Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Оценка биогеохимических изменений в водах Балтийского моря при разных сценариях биогенной нагрузки.

Исполнитель Кочуров Захар Андреевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель канд. геогр. 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)

«22» июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Введение 3
1.Общая характеристика Балтийского моря и особенностей климата 4
1.1 Физико-географическая характеристика Балтийского моря 4
1.2 Гидрометеорологические особенности 6
1.3 Биогенная нагрузка на водоем 8
2. Физико-биогеохимическая модель Балтийского моря SANBALTS 11
2.1 Описание модели SANBALTS 11
3.Оценка влияния биогенной нагрузки на биохимический поток. 18
3.1 Потоки захоронения азота и фосфора в Центральной Балтике и Финском заливе. 18
3.2 Оценка биогеохимических потоков при снижении нагрузок 24
Заключение 29

Введение

Эвтрофикация является одной из наиболее серьезных причин изменения экосистем Балтийского моря. Сравнительно небольшой объём и длительный период обновления вод Балтийского моря способствует их прогрессирующему эвтрофированию. На Балтике основные признаки эвтрофирования были установлены раньше, чем в других морских акваториях. Однако, проблема выявления причин эвтрофирования Балтийского моря и определения соотношения между природными и антропогенными составляющими весьма сложна и до сих пор остаётся актуальной.

Чрезмерные нагрузки азотом и фосфором от различных источников в пределах и вне водосборного бассейна являются главной причиной эвтрофикации Балтийского моря. Источниками избыточного поступления биогенных веществ в Балтийское море являются неочищенные или недостаточно очищенные муниципальные и промышленные сточные воды (точечные источники); рассредоточенные источники: сельское хозяйство (ненадлежащее хранение и утилизация отходов животноводства, избыточное внесение минеральных удобрений на поля); разбросанные поселения, не имеющие системы водоотведения и очистки сточных вод, атмосферное загрязнение. Наряду с внешними источниками, значительный вклад в нагрузку вносят внутренние источники. Большие запасы азота и фосфора могут поступать в водную толщу из донных отложений моря, увеличивая первичную продукцию водорослей. Захоронение N и P в грунтах – один из путей удаления биогенов из водной толщи наряду с их транспортом в Северное море и денитрификацией.

Акватория Финского залива разделена между тремя странами: Россия, Финляндия и Эстония. Проблема эвтрофикации этого водного объекта связана как с природными особенностями залива (ограниченный водообмен с Балтийским морем, сезонная стратификация и т.д.), так и с сильной антропогенной нагрузкой на эту экосистему (избыточное поступление питательных веществ из сельскохозяйственных и муниципальных источников).

Целью данной работы выступает оценка биогеохимических изменений в водах Балтийского моря при разных сценариях биогенной нагрузки.

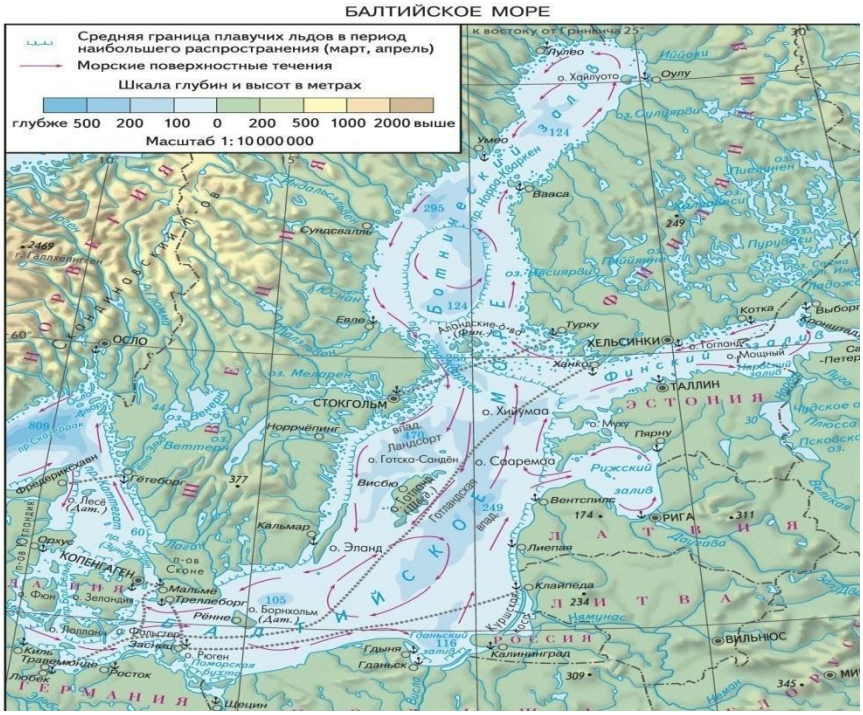
В данной работе мы исследуем что такое эвтрофикация, как она влияет на экологическое состояние Балтийского моря. Мы рассмотрим что такое план первоначальных действий Балтийского моря и к чему приводит его реализация.

Мы рассмотрим усредненные нагрузки за временной период 2013-2017 гг. и сравним их планом действий Балтийского моря. Также, мы оценим содержание биогеохимических потоков при различных сценариях биогенных нагрузок.

1.Общая характеристика Балтийского моря и особенностей климата

1.1 Физико-географическая характеристика Балтийского моря

Балтийское море - внутриматериковое море Атлантического океана, между Скандинавским полуостровом и материковыми берегами Северо-Западной Европы. Омывает берега Швеции, Финляндии, России, Эстонии, Латвии, Литвы, Польши, Германии, Дании. На юго-западе соединяется с Северным морем Датскими проливами. Морская граница Балтийского моря проходит по южным входам проливов Эресунн, Большой Бельт и Малый Бельт. Площадь 419 тыс. км2, объём 21,5 тыс. км3. Наибольшая глубина 470 м. Глубины над порогами Датских проливов: Дарсер – 18 м, Дрогден – 7 м. Балтийское море глубоко вдаётся в материк Евразия. Сильно изрезанная береговая линия образует многочисленные заливы и бухты. Наиболее крупные заливы: Ботнический залив, Финский залив, Рижский залив, Куршский залив, Щецинский залив, Гданьский залив. Берега Балтийского моря на севере высокие, скалистые, преимущественно шхерного и фьордового типов, на юге и юго-востоке – большей частью низменные, лагунного типа, с песчаными и галечными пляжами. Наиболее крупные острова: Готланд, Борнхольм, Сааремаа, Муху, Хийумаа, Эланд и Рюген. Много небольших скалистых островков – шхер, расположенных вдоль северных берегов (в группе Аландских островов свыше 6 тыс.)[Деев М.].


БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
Средняя граница плавучих льдов в период наибольшего распространения (март, апрель)
Морские поверхностные течения
Шкала глубин и высот в метрах
глубже 500 200 100 0 200 500 1000 2000 выше
Масштаб 1: 10 000 000
ОСЛО
СТОКГОЛЬМ
ХЕЛЬСИНКИ
ТАЛЛИН
РИГА
ВИЛЬНЮС
КОПЕНГАГЕН
Ботнический залив
Финский залив
Рижский залив
Куршский залив
Гданьский залив
Аландские о-ва (Фин.)
о. Хийумаа
о. Муху
о. Сааремаа
о. Готска-Сандён
о. Эланд
о. Борнхольм (Дат.)
о. Рюген
о. Зеландия
о. Фюн
о. Лолланд
о. Мён
о. Хайлуото
о. Готланд
о. Мощный
о. Висбю
о. Лесё (Дат.)
Турку
Ханко
Вааса
Умео
Оулу
Котка
Выборг
Таллин
Рига
Вентспилс
Клайпеда
Калининград
Гдыньск
Гданьск
Росток
Любек
Щецин
Кальмар
Норрчёпинг
Ландсорт
Гётеборг
Фредериксхавн
Мальмё
Треллеборг
Рённе
Копенгаген
Сундсвалль
Евле
Лулео
Ийоки
Пярну
Лиепая
Псковское оз.
Ладожское оз.
Онежское оз.
Чудское оз.
Плюсса
Нарва
Неман
Висла
Одра
Эльба
Трейве
Свеа
Ингерманландия
Карелия
Финляндия
Эстония
Латвия
Литва
Пруссия
Германия
Дания
Швеция
Норвегия
Россия
Скандинавский полуостров
Датские острова
Ютландский п-ов
п-ов Сконе
Готландская впад.
Данцигская впад.
Ландсортская впад.
Аландская впад.
Ботнический залив
Финский залив
Рижский залив
Куршский залив
Гданьский залив
Щецинский залив
Ладожское оз.
Онежское оз.
Чудское оз.
Псковское оз.
Пиелинен
Пурувеси
Сайма
Ладога
Онега

Балтийское море расположено между морской умеренной и континентальной субарктической климатическими зонами. Климат здесь весьма изменчив вследствие разнонаправленных воздействий влажного и относительно мягкого морского воздуха из Северной Атлантики и сухого и холодного воздуха из Евразии [под.ред Ерёминой Т.Р, Кондратьев С.А].

Площадь водосбора Балтийского моря составляет 1.74 млн. км2, что в 4 раза больше площади самого моря. Дренажный бассейн включает не только страны на побережье Балтики, но также охватывает отдельные области Украины, Белоруссии, Словакии, Чехии, Норвегии.

Рельеф дна Балтийского моря очень сложен. Обладая небольшими глубинами, оно целиком лежит в пределах материковой отмели средняя глубина составляет 51 м и наибольшая глубина 470 м (58°38′ с. ш., 18°14′ в. д.). В современных границах Балтийское море имеет площадь 419тыс. км2, объем 21,5 км3. Данное море находится в умеренном климатическом поясе, и ему присущ морской климат умеренных широт, но также Балтике свойственны черты континентального климата. Это связано со значительной протяженностью моря с севера на юг и с запада на восток, где появляются различия климатических условий в разных районах моря[Зенкевич 1963гг]. Особое влияние на погоду оказывают Исландский минимум, Сибирский и Азорский антициклоны. В холодные месяцы на Балтике, которыми являются январь и февраль температура воздуха в центральной части моря равна -3°С, а температура воды варьируется в диапазоне 0,7-2°С. В летний период температура воздуха меняется от 14 до 20°С, нагрев поверхностного слоя воды происходит неравномерно в разных частях моря и примерно составляет 15- 17°С. Из-за низкой солености поверхностных вод моря их плотность также невелика и уменьшается с юга на север [Зенкевич 1956гг].

Климатические факторы оказывают существенное влияние на экосистему Балтийского моря. Непосредственными причинами изменений в биологических сообществах являются изменения гидрологического и гидрохимического режима, обусловленные климатическими процессами [под.ред Ерёминой Т.Р, Кондратьев С.А].

1.2 Гидрометеорологические особенности

Балтийское море - полузакрытый бассейн, находящийся как под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов, так и близости суши. Кроме того, Балтийское море является одним из самых больших солоноватых морей в мире. Изучение изменения климата показали, что потепление в регионе Балтийского моря

сохраняется и будет продолжаться в течение всего двадцать первого века, что отразится в первую очередь на температуре воды и ледовых условиях. Также наблюдаются изменения в гидрологическом цикле, которые, как ожидается, будут становиться все более ярко выраженными в ближайшие десятилетия. Основными гидрометеорологическими характеристиками, в которых проявляется изменение климата, являлись повышение температуры поверхностного слоя моря, изменение стока рек, возможное распреснение, сокращение длительности ледового периода и площади покрытия льдом [под.ред Ерёминой Т.Р, Кондратьев С.А].

Анализ длительных рядов наблюдений свидетельствует об увеличении приповерхностной температуры воздуха в Балтийском регионе. При этом самым тёплым за последние 500 лет оказался XX век [Bates et al., 2008]. При этом в сезонной изменчивости температуры воздуха проявляется увеличение вегетационного периода, сокращение числа морозных дней, увеличение количества тепловых волн в южных районах Балтики[под.ред Ерёминой Т.Р, Кондратьев С.А].

В летний период верхний слой воды прогревается до 15-20 оС. Ниже поверхностного слоя температура падает до минимальной 0-2 оС (старая «зимняя» вода) в галоклине, ниже которого воды несколько теплее за счёт горизонтальной адвекции. В зимний период поверхностный слой моря охлаждается до точки замерзания или близкой к ней [Leppäranta and Myrberg, 2009].

Бассейн Балтийского моря получает ежегодно относительно высокий объём осадков – 450 км3. Для северной части моря характерно большое количество выпадающих осадков и низкое испарение, для юга – наоборот, малое количество осадков и высокое испарение [Устойчивый водный…, 2000]. Наибольшие ежемесячные значения осадков приходятся на позднее лето и осень, минимум наблюдается зимой и весной. Осенью и зимой выпадение осадков обычно связано с интенсивной циклонической деятельностью, в летний период половина осадков выпадает в виде ливней, что связано с конвекцией воздуха вследствие дневного прогрева земной поверхности [Leppäranta and Myrberg, 2009].Средняя относительная влажность воздуха над Балтикой составляет 80-90%. Максимум влажности наблюдается в центральных регионах крупных бассейнов моря, над островами и вдоль побережий значение влажности уменьшается, достигая минимальных значений. В целом, высокая влажность воздуха над Балтийским морем наблюдается в осенне-зимний периоды [Leppäranta and Myrberg, 2009].

Сток 10 крупнейших рек региона составляет 55 % от общего речного стока в море, при этом наибольший вклад вносит сток р. Нева (18 %). Около 80 % речного стока приходится на северную и восточную части бассейна [Leppäranta and Myrberg, 2009]. Важную роль в формировании среднегодового стока играет тип осадков на водосборном бассейне. Зимой осадки выпадают преимущественно в виде снега, и к концу зимы уровень Балтийского моря опускается до минимума. Наибольший расход рек и подъём уровня моря наблюдается весной или ранним летом и связан с таянием снега. С середины лета расход рек снижается в связи с возрастающим испарением и уменьшением осадков [под.ред Ерёминой Т.Р, Кондратьев С.А].

Морской лед формируется в Балтийском море каждый год, может наблюдаться в течение 7 месяцев и играет важную роль в формировании физических и экологических условий бассейна. Ледовый покров увеличивает альбедо, оказывает влияние на проникновение света в водную толщу, на газо- и теплообмен между морем и атмосферы. Весеннее таяние льда влияет на формирование стратификации водной толщи и солёность поверхностных вод [Leppäranta and Myrberg, 2009]. Ледовый сезон начинается приблизительно в середине ноября у северного побережья Ботнического залива, далее ледовый покров распространяется в южном направлении. Таяние льда начинается на юге в начале марта и продвигается в северном направлении. За последние 100 лет максимальная площадь ледового покрова Балтийского моря уменьшается со скоростью 3400 км2 за 10 лет[BACC, 2015]. За последние 20 лет снизилась частота суровых зим, причём зим с почти полным ледовым покрытием моря не наблюдалось более 25 лет.

Солёность вод Балтийского моря приблизительно в 5 раз ниже средней солёности Мирового океана. Так, на поверхности она составляет всего 7 ‰, а у дна – 11-13 ‰. 21 Солёность вод меняется с юго-запада на северо-восток. В районе Датских проливов солёность вод составляет более 20 ‰, а в Ботническом и Финском заливах она близка к пресной и изменяется от 0 до 3‰. Солёность вод определяется изменчивостью водообмена между Северным и Балтийским морями [Winsor et al. 2001, 2003; Meier and Kauker 2003; Gustafsson and Omstedt, 2009]. Существенное изменение придонной солёности вод в Балтийском море происходит при спорадических затоках североморских вод, в результате которых происходит обновление больших объёмов воды. Затоки вод приносят солёную, плотную и насыщенную кислородом воду, которая на пути следования с запада на восток заполняет глубоководные впадины в Балтийского моря. Благоприятные на первый взгляд последствия затока, приводящие к обновлению вод глубоководных впадин с одной стороны, способствуют усилению стратификации.

1.3 Биогенная нагрузка на водоем

Наряду с изменением климатических условий в Балтийском регионе наблюдается усиление антропогенной нагрузки на водоем. С 1950-х годов поступление биогенных веществ в Балтийское море увеличилось из-за роста населения и более интенсивного использования удобрений в сельском хозяйстве [Golubkov S., Alimov A.].

В связи с проблемой эвтрофирования Восточной части Финского залива наибольший интерес у исследователей в последние два десятилетия вызывало изучение режима биогенных соединений, в особенности фосфора, а также кислородного режима в придонных водах и анализ факторов, обусловливающих возникновение гипоксии [2, 6-8,10, 26,28]. Ухудшение кислородного режима может быть вызвано как природными факторами, так и антропогенным эвтрофированием [18-19, 30]. В Финском заливе систематически наблюдаются гипоксийно-аноксийные явления в придонных слоях воды. Условия их возникновения хорошо изучены [7,8].

На режим фосфатов придонного слоя оказывают влияние, которое проявляется в увеличении их концентраций, затоки вод повышенной солености из открытой части залива, приводящие к многократному увеличению содержания фосфатов в эстуарии Невы [21, 25]. Кроме того, запасы фосфора, накопленные в донных отложениях, играют роль дополнительного источника фосфатов при возникновении аноксийных условий в придонных слоях.

Результаты анализа данных наблюдений показывают значительную межгодовую изменчивость содержания кислорода в придонном слое и слабый линейный тренд на понижение. В тоже время отмечена тенденция к росту содержания фосфатов.

Действие природных процессов развивается одновременно с действием антропогенного фактора, выражающегося в высоком уровне биогенных соединений, поступающих в залив со стоком р. Нева. В период с 2007 по 2013 гг. речной сток в Финский залив превышал среднемноголетний 3490 м3/с, однако при этом поступление фосфора от этого источника было ниже, чем среднее многолетнее 6000 т/год. Снижение поступления фосфора обусловлено высокой степенью очистки сточных вод и мерами принятыми на заводе по производству удобрений «Фосфорит» в бассейне реки Луга [26,28].

Финский залив является одной из наиболее эвтрофированных частей Балтийского моря. Проблема эвтрофикации этого водного объекта связана как с природными особенностями залива (ограниченный водообмен с Балтийским морем, сезонная

стратификация и т.д.), так и с сильной антропогенной нагрузкой на эту экосистему (избыточное поступление питательных веществ из сельскохозяйственных и муниципальных источников) [Golubkov, Alimov]. Несмотря на сильное снижение биогенной нагрузки из точечных источников в Санкт-Петербурге в последние годы после модернизации городских очистных сооружений, концентрации питательных веществ в водах залива остаются высокими [Raateoja].

Обогащение питательными веществами и уменьшение последствий эвтрофикации были проблемой в регионе Балтийского моря на протяжении десятилетий. Значительные усилия и ресурсы были затрачены на исследования, мониторинг и оценку, а также на сокращение потерь, сбросов и выбросов азота и фосфора.

Статус эвтрофикации был оценен и классифицирован в 189 "районах" Балтийского моря, из которых 17 являются открытыми, а 172 - прибрежными районами.

Как только район определен как "затронутый эвтрофикацией", государства Балтийского моря должны принять меры по борьбе с эвтрофикацией, например, с помощью Плана действий по Балтийскому морю [HELCOM 2007], рекомендаций HELCOM или посредством внедрения соответствующих директив. План действий по Балтийскому морю, который реализует экосистемный подход к управлению деятельностью человека, влияющей на здоровье Балтийского моря, фокусируется на четырех тематических вопросах (также называемых сегментами), например, эвтрофикация, опасные вещества, морская деятельность и биоразнообразие.

План мероприятий по Балтийскому морю, или ПМБМ, представляет собой стратегическую программу мер и действий ХЕЛКОМ для достижения надлежащего экологического состояния моря, что в конечном итоге приведет к оздоровлению Балтийского моря.

Управленческая задача Плана мероприятий по Балтийскому морю в отношении эвтрофикации - минимизировать поступление биогенов в результате антропогенной деятельности. Региональные целевые поступления для достижения надлежащего экологического состояния Балтийского моря - это максимально допустимые поступления биогенов (MAI), показывающие максимальный уровень поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря с водосбора и из атмосферы. Для достижения надлежащего экологического состояния в отношении эвтрофикации максимальный уровень допустимых поступлений в Балтийское море составляет 792 209 тонн азота и 21 716 тонн фосфора ежегодно.

Чистые пороговые поступления биогенов (NIC) определяют максимальные поступления через воду и воздух, обеспечивающие надлежащее состояние в отношении эвтрофикации суб-бассейнов Балтийского моря для каждой страны. Они рассчитываются как доли максимально допустимых поступлений в каждый суб-бассейн с использованием пропорций поступлений азота и фосфора в базисный период 1997-2003 гг.

Все меры по сокращению поступления биогенов, необходимые для достижения NIC, должны быть полностью реализованы не позднее 2027 года с учетом задержки в сокращении поступления биогенов в море.

Сокращение поступлений биогенов в одном суб-бассейне может иметь последствия и для других суб- бассейнов. Следовательно, сокращение содержания азота и фосфора ниже NIC для одного конкретного суб-бассейна может быть пропорционально учтено страной при достижении своего порогового значения для другого суб-бассейна. Применение механизма перераспределения дополнительного сокращения на основе согласованных принципов будет описано в Руководящих принципах ХЕЛКОМ[9].

Поступление питательных веществ в Балтийское море происходит из природных источников и в результате различной деятельности человека на суше и на море, при этом питательные вещества попадают в море через воду и воздух. Поступление воды включает транспортировку по рекам и прямые сбросы из точечных источников, таких как очистные сооружения или промышленные предприятия. Речной вход является основным источником как азота, так и фосфора, при этом диффузные источники, такие как потери с сельскохозяйственных угодий в реки, составляют значительную долю, в то время как точечные источники вносят лишь несколько процентов от общего объема поступления. Воздушный транспорт также играет важную роль в поступлении азота, на долю которого приходится 27 процентов от общей нагрузки.

Чрезмерное антропогенное поступление питательных веществ в Балтийское море в прошлом привело к накоплению значительного количества фосфора в донных отложениях. В условиях гипоксии или низкого уровня кислорода фосфат высвобождается из отложений, тем самым увеличивая общую нагрузку на морскую экосистему питательными веществами и еще больше подпитывая порочный круг эвтрофикации в Балтийском море. Поступление питательных веществ почти во все суббассейны Балтийского моря значительно сократилось, при этом за последние два десятилетия все Договаривающиеся стороны ХЕЛКОМ добились существенного

сокращения на 12 процентов по азоту и 26 процентов по фосфору. Несмотря на сокращение поступления, концентрации питательных веществ в море не снизились в той мере, как это ожидалось. Длительное время пребывания воды в открытом Балтийском море в качестве, а также механизмы обратной связи, такие как высвобождение фосфора из бескислородных отложений и преобладание цветения азотфиксирующих цианобактерий в суббассейнах Балтийского моря, являются процессами, которые замедляют восстановление из эвтрофированного состояния (HELCOM 2014a, Vahtera et al., 2007).

Наряду с антропогенной нагрузкой значительный вклад в эвтрофирование моря (особенно в случае фосфора) вносит "внутренняя нагрузка" - запасы фосфора, накопленные в донных отложениях, поступающие обратно в воду в бескислородных условиях.

Тем не менее, первоначальные целевые показатели по поступлению питательных веществ, установленные первоначальным планом действий по Балтийскому морю (BSAP), принятым в 2007 году, не были достигнуты к 2021 году. Большая часть сокращений до настоящего времени была достигнута за счет мер, направленных на точечные источники, такие как очистные сооружения и промышленные предприятия, а также поступление азота по воздуху, в первую очередь за счет сокращения выбросов в энергетическом и транспортном секторах.

2. Физико-биогеохимическая модель Балтийского моря SANBALTS

2.1 Описание модели SANBALTS

Широкое распространение в океанологии получило применение математических моделей экосистемы Балтийского моря. Моделирование позволяет понять, как функционирует исследуемая система в настоящем какие факторы оказывают на нее наибольшее влияние и как будет функционировать эта экосистема в будущем при различных сценарных расчетах. одна из таких моделей - модель SANBALTS (**S**imple **A**s **N**ecessary **L**ong-**T**erm large-**S**cale simulation)

Spatial resolution – six of the sub-basins: the Bothnian Bay (BB), the Bothnian Sea (BS), the Gulf of Finland (GF), the Gulf of Riga (GR), the Danish Straits (DS), and the

Kattegat (KT) are treated as homogeneous boxes, while the Baltic Proper is split into the surface (BPs, 0-60 m) and deep (BPd, 60-bottom) boxes.

Variables – in each of the boxes nutrient dynamics are described by six pelagic (**ONS, ON, DIN, OPS, OP, DIP** in tons km^{-3} numerically equal to mg m^{-3}) and two benthic (**BEN, BEP** in tons km^{-2} or g m^{-2}) state variables. **DIN** and **DIP** represent dissolved inorganic nitrogen and phosphorus, **ON** and **OP** include nitrogen and phosphorus content in all the labile organic matter fractions – dead and alive, dissolved and particulate, – while **ONS** and **OPS** represent dissolved refractory fractions of organic matter. Benthic nitrogen and phosphorus are considered as representation of bioavailable fractions only. In the deep box of the Baltic Proper (BPd) the average oxygen concentration (**OX** in Kt km^{-3} or g m^{-3}) is also simulated as a regulator of nutrient cycles.

Interactions – biogeochemical fluxes that together with water transports and external inputs define nutrient concentrations in the model are primary production, nitrogen fixation, pelagic recycling, sedimentation, output from the sediments, denitrification in the sediments and in the water column of BPd, and burial (Fig.2).

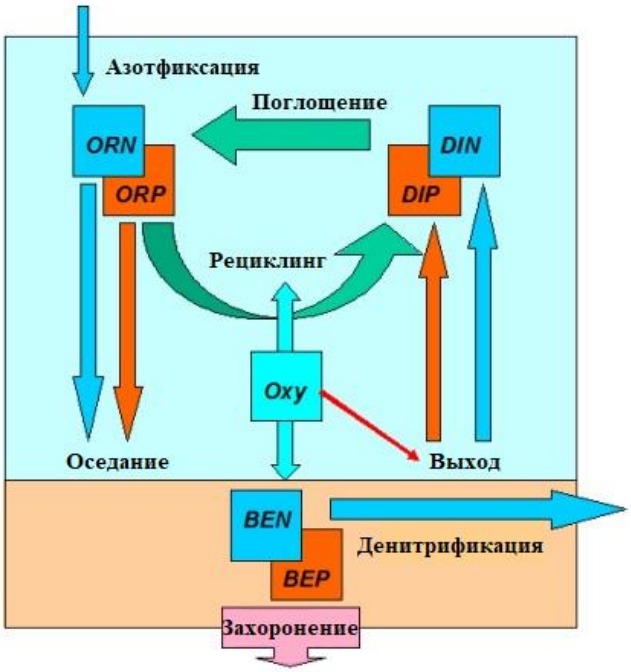


Рисунок x – Блок-схема модели SANBALTS. **ORN**, **ORP** – устойчивые фракции органического азота и фосфора в мг/м^3, **DIN**, **DIP** –растворенные неорганические азот и фосфор в мг/м^3, **BEN**, **BEP** – легкоразлагаемые фракции азота и фосфора донных отложенийв г/м^2, **Oxy** – растворенный кислород в г/м^3

В модели SANBALTS проводится учет основных источников поступления и расходования биогенов. Эти источники определяют размер внутренних запасов питательных веществ и, таким образом, регулируют процесс эвтрофикации в Балтийском море. В частности, наиболее важными явлениями, которые должны быть воспроизведены моделями эвтрофикации, являются: а) пространственные градиенты условий окружающей среды и ограничения питательных веществ, б) взаимосвязь основных бассейнов Балтийского моря, в) нерегулярная вентиляция глубоководных слоев, подверженных гипоксии, затоками соленой воды, г) окислительно-восстановительные изменения связанного азота и биогеохимические циклы фосфора, и d) фиксация азота цианобактериями.

2.2 Сценарии биогенной нагрузки на водоем

В программе показаны различные источники поступления азота и фосфора в море, такие как реки, точечные источники и попадание из атмосферы. На примере модели BSAP мы рассмотрим максимально допустимые поступления азота и фосфора по плану первоначальных действий по Балтийскому морю. В программе приведены данные: поступление 601713,9 тонн/год азота и 21059,2 тонн/год фосфора из рек, 278378,8 тонн/год азота и 6314,6 тонн/год попадание из атмосферы и 0 азота и фосфора из точечных источников. Можно подробнее рассмотреть все входящие данные каждого бассейна модели BSAP в таблице 1 и 2. В первой таблице мы видим максимально допустимые поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря по плану первоначальному действий по Балтийскому морю, поступающие из рек, а в таблице 2 поступающие из атмосферы.

Таблица 1.Максимально допустимые поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря, поступающие с реками (т/год) по сценарию BSAP.

Бассейн/Вещество	Органический N	Неогранический N	Органический P	Неорганический P
Ботнический залив	35569	15867,4	1721,3	863,8
Ботническое море	32768	24018,4	1523	933,8
Центральная Балтика	116572,2	116686,4	4812	1933,6
Финский залив	60466,1	46213,6	3889,8	969,7
Рижский залив	36228,8	23548,5	681,6	748,8
Датский пролив	9720	21173	725,6	683,5
Каттегат	17941,9	26314,6	957,8	614,9
Итого	309266	273821,9	14311,1	6748,1

Таблица 2.Максимально допустимые поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря, поступающие из атмосферы (т/год) по сценарию BSAP.

Бассейн/Вещество	Органический N	Неогранический N	Органический P	Неорганический P

Ботнический залив	1763,9	8819,7	0	561,9
Ботническое море	5439,3	27196,5	0	1177,6
Центральная Балтика	25809,6	129047,8	0	3204,9
Финский залив	2565,6	12828,2	0	445,4
Рижский залив	2003	10015,2	0	270,1
Датский пролив	4742,1	23710,7	0	318,2
Каттегат	4072,9	20364,3	0	336,5
Итого	46396,4	231982,4	0	6314,6

В модели SANBALTS представлены также данные нагрузок, усредненные за 2013-2017 гг. В программе приведены данные: попадание 575427 тонн/год азота и 23815 тонн/год фосфора из рек, 275976 тонн/год азота и 6211 тонн/год фосфора попадание из атмосферы, 29112 тонн/год азота и 1562 тонн/год фосфора из точечных источников.

В таблицах 3-5 приведены нагрузки от рек, точечных источников и из атмосферы на подбассейны Балтийского моря.

Таблица 3.Максимально допустимые поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря, поступающие из рек (т/год) за период 2013-2017 гг.

Бассейн/Вещество	Органический N	Неогранический N	Органический P	Неорганический P
Ботнический залив	33704	14729	1553	863
Ботническое море	21205	18652	1002	695
Центральная Балтика	79963	171039	7560	4281
Финский залив	48077	37156	2349	1083
Рижский залив	27719	45482	1047	1001
Датский пролив	5418	26595	588	509
Каттегат	12910	32778	837	447
Итого	228996	346431	14936	8879

Таблица 4.Максимально допустимые поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря, поступающие из точечных источников (т/год) за период 2013-2017 гг.

Бассейн/Вещество	Органический N	Неогранический N	Органический P	Неорганический P
Ботнический залив	1822	1822	59	59
Ботническое море	2163	2163	107	107
Центральная Балтика	3263	3263	226	225
Финский залив	4641	4641	208	207
Рижский залив	270	270	27	27
Датский пролив	1390	1390	106	106
Каттегат	1007	1007	49	49
Итого	14556	14556	782	780

Таблица 5.Максимально допустимые поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря, поступающие из атмосферы (т/год) за период 2013-2017 гг.

Бассейн/Вещество	Органический N	Неогранический N	Органический P	Неорганический P
Ботнический залив	1503	7514	0	548
Ботническое море	4689	23443	0	1006
Центральная Балтика	25465	127325	0	3414
Финский залив	2904	14521	0	356
Рижский залив	1804	9018	0	263
Датский пролив	5294	26470	0	290
Каттегат	4338	21688	0	334

Итого	45997	229979	0	6211

Рассмотрим разницу биогенной нагрузки азота на графике 1. Здесь мы видим, что значения за период 2013-2017 гг. меньше, чем предполагалось по плану первоначальных действий (BSAP) из рек на 26 286,9 т/год, как и попадание из атмосферы меньше на 2 402,8 тонн/год, а вот из точек загрязнения наоборот за 2013-2017 гг. значения азота были больше на 29 112 тонн/год, чем предполагалось в плане первоначальных действий по Балтийскому морю.

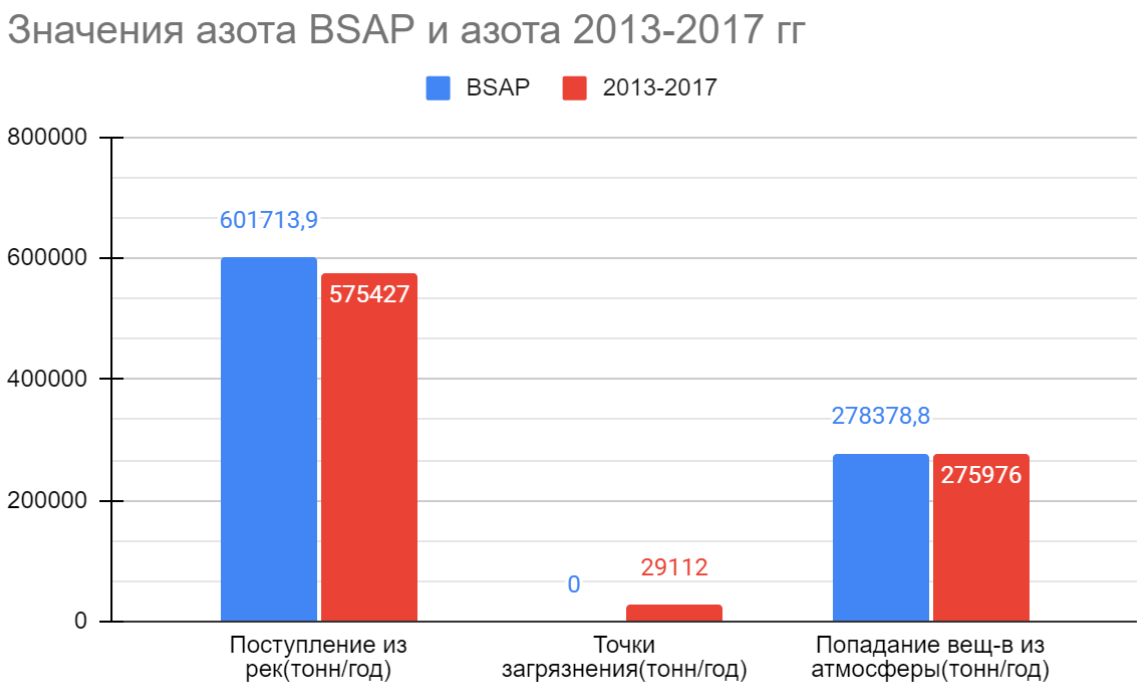


График 1. Поступление азота от различных источников по сценарию BSAP и усредненных данных 2013-2017 гг.

Также, рассмотрим разницу биогенной нагрузки фосфора на графике 2. Мы видим, что здесь наоборот фосфора больше, чем предполагалось по плану первоначальных действий(BSAP) из рек на 2 755,8 тонн/год, как и попадание из атмосферы меньше на 103,6 тонн/год, что является незначительной разницей. Значения биогенной нагрузки фосфора из точечных источников за период 2013-2017 гг. больше на 1 5562 тонн/год, чем значения по плану первоначальных действий по Балтийскому морю.

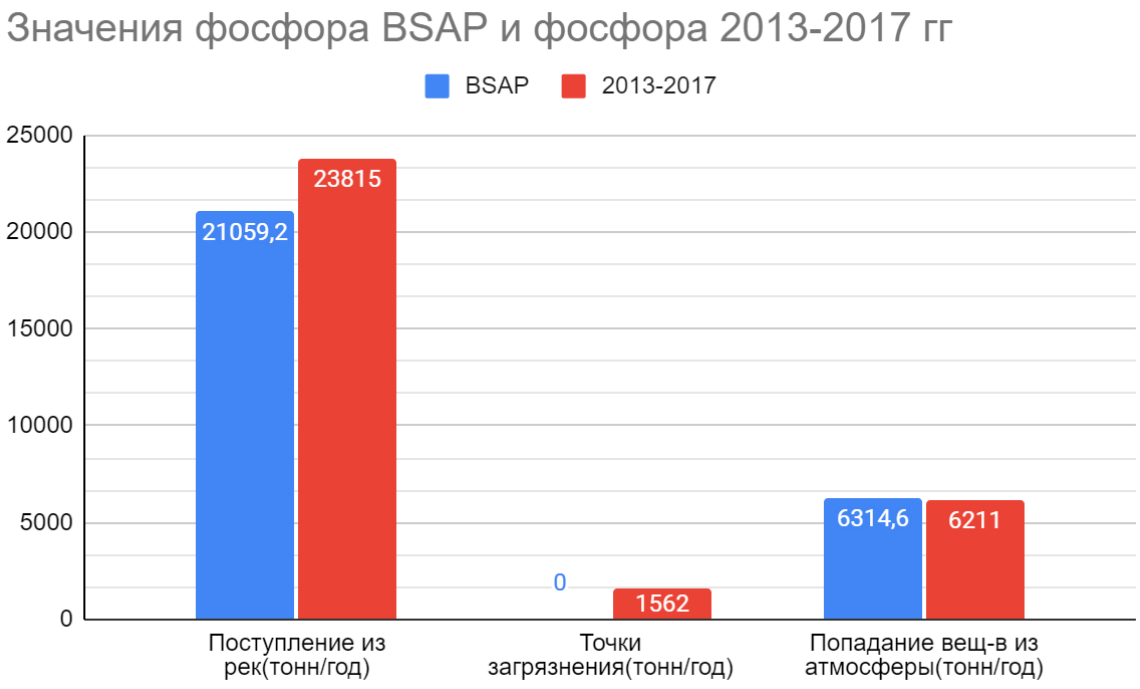


График 2. Поступление фосфора от различных источников по сценарию BSAP и усредненных данных 2013-2017 гг.

3.Оценка влияния биогенной нагрузки на биохимические потоки в Балтийском море.

3.1 Потоки захоронения азота и фосфора в Центральной Балтике и Финском заливе.

Рассмотрим визуализацию результатов моделирования содержания азота по плану первоначальных действий по Балтийскому морю на рисунке 2. Наибольшее загрязнение мы видим в Рижском заливе, оно составляет 41,6 мкмоль/литр, а наименьшее в Каттегате, что составляет 17 мкмоль/литр. Также, мы рассмотрим детальнее Центральное Балтийское море и Финский залив. В Финском заливе загрязнения азотом составляют 24,6 мкмоль/литр. В Центральном Балтийском море мы видим гипоксическую зону размером с 26 928 км2. В Центральном Балтийском море азотное загрязнение составляет 18,5 мкмоль/литр.

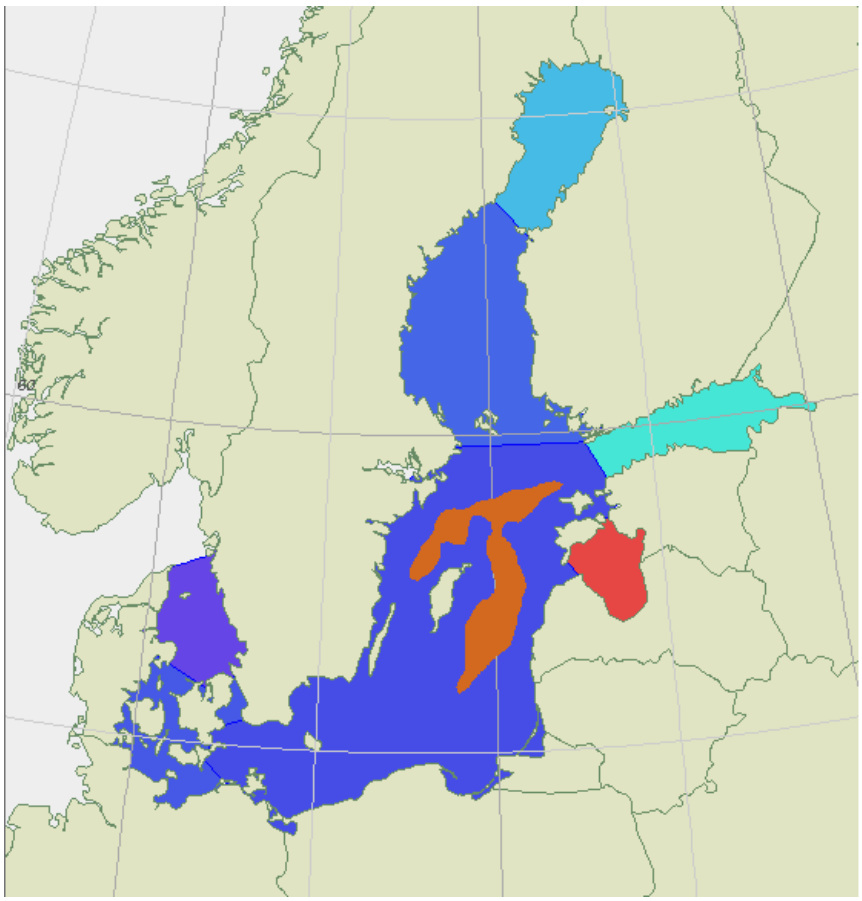


Рисунок 2. Визуализация результатов моделирования содержания азота BSAP.

Также, рассмотрим визуализацию результатов моделирования распространения фосфора, составленную по плану первоначальных действий по Балтийскому морю на рисунке 3. Наибольшее загрязнение мы видим в Рижском заливе, составляющие 0,7

мкмоль/литр, а наименьшее в Ботническом заливе, составляющее 0,2 мкмоль/литр. Детальнее рассмотрим Финский залив и Центральное Балтийское море: в Финском заливе загрязнения составляют 0,6 мкмоль/литр, а в Центральной части Балтийского моря 0,5 мкмоль/литр. И мы видим ту же гипоксическую зону размером с 26 928 км2.

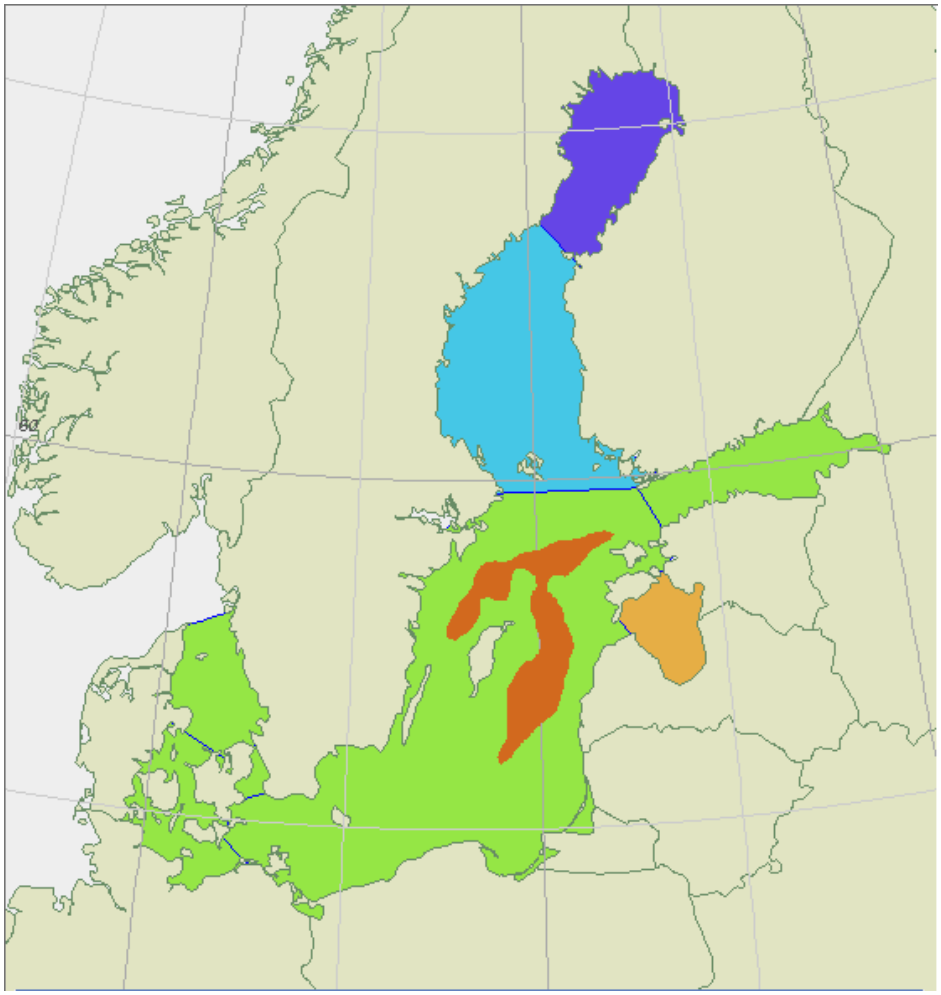


Рисунок 3. Визуализация результатов моделирования содержания фосфора BSAP.

Стоит отметить потоки DIN и DIP uptake — это сколько азота и фосфора забирает фитопланктон из воды, то есть по сути первичная продукция, и N fixation — это сколько молекулярного азота усваивают цианобактерии. Мы рассмотрим данные для каждого периода в таблицах 6,7,8.

Таблица 6. Количество азота и фосфора, который забирает фитопланктон и количество молекулярного азота, усваивающийся цианобактериями(10^3 тонн/год) по BSAP.

Бассейн/Вещество	DIN	DIP	N
Ботнический залив	128,8533038	18,40761482	0
Ботническое море	946,3406063	135,1915152	0
Балтийское море 0-60м	4484,960162	656,9077186	113,3938679
Финский залив	401,4554423	57,35077747	0
Рижский залив	362,3270971	51,76101388	0
Датский пролив	552,8648001	79,18369945	1,421096035
Каттегат	706,9071096	101,1379641	1,058638758
Балтийское море 60-до дна	0	0	0

Рассмотрим визуализацию результатов моделирования содержания азота по данным усредненных нагрузок за 2013-2017 гг. на рисунке 4. Наибольшее загрязнение мы видим в Рижском заливе, составляющие 33,6 мкмоль/литр, а наименьшее в Ботническом море, что составляет 16 мкмоль/литр. Детальнее мы рассмотрим Финский залив и Центральную часть Балтийского моря. В Финском заливе загрязнения азотом составляют 21,2 мкмоль/литр. В Центральном Балтийском море азотное загрязнение составляет 16,5 мкмоль/литр. В Центральном Балтийском море мы видим гипоксическую зону размером с 31 473 км2, что превышает зону, если сравнивать с показателями BSAP.

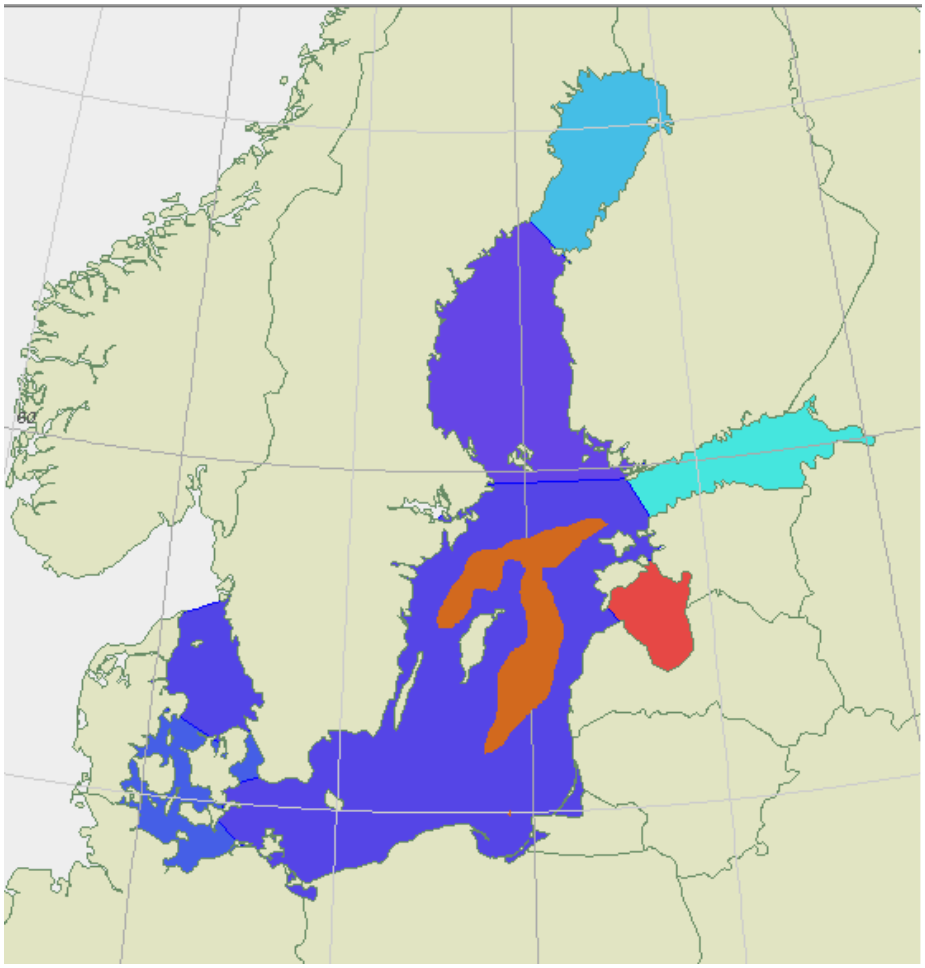


Рисунок 4. Визуализация результатов моделирования содержания азота по данным усредненных нагрузок за 2013-2017 гг.

Также, рассмотрим визуализацию результатов моделирования содержания фосфора, по данным усредненных нагрузок за 2013-2017 гг. на рисунке 5. Наибольшее загрязнение мы видим в Рижском заливе, составляющие 0,9 мкмоль/литр, а наименьшее в Ботническом заливе, составляющее 0,2 мкмоль/литр. Детальнее рассмотрим Финский залив и Центральное Балтийское море: в Финском заливе загрязнения составляют 0,6 мкмоль/литр, а в Центральной части Балтийского моря 0,6 мкмоль/литр. И мы видим гипоксическую зону размером с 31 473 км2.

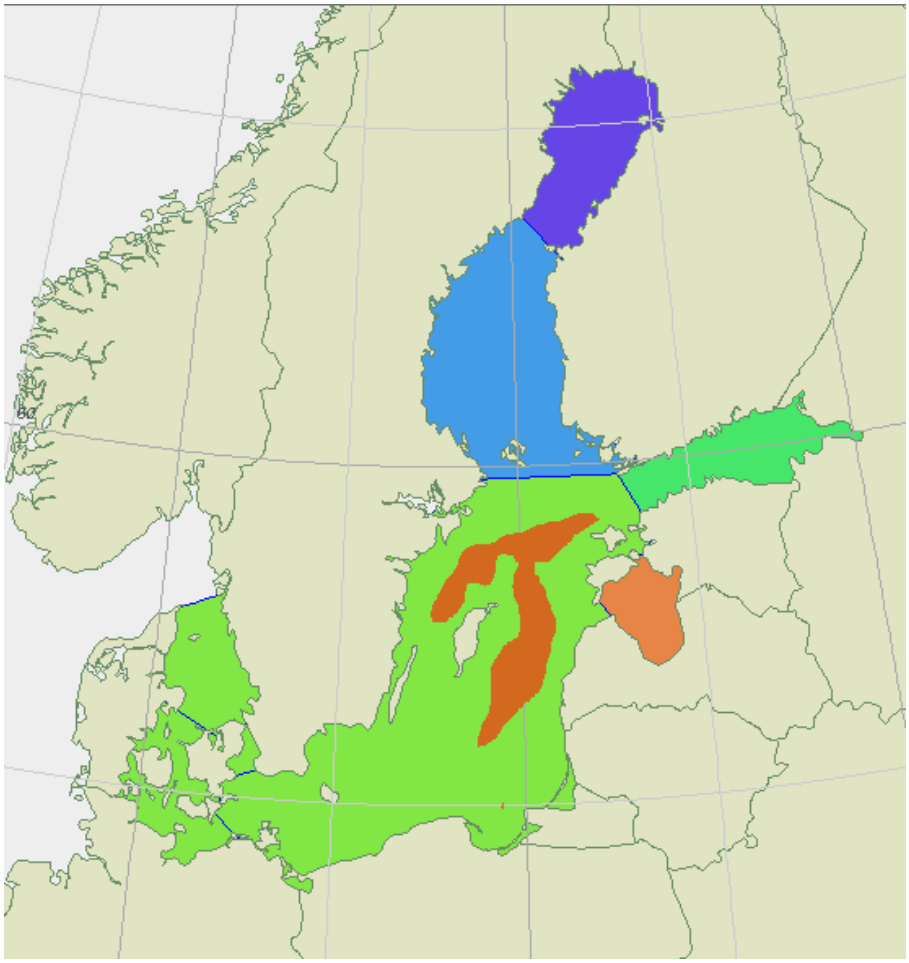


Рисунок 5. Визуализация результатов моделирования содержания фосфора по данным усредненных нагрузок за 2013-2017 гг.

Таблица 7. Количество азота и фосфора, который забирает фитопланктон и количество молекулярного азота, усваивающийся цианобактериями(10^3 тонн/год) по данным усредненных нагрузок за 2013-2017 гг.

Бассейн/Вещество	DIN	DIP	N
Ботнический залив	133,0031227	19,00044609	0
Ботническое море	1167,750628	166,8215183	0
Балтийское море 0-60м	5019,146837	747,8925681	216,1011393
Финский залив	438,9693997	62,70991425	0
Рижский залив	511,5686774	73,08123963	0

Датский пролив	615,511424	88,36447445	3,039897096
Каттегат	744,6111089	106,5946849	1,551685445
Балтийское море 60-до дна	0	0	0

Рассмотрим содержание азота и фосфора Финского залива и Центральной Балтике на графиках 3 и 4. На графиках представлено Балтийское море, разделенное на 2 части: Балтийское море от 0 до 60 метров глубины и Балтийское море от 60 метров до дна. Таким образом, мы видим на графиках, что содержание азота в Финском заливе и Центральной Балтике ниже за период 2013-2017 гг., чем по предполагаемому плану действий. Сравнение содержания азота в Финском заливе и Центральной Балтике показало, что содержание азота в Финском заливе за период 2013-2017 гг. меньше, чем предполагалось по BSAP на 3,4 мкмоль/литр, а в Центральной Балтике в среднем на 2 мкмоль/литр. Содержание фосфора же наоборот,за период 2013-2017 гг. больше, чем BSAP в Центральной Балтике в среднем на 0,15 мкмоль/литр, а в Финском заливе мы видим одинаковое содержание фосфора в обоих периодах.

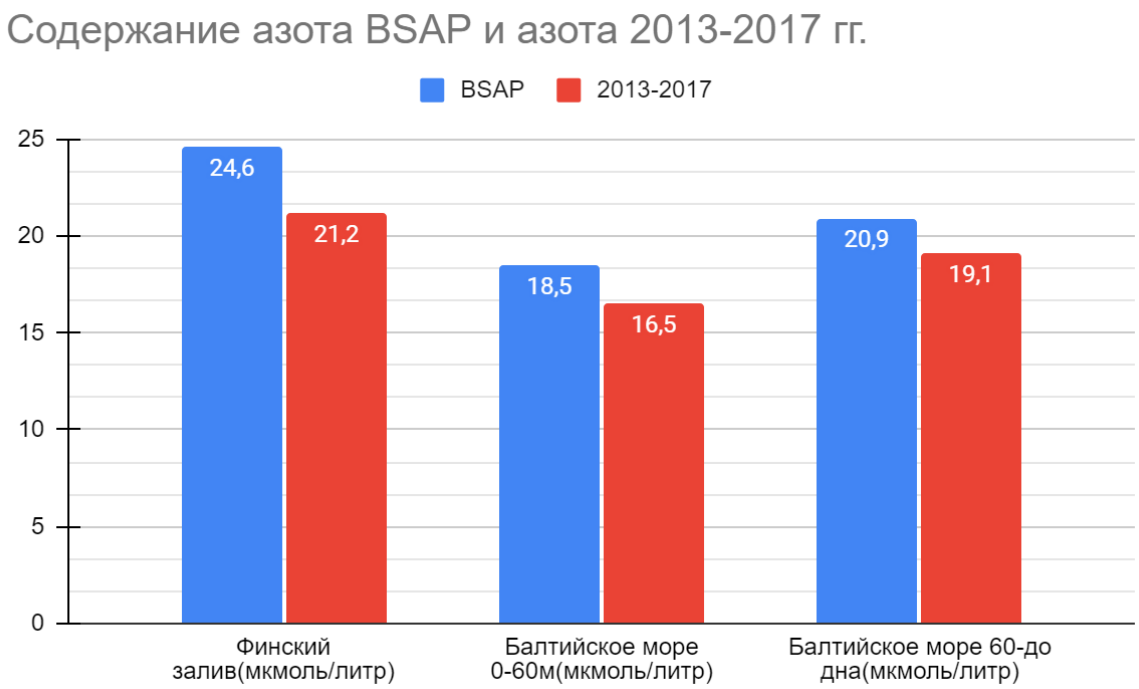


График 3. Содержание азота BSAP и 2013-2017 гг. в Финском заливе и Центральной Балтике.

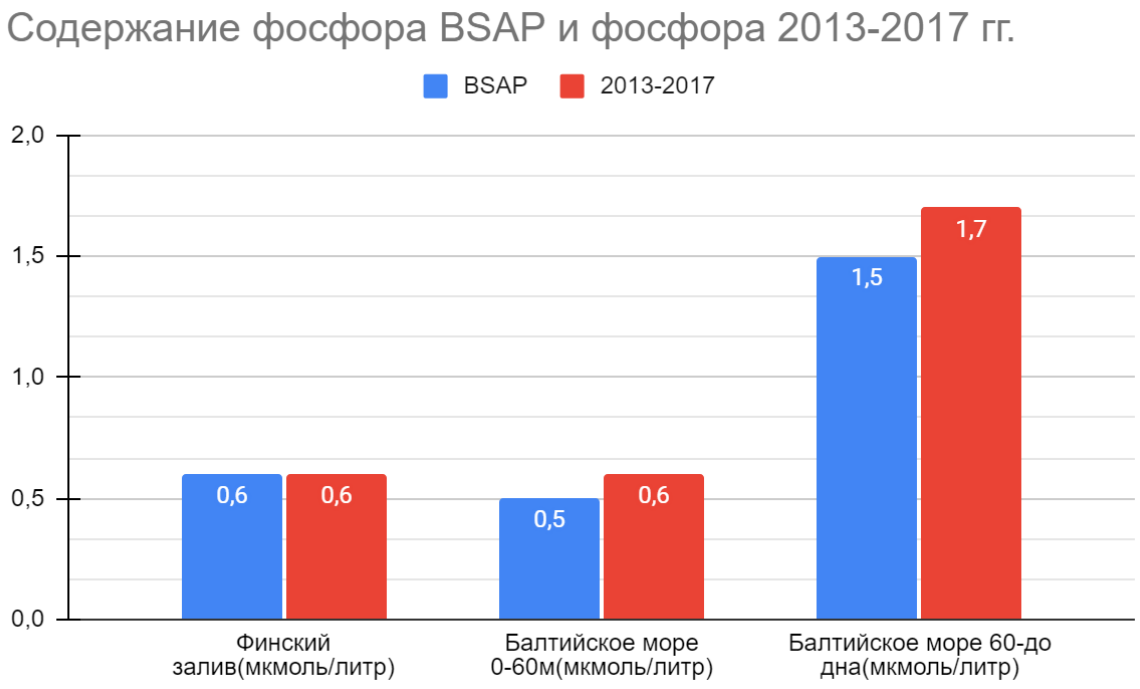


График 4. Содержание фосфора BSAP и 2013-2017 гг. в Финском заливе и Центральной Балтике.

3.2 Оценка биогеохимических потоков при снижении нагрузок

Для оценочного сравнения мы уменьшим биогенную нагрузку за период 2013-2017 гг. на 20%, поступающие из рек. В таблице 6 представлены максимально допустимые поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря за период 2013-2017 гг, с уменьшенной нагрузкой на 20%.

Таблица 6. Максимально допустимые поступления азота и фосфора в суббассейны Балтийского моря, поступающие из рек (т/год) за период 2013-2017 гг. с уменьшенной нагрузкой на 20%.

Бассейн/Вещество	Органический N	Неогранический N	Органический P	Неорганический P
Ботнический залив	26963	11783	1242	690
Ботническое море	16964	14922	802	556
Центральная Балтика	63970	136831	6048	3425

Финский залив	38461	29725	1879	866
Рижский залив	22175	36386	838	801
Датский пролив	4335	21276	470	407
Каттегат	10328	26222	669	358
Итого	183196	277145	11948	7103

При расчете программы, на рисунке 6, мы видим, что наибольшее загрязнение азотом в Рижском заливе, составляющее 29,6 мкмоль/литр , а наименьшим является Ботническое море, составляющее 14,1 мкмоль/литр. Гипоксическая зона в Центральной Балтике составляет 26 746 км2. Детальнее рассмотрим Центральную Балтику и Финский залив. В Финском заливе и Балтийском море мы видим снижение уровня загрязнений азотом, составляющие в Финском заливе 18,7 мкмоль/литр, а в Центральной Балтике 14,3 мкмоль/литр.

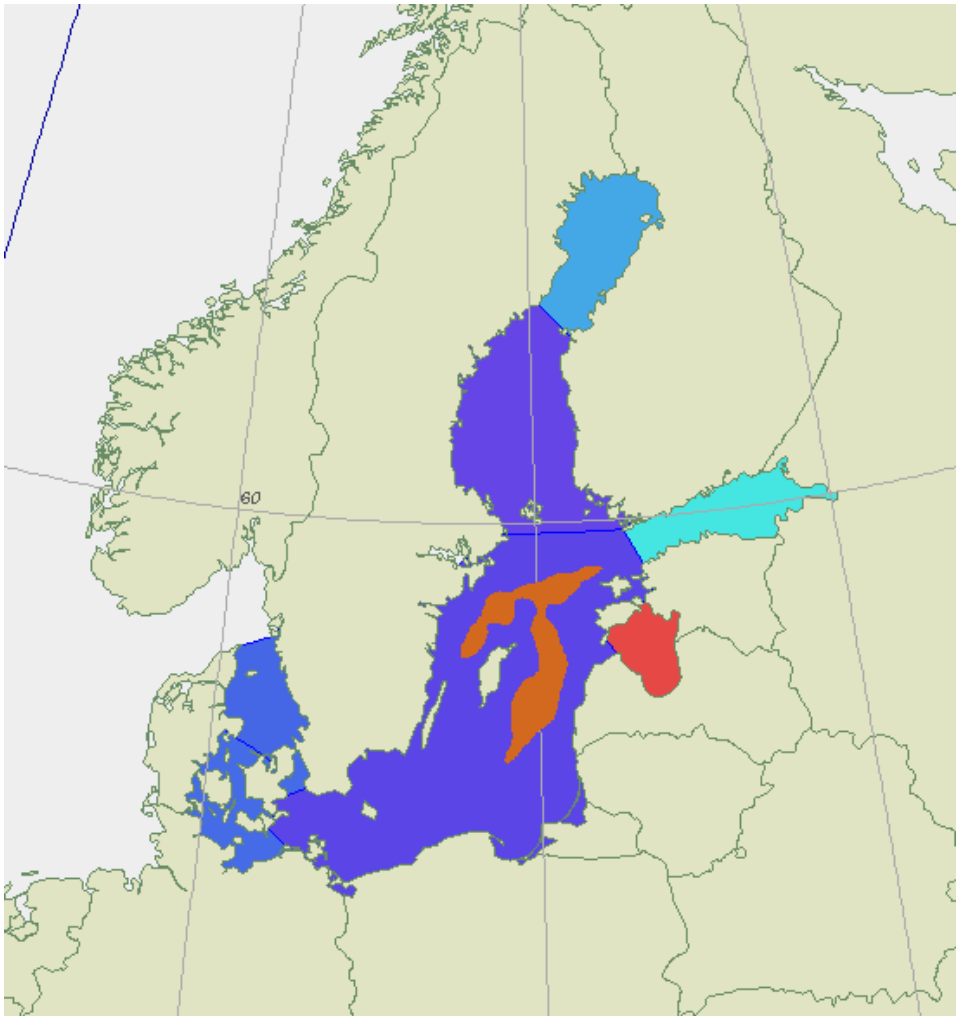


Рисунок 6. Визуализация результатов моделирования содержания азота за период 2013-2017 гг. с уменьшенной биогенной нагрузкой на 20%.

Далее, рассмотрим модель распространения фосфора за период 2013-2017 гг. с уменьшенной биогенной нагрузкой на 20% на рисунке 7. Наибольшее загрязнение мы видим в Рижском заливе, которое составляет 0,7 мкмоль/литр. Самое наименьшее загрязнение в Ботническом заливе, которое составляет 0,2 мкмоль/литр. Гипоксическая зона составляет 26746 км2. Детальнее рассмотрим Центральную Балтику и Финский залив. В Финском заливе и Балтийском море мы видим снижение уровня загрязнений фосфором, составляющие в Финском заливе 0,5 мкмоль/литр, а в Центральной Балтике 0,5 мкмоль/литр.

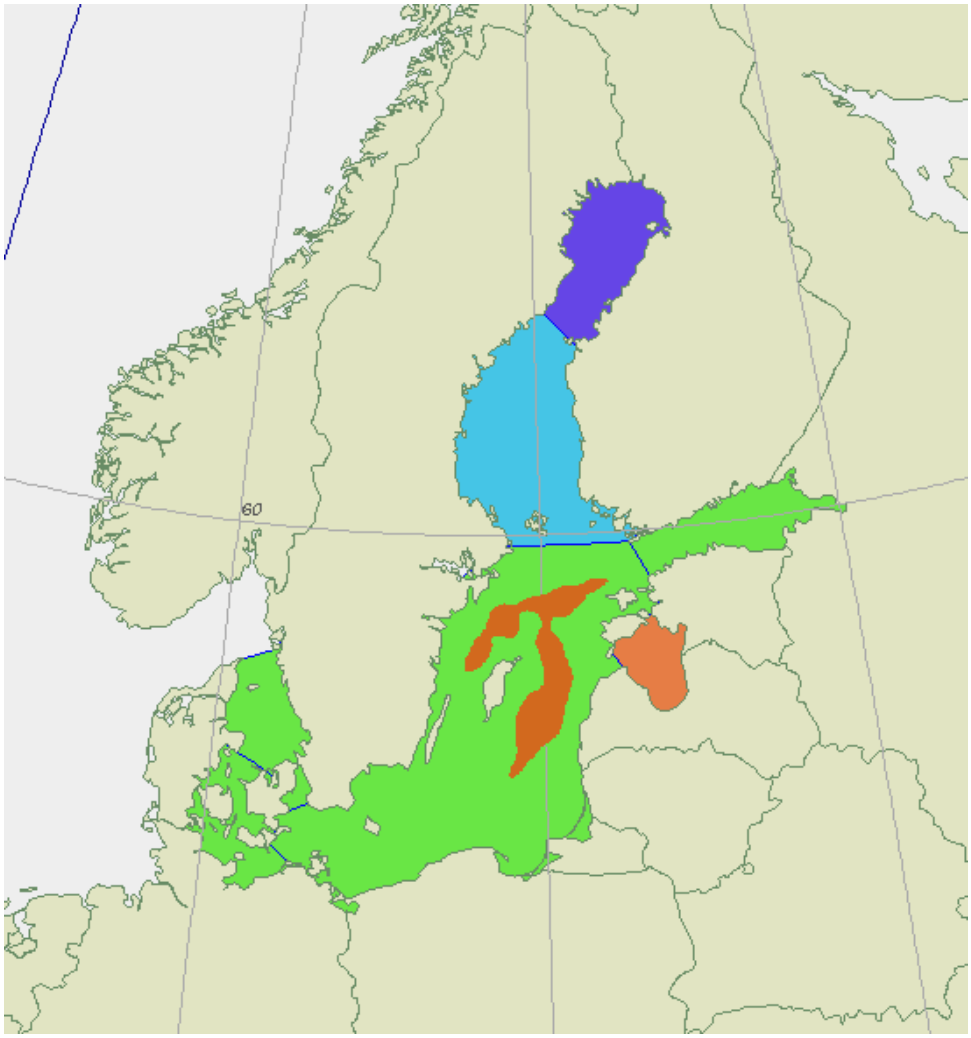


Рисунок 7. Модель распространения фосфора за период 2013-2017 гг. с уменьшенной биогенной нагрузкой на 20%.

Таблица 8. Количество азота и фосфора, который забирает фитопланктон и количество молекулярного азота, усваивающийся цианобактериями(10^3 тонн/год) по данным усредненных нагрузок за 2013-2017 гг. с уменьшенной биогенной нагрузкой на 20%.

Бассейн/Вещество	DIN	DIP	N
Ботнический залив	109,1203635	15,58862335	0
Ботническое море	888,3874837	126,9124977	0
Балтийское море 0-60м	4164,469502	618,6211189	165,8783301
Финский залив	314,8474225	44,97820321	0

Рижский залив	346,5881854	49,51259792	0
Датский пролив	518,5272428	74,4229484	2,433396036
Каттегат	679,576583	97,2977821	1,507891674
Балтийское море 60-до дна	0	0	0

Сравним биогеохимический поток азота и фосфора за все 3 периода: план первоначальных действий по Балтийскому морю (BSAP), усредненные данные 2013-2017 гг. и уменьшенные на 20% усредненные данные за 2013-2017 гг.

На графике 5 мы видим снижение содержания азота на 3,4 мкмоль/литр в Финском заливе в сравнении BSAP и за период 2013-2017 гг. Сравнение периода 2013-2017 гг. и периода 2013-2017(-20%) показало снижение азота на 3,1 мкмоль/литр. Разница между BSAP и содержанием азота за 2013-2017 гг.(-20%) составляет 6,5 мкмоль/литр.

В Балтийском море, расстояние которого 0-60 метров глубины, содержание азота за период 2013-2017 гг. меньше, чем BSAP на 2 мкмоль/литр. Сравнение периода 2013-2017 гг. и периода 2013-2017(-20%) показало снижение азота на 2,5 мкмоль/литр.

В Балтийском море, глубиной 0-60 метров, разница между BSAP и содержанием азота за 2013-2017 гг.(-20%) составляет 4,5 мкмоль/литр.

В Балтийском море, расстояние которого 60 метров и до дна метров, содержания азота за период 2013-2017 гг. меньше, чем BSAP на 1,8 мкмоль/литр. Сравнение периода 2013-2017 гг. и периода 2013-2017(-20%) показало снижение азота на 2,4 мкмоль/литр. В Балтийском море, глубиной 0-60 метров, разница между BSAP и содержанием азота за 2013-2017 гг.(-20%) составляет 4,2 мкмоль/литр.

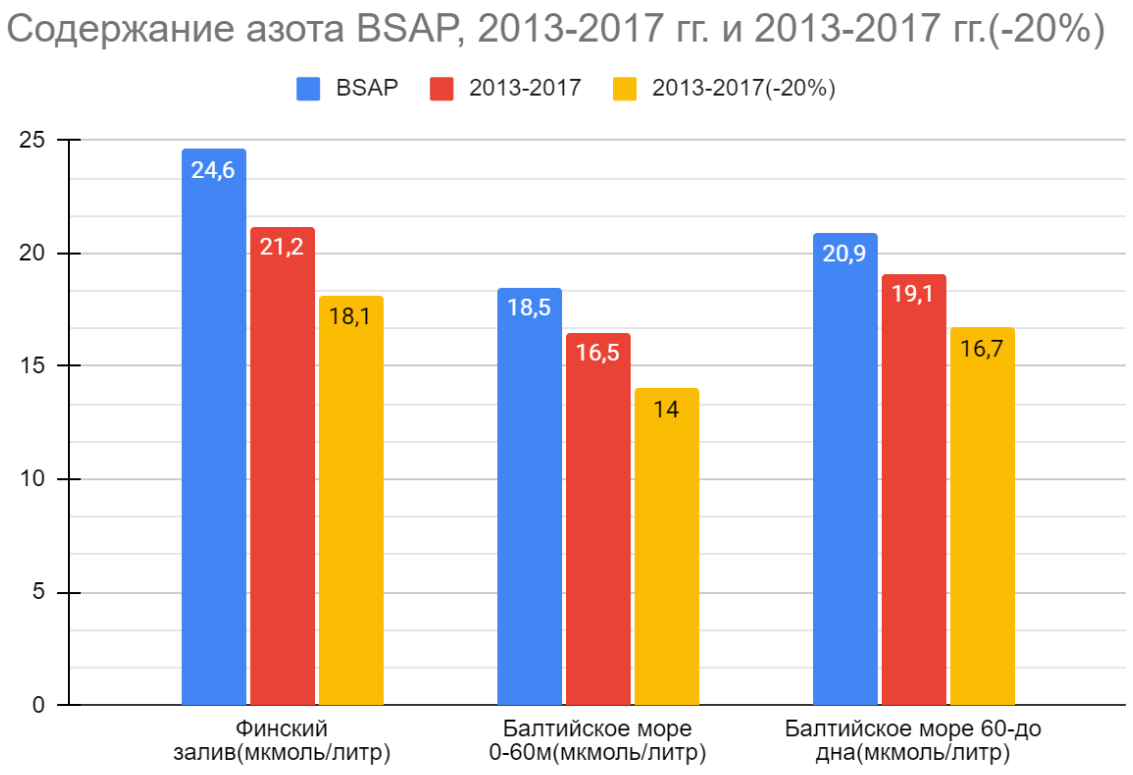


График 5. Сравнение содержания азота BSAP, 2013-2017 гг. и 2013-2017 гг(-20%).

На графике 6 мы видим одинаковое содержания фосфора в Финском заливе по BSAP и за период 2013-2017 гг., составляющее 0,6 мкмоль/литр, но при снижении биогенной нагрузки из рек на 20% за период 2013-2017 гг. мы видим разницу в 0,1 мкмоль/литр.

В Балтийском море, расстояние которого 0-60 метров глубины, одинаковое содержания фосфора BSAP и при снижении биогенной нагрузки на 20% за 2013-2017 гг., составляющее 0,5 мкмоль/литр, но содержание азота увеличивается в сравнении с периодом 2013-2017 гг. на 0,1 мкмоль/литр.

В Балтийском море, расстояние которого 60 метров-до дна , содержание фосфора BSAP меньше, чем за период 2013-2017 гг. на 0,2 мкмоль/литр. Сравнение периода 2013-2017 гг. и периода 2013-2017(-20%) показало снижение фосфора на 0,3 мкмоль/литр. А если смотреть разницу между BSAP и содержанием фосфора за 2013-

2017 гг.(-20%) , то здесь незначительная разница, где BSAP больше на 0,1 мкмоль/литр.

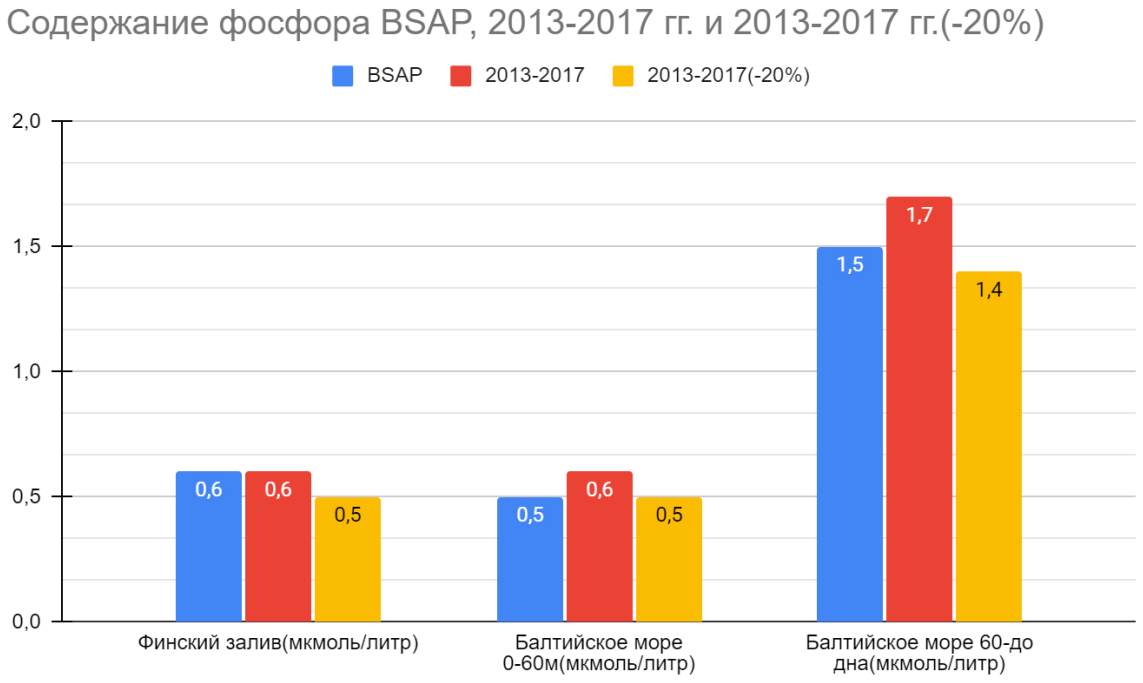


График 5. Сравнение содержания фосфора BSAP, 2013-2017 гг. и 2013-2017 гг(-20%).

Заключение

В заключение отметим, что эвтрофикация остается главной экологической угрозой для Балтийского моря. Она является причиной интенсивного роста водорослей и истощения запасов кислорода на дне моря, что в дальнейшем приводит к образованию

обширных территорий с бескислородными или гипоксическими условиями в Балтийском море и влияет на всю экосистему.

Мы рассмотрели что такое план первоначальных действий по Балтийскому морю. Мы рассмотрели биогенные нагрузки временного отрезка за 2013-2017 гг. и сравнили с Планом действий по Балтийскому морю, что показало нам общее среднее снижение биогенных нагрузок. Также, мы сравнили содержание биогеохимических потоков при различных сценариях нагрузок, и выявили, что снижение нагрузок приводит к снижению поступления биогенов, что в свою очередь и является целью плана первоначальных действий по Балтийскому морю.

Список используемой литературы

1. Балтийское море в настоящем и будущем - климатические изменения и антропогенное воздействие/ под ред. Ерёминой Т.Р, Кондратьев С.А. - СПб., издательство “ЛЕМА”, 2016.-152с.

2. Владимирова О. М., Ерёмина Т. Р., Исаев А.В. и др. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 53. С

3. Деев М. Г. БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017); https://old.bigenc.ru/geography/text/4343809 Дата обращения: 05.06.2023

4. Ерёмина Т.Р., Карлин Л.Н. Современные черты гидрохимических условий в восточной части Финского залива / Ерёмина Т.Р., Карлин Л.Н. // Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы /Под ред. А.Ф. Алимова, С.М. Голубкова.– СПб.-М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. С. 24-38.

5. Ерёмина Т.Р., Максимов А.А., Волощук Е.В. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива // Океанология. 2012. Т. 52, № 6. С. 1–9.

6. Еремина Т. Р., Карлин Л.Н. Современные черты гидрохимических условий в восточной части Финского залива // Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы: монография / Под редакцией А. Ф. Алимова, С. М. Голубкова; Зоологический институт РАН. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК. 2008. С. 2438.

7. Ерёмина Т.Р., Максимов А.А., Волощук Е.В. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива// Океанология. 2012. Т. 52. № 6. С. 1–9.

8. Максимов А. А. Причины возникновения придонной гипоксии в восточной части Финского залива Балтийского моря // Океанология. 2006. Т. 46. № 2. С. 204210.

9. Проект обновленного Плана Действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю // Региональная исполнительная организация–оператор по реализации программ,проектов

и решений ХЕЛКОМ. ГГУП “СФ МИНЕРАЛ”: офиц.сайт - URL: http://helcom.ru/press_office?news=694 Дата обращения : 09.06.2023

10. Савчук О.П. Исследование эвтрофикации Балтийского моря // Труды Государственного океанографического института. 2005. Т. 209.

11. Зенкевич Л. А. Биология морей СССР. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1963 г., 739 стр

12. Зенкевич Л.А. Моря СССР. Их флора и фауна. – Москва: Государственное учебно-педагогическое издательство Наркомпроса РСФСР, 1956 г., 424 стр.

13. Устойчивый водный менеджмент в бассейне Балтийского моря. Книга 1: Водный ландшафт. Ред. Лундин Л.–К. Первое издание. 2000. –237 с.

14. BACC Author Team. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies, 2008. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

15. BACC II Author Team. Second assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies, 2015. Bolle H.-J., Menenti M., Rasool S. I. (eds), Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. 501 p.

16. Bates B. C., Kundzwicz Z. W., Wu S., Palutikof J. P. (eds.). Climate Change and Water, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva: IPCC Secretariat, 2008. P. 210.

17. Conley D. J., Carstensen J., Aigars J. et al. Hypoxia is increasing in the coastal zone of the Baltic sea // Environmental Science & Technology. 2011. 45 (16). P. 67776783. doi: 10.1021

18. Golubkov S., Alimov A.Ecosystem changes in the Neva Estuary (Baltic Sea): Natural dynamics or response to anthropogenic impacts? // Marine Pollution Bulletin. 2010. Vol. 61. No. 46. P. 198204. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.014.

19. Gustafsson B. G., Schenk F., Blenckner T. et al. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850–2006.Ambio. 2012;41: 534–548. doi: 10.1007/s1

20. Gustafsson E.O., Omstedt A. Sensitivity of Baltic Sea deep water salinity and oxygen concentration to variations in physical forcing // Boreal Environ. Res. 2009. 14. P. 18–30.

21. HELCOM 2007. Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki. 103 p.

22. Høyer J.L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea.Journal of Climate. 2016; 29 (7): 25292541.doi: 10.1175/JCLID15

23. Kahru M., Leppänen J.M., Rud O., Savchuk O. Cyanobacteria blooms in the Gulf of Finland triggered by saltwater inflow into the Baltic Sea // Mar Ecol Prog. Ser. 2000. 207. P. 13–18.

24. Leppäranta M., Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea // Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2009, 378 pp.

25. Meier H.E.M., Kauker F. Sensitivity of the Baltic Sea salinity to the freshwater supply // Clim Res. 2003. 24. P. 231–242.

26. Meier M., Edman M. K., Eilola K.J. et al. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multimodel ensemble simulations.Front. Mar. Sci. 2018;5(440). doi: 10.338

27. Pitkänen H., Lehtoranta J., Räike A. Internal nutrient fluxes counteract decreases in external load: the case of the estuarial Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea // AMBIOA J. of the Human Environment.2001. 30(4). P. 195201.doi: 10.1579/0044744730.4.195.

28. Raateoja M., Pitkänen H., Eremina T. et al. Nutrients in the water. In: The Gulf of Finland Assessment. pp. 94-113 Ed. by: M.Raateoja and O.Setala. Reports of the Finnish Environment Institute 27 | 2016, 368 p.

29. Savchuk O.,WulffF.Modelling regional and largescale response of Baltic Sea ecosystems to nutrient load reductions // Hydrobiologia. 1999. Vol. 393. P. 3543. doi: 10.1023/A:1003529531198.

30. Winsor P., Rohde J., Omstedt A. Baltic Sea ocean climate: an analysis of 100 yr of hydrographic data with focus on the freshwater budget // Clim. Res. 2001. 18. P. 5–15

31. ZillénL., ConleyD.J., AndrénT.etal. Past occurrence of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact // Earth Sci. Rev. 2008. 91. P. 77– 92.doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.001.