4,6 т/км^3, фосфора – 4,7 т/км^3, а в 2013-2017 1,9 т/км^3 для азота и 0,3 т/км^3 для фосфора, что на порядок ниже величины седиментационного потока.

В Рижском заливе BEN на момент 2000 года составляет 641 т/км^3, BEP – 299 т/км^3, а на момент 2013-2017 гг BEN составляет 600 т/км^3, а BEP – 39 т/км^3.

Отношение бентосных отложений азота к бентосным отношениям фосфора в 2013-2017 гг составляло около 15,4, что отражает существеный рост азота в сравнении с 2000 годом, где соотношение азота к фосфору в бентосных отложениях ровнялось 2, что обусловлено так же различиями в механизмах сорбции биогенов.

Общая проверка баланса масс подтверждает корректность описания. В 2000 году для азота суммарный приход в растворённую неорганическую форму 119,6 т/км^3 + 45,5 т/км^3 + 0 т/км^3 = 165,1 т/км^3, что достаточно близко к потреблению (170,9 т/км^3), при этом немного меньше его. Для фосфора суммарный приход составил 21,1 т/км^3 + 5,4 т/км^3 = 26,5 т/км^3, что также близко к потреблению (24,4 т/км^3), при этом немного превышая его.

В 2013-2017 гг. суммарный приход для азота составлял 415,9 т/км3 + 76,9 т/км3 + 0,0 т/км3 = 492,8 т/км3, что немного меньше чем потребление, равное 511,6 т/км3. Для фосфора этот приход был равен 59 т/км3 + 15,7 т/км3 = 74,7 т/км3, что немного превышает потребление, равное 73,1 т/км3.

Таким образом, система в Рижском заливе в 2000 году находилась в состоянии с умеренной первичной продукцией и сбалансированным круговоротом биогенов. В то же время в 2013–2017 гг. система претерпела значительное ухудшение - потребление азота и фосфора фитопланктоном выросло в три раза, что указывает на резкое усиление эвтрофикации. Поток выхода биогенов из донных отложений увеличился, а запасы бентосного фосфора сократились почти в 8 раз. Всецело можно проследить тенденцию того, что с течением лет экосистема Рижского залива перешла в режим самоподдерживающейся эвтрофикации, когда высвобождение фосфора из осадков дополнительно стимулирует рост водорослей, что требует не только сокращения внешних стоков, но и восстановления кислородного режима придонных слоёв.

Заключение

Подводя итог полученной информации, мы можем сделать определенные выводы. В Ботническом заливе в период с 2000 года по 2013-2017 гг наблюдается устойчивое сокращение поступления биогенов из всех трёх категорий источников. Суммарный речной сток органического азота уменьшился на 3640,5 т для разлагаемой фракции и на 14563 т для неразлагаемой, а поступление фосфора сократилось вдвое. Поступление азота из точечных источников сократилось с 3528 т/км³ до 540 т/км³, а фосфора - с 124,6 т/км³ до 54 т/км³. Поступление биогенов из атмосферы также демонстрирует снижение в поздний период.

Эти положительные изменения, как отмечалось выше, связаны с сокращением сельскохозяйственных и производственных стоков и модернизации очистных сооружений в северных бассейнах [9]. Как следствие, в Ботническом заливе снизились все биогеохимические потоки - потребление азота упало с 665,9 до 133 т/км³, а отношение бентосного азота к фосфору (~15,7) указывает на окислительные условия в осадках, препятствующие внутренней нагрузке. Согласно исследованиям Олега Савчука о динамике биогенов в Балтике 1970-2016 гг, бассейны с высоким отношением N:P в бентосе и устойчивой оксигенацией не требуют срочных мер по сокращению нагрузок, что согласуется с полученными данными [17].

Рижский залив показывает рост нагрузки и усиление эвтрофикации. Не смотря на некоторое снижение неорганического азота в речном стоке на 23978,5 т, точечные источники продемонстрировали резкий рост, поскольку мы наблюдаем рост органический азот на 1129 т/км³, неорганического - на 1130 т/км³, и достижение суммарного стока азота из локальных источников 3644 т/км³. Атмосферный сток азота в поздний период также был выше, чем в Ботническом заливе.

В бассейнах с высоким поступлением лабильной органики (в Рижском заливе её доля достигает 35% против 20–25% в Ботническом) процессы реминерализации и внутренней нагрузки протекают интенсивнее. Это

объясняет, почему потребление азота фитопланктоном выросло с 170,9 до 511,6 т/км³, а выход фосфора из осадков - с 5,4 т/км³ до 15,7 т/км³ [17].

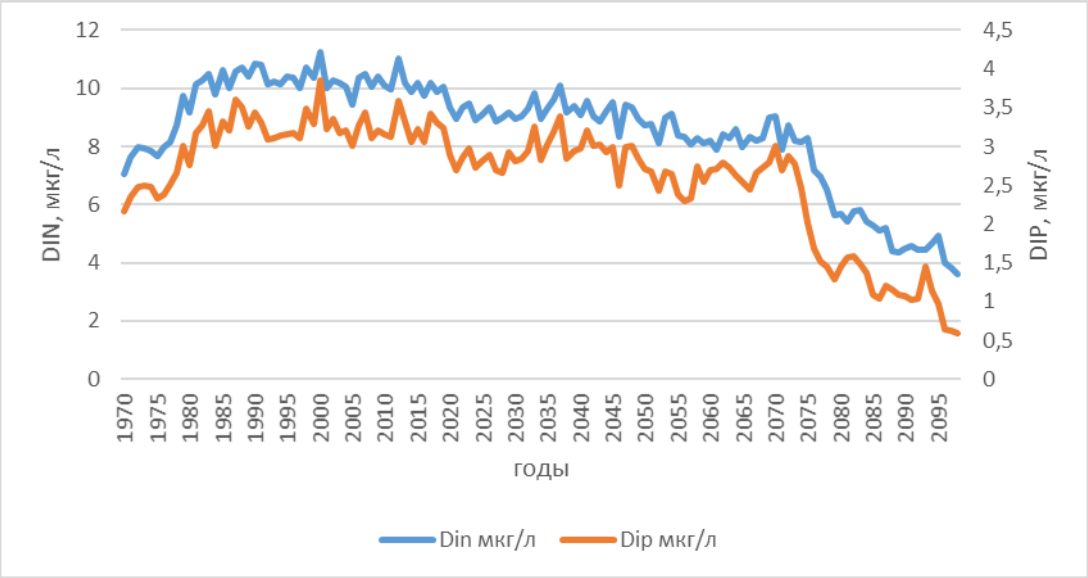
Важно при этом отметить, что фосфор в обоих заливах сокращается быстрее, чем азот, что объясняется тем, что фосфор легче удаляется из сточных вод методами осаждения, тогда как азот требует более дорогостоящих технологий (хлорирование, УФ-облучение).

По итогу мы видим, что Ботнический залив демонстрирует положительную динамику благодаря эффективному сокращению внешней нагрузки, сокращая риски эвтрофикации, в то время как Рижский напротив, испытывает растущую нагрузку, преимущественно из локальных точечных источников, что в сочетании с высокой долей органики в стоке и отсутствием денитрификации привело к значительному росту первичной продукции. Эти результаты говорят о том, что управление эвтрофикацией в Балтийском море должно учитывать не только суммарные внешние поступления, но и их качественный состав, соотношение форм азота и фосфора, долю лабильной органики, а также межбассейновый перенос, который может нивелировать локальные природоохранные усилия [17].

Глава 3. Прогноз изменения концентрации биогенов в Ботническом и Рижском заливах на 2098 год.

С помощью модели BALTSEM был проведен анализ данных о биогеохимических потоках в подбассейнах Балтийского моря - Ботническом и Рижском – за период с 1970 по 2025 года. На основе этих данных был создан прогноз временного хода концентраций веществ вплоть до 2098 года, с учетом влияния всех факторов, влияющих на концентрацию поступающего неорганического вещества в воды подбассейнов, их седиментации, отложения в бентосных породах и отдельно денитрификацию. Именно эти три параметра, а именно их изменения с течением лет, подробно описывались в приведенном анализе, где описывался ход изменений величины потоков на протяжении всего взятого временного отрезка 1970-2098 гг, минимум и максимум концентрации веществ в ретроспективном периоде (1970-2025 гг), а так же значения, которых достигали концентрации биогенов к прогнозируемому 2098 году.

А) Рижский залив



Б) Ботнический залив

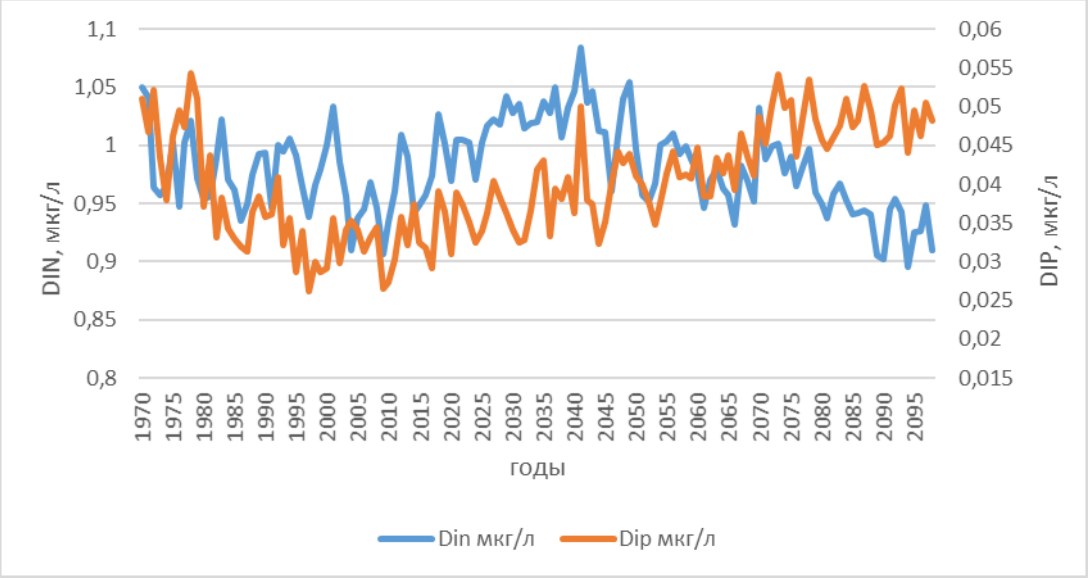


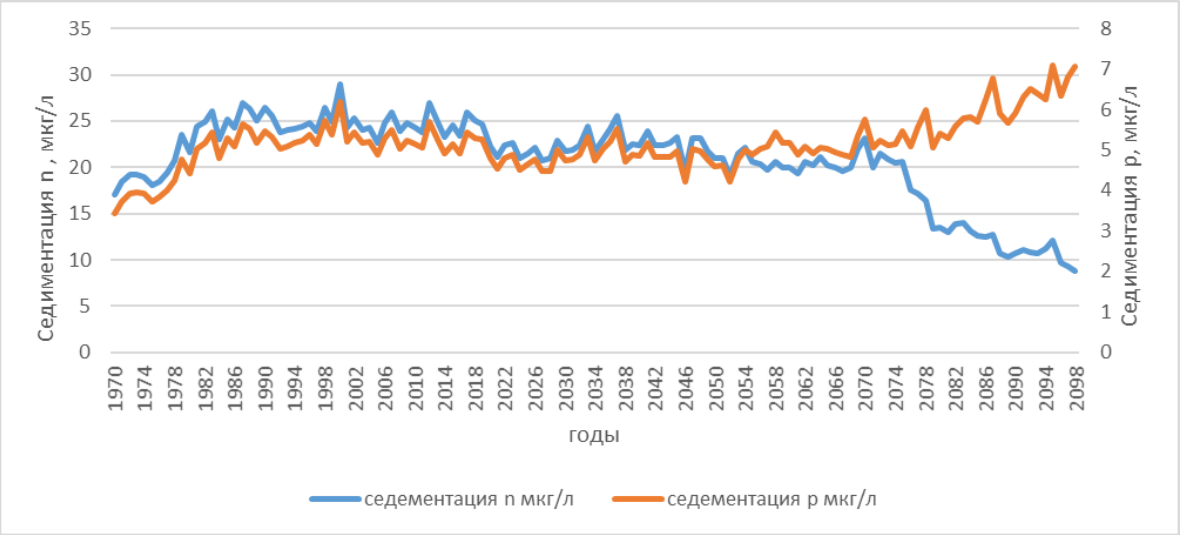
Рисунок 9 – Межгодовое изменение потока неорганических азота и фосфора в Рижском (а) и Ботническом (б) заливах

На графике изменения потока в Рижском заливе в период 1970-2098 гг мы видим достаточно высокую корреляцию азота и фосфора на протяжении всего отрезка времени. Достигнув пиковых значений к концу 1990-х, концентрация биогенов в дальнейшем постепенно снижалась вплоть до конца прогнозируемого периода. В Рижском заливе в ретроспективный период наблюдается высокая концентрация как азота, так и фосфора с выраженными пиками в 2000 году – 11,2 мкг/л для азота, 3,8 мкг/л для фосфора, что указывает

на значительную антропогенную нагрузку на залив, поступавшую преимущественно с речным стоком в этот период. Минимальные же значения биогенов приходились на 1970 год - 7 мкг/л для азота, 2,1 мкг/л для фосфора. В прогнозируемом будущем концентрации начинают постепенно снижаться, к 2098 году достигнув для азота 3,6 мкг/л и 0,6 мкг/л для фосфора, что может свидетельствовать о снижении антропогенной нагрузки.

В Ботническом заливе концентрации азота и фосфора значительно ниже, чем в Рижском, поэтому его значения колеблются в более узком диапазоне. Так пики концентрации азота в ретроспективный период в 1970 – 1,05 мкг/л и 2001 – 1,03 мкг/л, а минимума в 0,03 мкг/л она достигла к 2024 году, в то время как максимальная концентрация фосфора наблюдалась в 1978 и достигала около 0,05 мкг/л, в то время как минимум приходился на 2009 и достигала около 0,02 мкг/л. Заметно, что концентрация обоих видов биогенов заметно снижается к концу 1990-х началу 2000-х годов, после чего вплоть до конца прогнозируемого периода фосфор постепенно увеличивается, в то время как азот, достигнув пика в прогнозируемом 2041 году, начинает постепенно снижаться.

А)



Б)

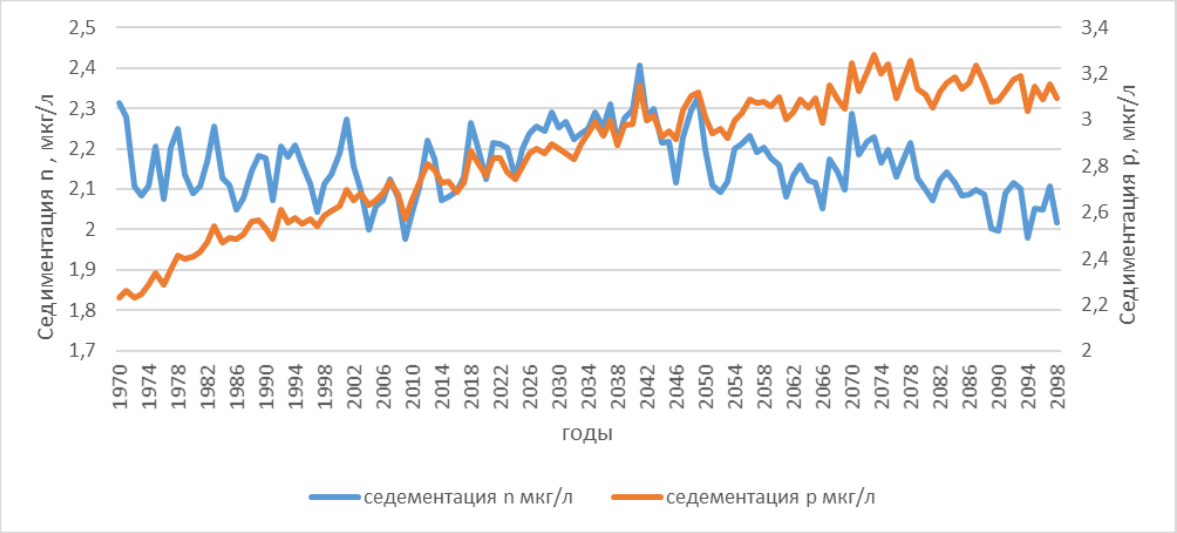


Рисунок 10 – Межгодовое изменение потока азота и фосфора участвующих в процессе седиментации в Рижском (а) и Ботническом (б) заливах

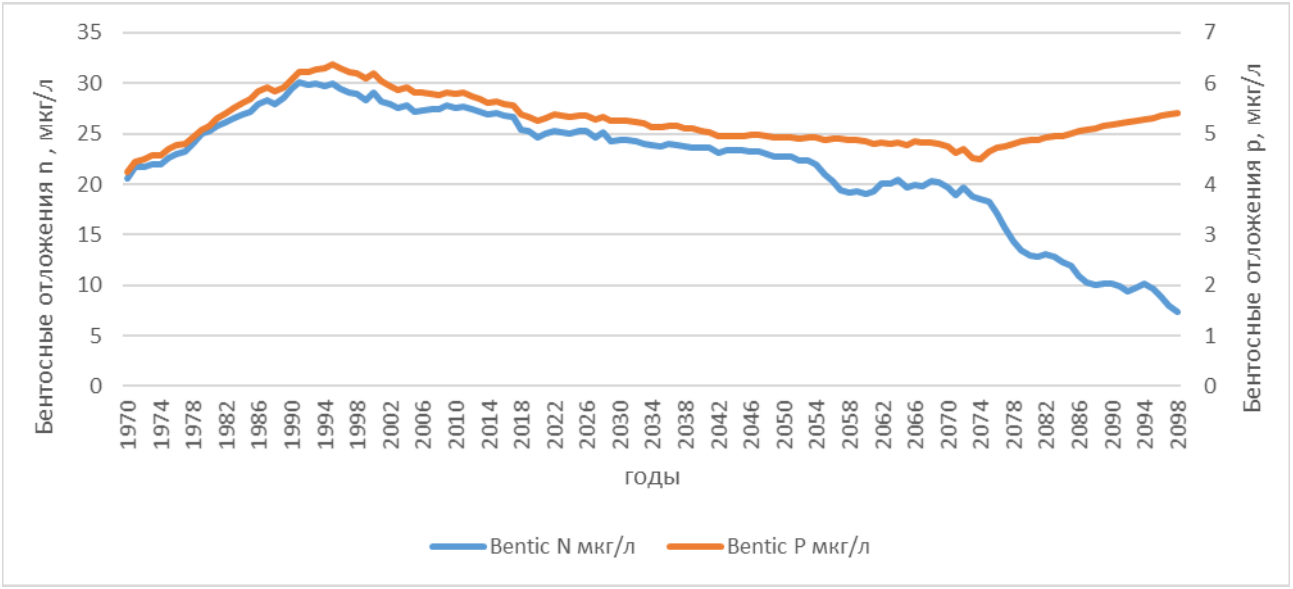
На графике межгодовой концентрации биогенов, участвующих в процессе седиментации в Рижском заливе можно заметить, что концентрации азота и фосфора имеют высокую корреляцию, что может быть связано именно с общим антропогенным загрязнением, оказывающими одинаково значительное влияние на концентрации биогенов в данном достаточно малом по площади районе.

Концентрации биогенов остаются примерно на одном уровне на протяжении большей части временного отрезка – с 1970 по 2055 год, после чего графики постепенно начинают расходиться, и концентрация участвующего в процессе седиментации фосфора начинает повышаться, в то время как концентрация

азота напротив начинает понижаться. Максимальные значения седиментации в ретроспективный период достигаются в 2000 году, где концентрация оседающего азота составила 29,0 мкг/л, а фосфора - 6,2 мкг/л, в то время как минимальные приходятся на 1970 - 17 мкг/л для азота и 3,4 мкг/л для фосфора. Постепенное сокращение поступления биогенных веществ в залив после 2000 года отражает некоторое улучшение экологической ситуации. К 2098 году прогнозируемые объем потока азота достигнет 8,7 мкг/л, а фосфора – 7,05 мкг/л.

В Ботническом заливе величины седиментационного потока значительно ниже, чем в Рижском, что обусловлено меньшей антропогенной нагрузкой на водосборной территории и более низкой продуктивностью экосистемы. Максимум седиментации азота здесь также приходится на 1970 год, достигая 2,3 мкг/л, что значительно меньше, чем в Рижском заливе, в то время как минимальное значение приходилось на 2009, достигая 1,9 мкг/л. Изменение потока фосфора в свою очередь имеет общий тренд повышения с течением лет, где минимальное значение приходится на тот же 1970 год и достигает 2,2 мкг/л, а минимальное на 2018 достигая 2,8 мкг/л. К 2098 году прогнозируемые объем потока азота после понижения достигнет 2 мкг/л, а фосфора напротив повысится до 3,1 мкг/л.

А)



Б)

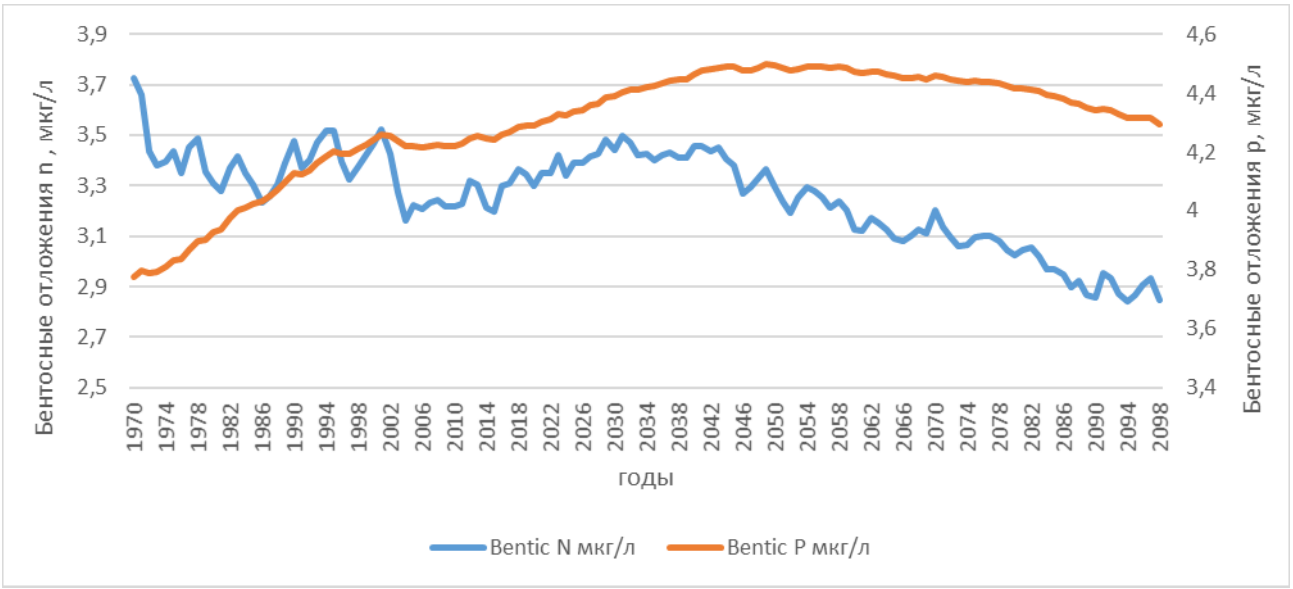


Рисунок 11 – Межгодовое изменение потоков азота и фосфора в бентосных отложениях Рижского (а) и Ботнического (б) заливов.

На графике концентрации биогенов потока в Рижском заливе видно, как концентрации азота и фосфора коррелируют друг с другом на протяжении долгого времени с 1970 по 2042 года, обладая практически идентичными участками повышения и понижения. Однако начиная с конца 2040-х годов, мы начинаем наблюдать значительные расхождения в межгодовом ходе концентрации биогенов – так мы видим, что концентрация фосфора в донных отложениях начинает значительно увеличиваться, что может

свидетельствовать об увеличении уровне кислорода в придонных слоях, предвещающих снижение риска гипоксии и образования мертвых зон.

В то же время концентрация азота в придонных слоях начинает быстро и достаточно сильно снижаться, достигая минимальной отметки на всем временном промежутке, что так же может свидетельствовать о снижении эвтрофикации и увеличении концентрации кислорода в придонных слоях. Наибольшее значение концентрации биогенов в бентосных отложениях в ретроспективный период приходится на 1991 для азота, где концентрация составила 30 мкг/л и 1995 для фосфора с концентрацией в 6,3 мкг/л, в то время как наименьшая концентрация наблюдается у азота и фосфора в 1970 году – 20,6 мкг/л для азота, 4,2 мкг/ для фосфора.

В 2098 году прогнозируемая концентрация азота в бентосных отложениях составила 7,36 мкг/л, а фосфора – 5,4 мкг/л.

В Ботническом заливе в то же время подобной тесной корреляции в межгодовом ходе изменения концентрации биогенов в придонных слоях не наблюдается из-за большего объема подбассейна и более рознящихся объемов биогенов поступающих в него из множества различных несвязанных между собой источников. На графике видно, что общий ход концентрации азота в бентосных отложениях имеет тренд на постепенное снижение с течением времени, имея наибольшее значение в 1970 году – 3,7 мкг/л, и опускаясь до в 2,8 мкг/л в 2098 году. В то же время график временного хода концентрации фосфора в бентосных отложениях с 1970 по 2051 год плавно повышался, и с наименьшего значения 3,77 мкг/л в 1970 году, достигнув пика в 2051 году 4,48 мкг/л, после чего вплоть до 2098 года концентрация начала плавно снижаться, достигнув 4,29 мкг/л.

Наибольшее значение концентрации азота в ретроспективный период наблюдалось в 1970 году – 3,7 мкг/л, а наименьшее в 2004 году – 3,1 мкг/л, в то время как для фосфора наибольшее значение наблюдалось на в 2013 - 4,2 мкг/л, а наименьшее так же в 1970 году – 3,7 мкг/л.

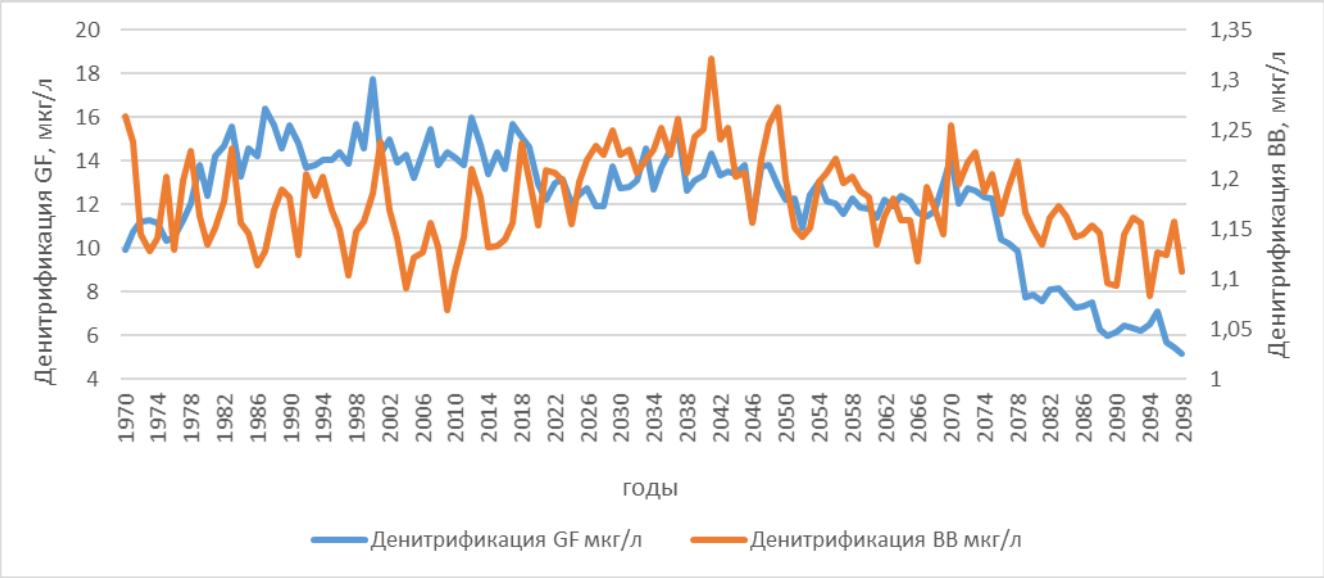


Рисунок 12 - Межгодовой ход денитрификации в Ботническом и Рижском заливах

На графиках изменения концентрации вещества, участвующем в процессе денитрификации заметны высокие нестационарные колебания на протяжении 128 лет. Для Ботнического залива наибольшая концентрация азота участвующего в процессе денитрификации составляет 1,26 мкг/л в 1970 году, а наименьшая – 1,06 мкг/л в 2009 году. Общий ход имеет волнообразные нестационарные колебания с пиковыми значениями в 1970, 2041 и 2070 гг на понижения концентрации азота. На момент прогнозируемого 2098 года концентрация снова значительно снизилась и достигла 1,1 мкг/л, что в сравнимо с уровнем в 2004 году.

Концентрация азота, задействованного в процессе денитрификации в Рижском заливе на протяжении взятого периода времени так же имеет достаточно сильные колебания в изменении уровня концентрации вещества. Здесь с течением времени можно выделить определенный тренд постепенного снижения концентрации, при этом так же имея пиковые значения в 2000, 2037 и 2070 годах. Наибольшее значение приходится именно на 2000 год, где концентрация азота равняется 17,8 мкг/л, а наименьшее приходится на 2024 и равняется 12 мкг/л. Непосредственно на прогнозируемый 2098 год, где концентация должна будет достигнуть 5,1 мкг/л.

С учетом того, что денитрификация в донных слоях происходит преимущественно в аноксийных условиях, общее снижение денитрификации в обоих подбассейнах с течением лет указывает на положительную динамику, связанную с понижением вероятного риска аноксийных условий в придонных районах и общее снижение поступающего в водоемы азота, что соответствует рисунку 10.

Заключение

В ходе выполнения работы была составлена общая физико-географическая характеристика Балтийского моря с акцентом на экосистемы Ботнического и Рижского заливов. Описаны биогеохимические циклы азота и фосфора, показана ключевая роль донных отложений как источника вторичного загрязнения, особенно в аноксических условиях, где фосфор высвобождается из комплексов с железом. Рассмотрены модели SANBALTS и BALTSEM: первая оценивает равновесное состояние экосистемы при заданных нагрузках, вторая, учитывая сезонную и межгодовую динамику, позволяет делать долгосрочные прогнозы до 2098 года. Полученные сведения создали основу для последующего анализа биогенной нагрузки и прогнозирования эвтрофикации.

Анализ внешней нагрузки показал, что Ботнический залив демонстрирует устойчивое сокращение поступления азота и фосфора из речных, точечных и атмосферных источников благодаря модернизации очистных сооружений и природоохранным мерам стран HELCOM. Как следствие, в этом заливе снизились все биогеохимические потоки - потребление азота фитопланктоном упало с 665,9 до 133 т/км³, а высокое отношение бентосного азота к фосфору, составляющее около 15,7, указывает на окислительные условия в осадках, препятствующие внутренней нагрузке. Рижский залив, напротив, испытывает растущую нагрузку, где точечные источники увеличили поступление азота до 3644 т/км³, потребление азота фитопланктоном выросло с 170,9 до 511,6 т/км³, а выход фосфора из осадков - с 5,4 до 15,7 т/км³. При этом фосфор в обоих заливах сокращается быстрее, чем азот, что объясняется более простым удалением фосфора методами осаждения при очистке сточных вод.

Прогноз с помощью модели BALTSEM до 2098 года показал, что в Рижском заливе концентрации DIN и DIP снижаются к концу периода до 3,6 и 0,6 мкг/л соответственно, однако бентосные отложения демонстрируют обратную тенденцию, где после 2040-х годов концентрация фосфора в осадках

начинает расти, а азота - сокращаться. Это указывает на активацию внутренней нагрузки, которая может нивелировать эффект от сокращения внешних поступлений. Денитрификация в Рижском заливе снижается с пика 17,8 мкг/л в 2000 году до 5,1 мкг/л в 2098 году, сохраняя высокие нестационарные колебания. В Ботническом заливе концентрации биогенов значительно ниже, бентосный азот снижается с 3,7 до 2,8 мкг/л, а денитрификация остаётся крайне низкой - 1,0-1,3 мкг/л, что свидетельствует об устойчиво окислительных условиях и стабильности системы.

Полученные результаты показывают, что Ботнический залив находится в благополучном состоянии с положительной динамикой, тогда как Рижский залив перешёл в режим самоподдерживающейся эвтрофикации за счёт внутренней нагрузки фосфора из донных отложений. Это означает, что простое сокращение внешних стоков без восстановления кислородного режима придонных слоёв может быть недостаточно для оздоровления экосистемы. Работа демонстрирует, что управление эвтрофикацией в Балтийском море должно учитывать не только суммарные внешние поступления, но и качественный состав стоков, а также внутрибассейновые процессы, которые могут усиливать или ослаблять антропогенное воздействие. Полученные выводы могут быть использованы для корректировки природоохранных стратегий HELCOM и при разработке региональных программ по снижению биогенной нагрузки на Балтийское море.

Список использованных источников

1. Hypoxia: Low or depleted oxygen in a water body often leads to 'dead zones' — regions where life cannot be sustained. — URL: (дата обращения: 27.05.2026).
2. Балтийское море // ЕСИМО (Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане). — URL: (дата обращения: 03.12.2025).
3. HELCOM. Inputs of nutrients (nitrogen and phosphorus) to the sub-basins (2022) // HELCOM core indicator report. — Helsinki Commission, 2024. — URL: (дата обращения: 03.12.2025).
4. Nitrogen cycling within suboxic and anoxic sediments from the continental margin of Western North America. — URL: (дата обращения: 27.05.2026).
5. Natural variability is a large source of uncertainty in future projections of hypoxia in the Baltic Sea // Communications Earth & Environment. — Springer Nature, 2021. — URL: (дата обращения: 01.06.2026).
6. Дегтярева Л.В., Попова Н.В., Азизов Э.Р. Азот в поровых водах донных отложений Северного Каспия. — URL: (дата обращения: 27.05.2026).
7. Биота Балтийского моря // Loodusveeb. — URL: (дата обращения: 20.11.2025).
8. Балтийское море // Большая российская энциклопедия. — URL: (дата обращения: 20.11.2025).
9. Цветкова Л.И. Донные отложения как источник фосфора и его роль в эвтрофировании водоема // Вестник СПбГАСУ. — Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. — URL: (дата обращения: 20.11.2025).
10. Елдышев Ю.Н. «Пост сдан, пост принят», или СПАСТИ БАЛТИКУ. — URL: (дата обращения: 01.06.2026).
11. HELCOM. Thematic Assessment of Eutrophication 2016–2021 (HOLAS III) // Baltic Sea Environment Proceedings. — No. 192. — Helsinki Commission, 2023.
12. HELCOM. Conclusions of the Thematic Assessment on Eutrophication, HOLAS III. — Helsinki Commission, 2023. — URL: (дата обращения: 27.05.2026).

13. Очистка сточных вод от азота и фосфора // АСН НПО Агросервис. — 19.10.2024. — URL: (дата обращения: 20.05.2026).
14. Очистка воды от азота и фосфора так же необходима, как и механическая очистка // Best Water Technology. — 09.04.2026. — URL: (дата обращения: 20.05.2026).
15. Savchuk O.P., Gustafsson B.G., Müller-Karulis B. BALTSEM — a marine model for decision support within the Baltic Sea Region // BNI Technical Report No. 7. — Baltic Nest Institute, Stockholm University, 2012. (дата обращения: — URL: (дата обращения: 01.06.2026).
16. Savchuk O.P. Простая по мере необходимости долговременная крупномасштабная модель моделирования биогеохимических циклов азота и фосфора в Балтийском море (SANBaLTS). — Версия 3. — Кафедра системной экологии, Стокгольмский университет, 2006. — URL: (дата обращения: 01.06.2026).
17. Савчук О.П. Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic Sea // Baltic Nest Institute, Центр Балтийского моря Стокгольмского университета. — Стокгольм, 22.03.2018. — URL: (дата обращения: 01.06.2026).
18. Ерёмина Т.Р. Балтийское море в настоящем и будущем: климатические изменения и антропогенное воздействие. — СПб.: ЛЕМА, 2016. — URL: (дата обращения: 20.05.2026).