



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)

**«Исследование процессов захоронение азота и фосфора в эвтрофных
условиях Балтийского моря»**

Исполнитель: Кетова Елизавета Константиновна

Руководитель: кандидат географических наук,
Волощук Екатерина Васильевна

«К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, учное звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«04» 06 2024 г.

г. Санкт-Петербург

2024

Оглавление

Введение	3
1 Физико-географическое описание Балтийского моря.....	5
1.1 Географическое описание объекта исследования	5
1.2 Температура и соленость вод	6
1.3 Водобмен с Северным морем	9
1.4 Кислородный режим Балтийского моря.....	10
1.5. Эвтрофикация Балтийского моря, как одна из главных экологических проблем.	13
2 Система NEST поддержки принятия решений для управления Балтийским морем.....	19
2.1 Описание системы NEST	19
2.2 Физико-биогеохимическая модель SANBALTS.....	21
2.3 Исходные данные модели	25
2.4 Поступления биогенных соединений из разных источников	27
3. Исследование процессов захоронения и выхода биогенных соединений из донных отложений	31
3.1 Захоронение и выход азота и фосфора из донных отложения.....	31
3.2 Транспорт биогенных веществ между бассейнами.....	36
Вывод по главе	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
Список литературы:	41

Введение

Балтийское море, олицетворяющее одну из самых уникальных и уязвимых на данный момент морских экосистем, стало объектом все более активного научного внимания в свете негативных изменений, происходящих в его биохимической среде. Одним из факторов, оказывающих серьезное воздействие на экологическое состояние Балтийского моря, выделяются эвтрофикация, связанная с поступлением азота и фосфора в водную среду. Азот и фосфор играют ключевую роль в биогеохимических процессах морской среды, влияя на формирование взвешенных веществ, динамику роста фитопланктона (водоросли) и образование «мертвых зон». Проводимые странами Балтийского региона меры по снижению биогенной нагрузки не могут привести к быстрому отклику в экосистеме моря, улучшению его экологического состояния в связи с большими запасами биогенов, накопленных в донных отложениях, которые выступают вторичным источником загрязнения моря.

На протяжении последних десятилетий эвтрофикация Балтийского моря достигла критических уровней, приводя к серьезным последствиям для морской экосистемы. В данном контексте, изучение процессов захоронения азота и фосфора в эвтрофных условиях Балтийского моря становится неотъемлемой частью научных исследований, направленных на разработку эффективных стратегий управления и охраны этого уникального водного пространства.

Целью данной работы является оценка и анализ потоков захоронения и выхода из донных отложений азота и фосфора на основе данных о нагрузках на Балтийское море по модели SANBALTS.

Задачи работы, для достижения поставленной цели:

- дать описание физико-биогеохимической модели SANBALTS;

- выбрать периоды для проведения расчетов на модели и сравнить уровни биогенной нагрузки
- выполнить расчеты по определению геохимических потоков выхода и захоронения азота и фосфора в различных подбассейнах Балтийского моря
- дать оценку временной изменчивости геохимических потоков
- оценка транспорта биогенных веществ между подбассейнами

1 Физико-географическое описание Балтийского моря

1.1 Географическое описание объекта исследования

Это внутриматериковое море, относящиеся к морям Атлантического океана, находится между Скандинавским полуостровом и материковым побережьем северо-западной части Европы (рис.1). Оно омывает берега Швеции, Финляндии, России, Эстонии, Латвии, Литвы, Польши, Германии и Дании [1].

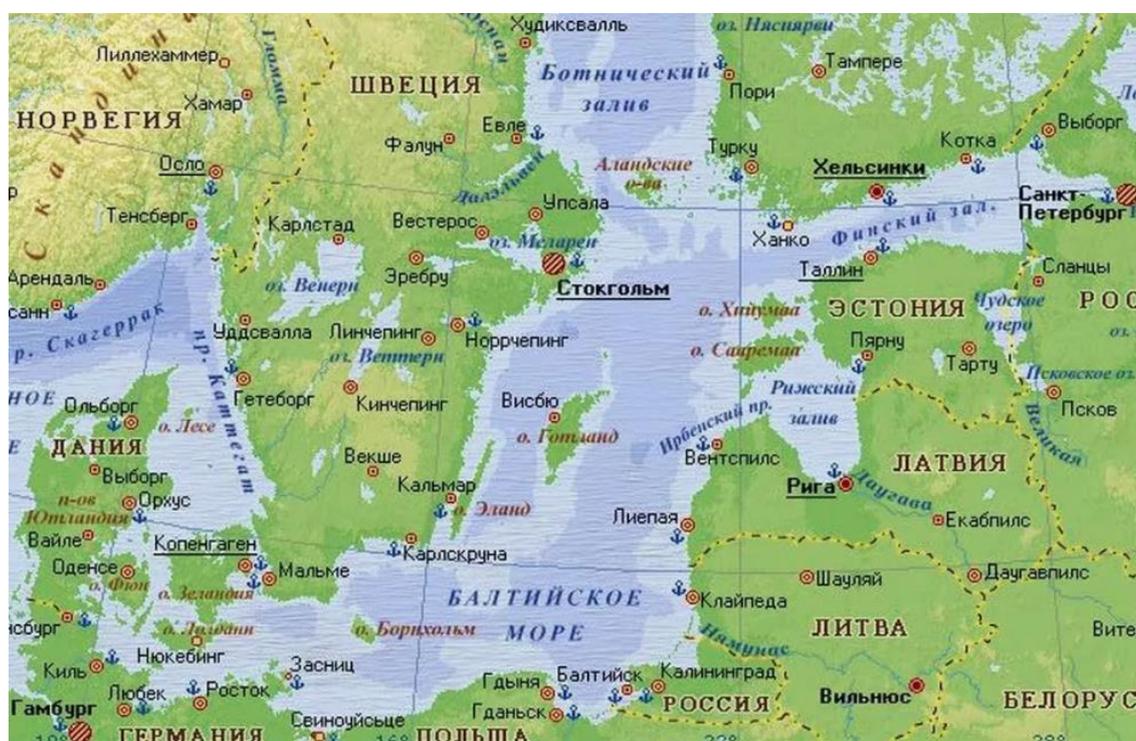


Рисунок 1 - Географическое положение Балтийского моря[1].

На юго-западе соединяется с Северным морем и Датским проливами. Морская граница Балтийского моря проходит по южным входам проливов Эресунн, Большой Бельти, Малый Бельт. Наибольшая глубина 470 м.

Балтийское море глубоко вдаётся в материк Евразия. Сильно изрезанная береговая линия образует многочисленные заливы и бухты. Наиболее крупные заливы: Ботнический, Финский, Рижский, Куршский, Щецинский и Гданьский

заливы. Наиболее крупные острова: Готланд, Борнхольм, Сааремаа, Эланди и Рюген. Много небольших скалистых островков – шхер, расположенных вдоль северных берегов.

1.2 Температура и соленость вод

Балтийское море находится на севере европейского континента, поэтому его воды не отличаются высоким температурным режимом.

Зимой на поверхности моря в центральной части моря и в Датских проливах температура воды достигает 5-3 °С. В Ботническом, Рижском и частично в Финском заливах температура воды составляет 1°С, в восточной части Финской залива опускается до 0 °С. (рис.2)

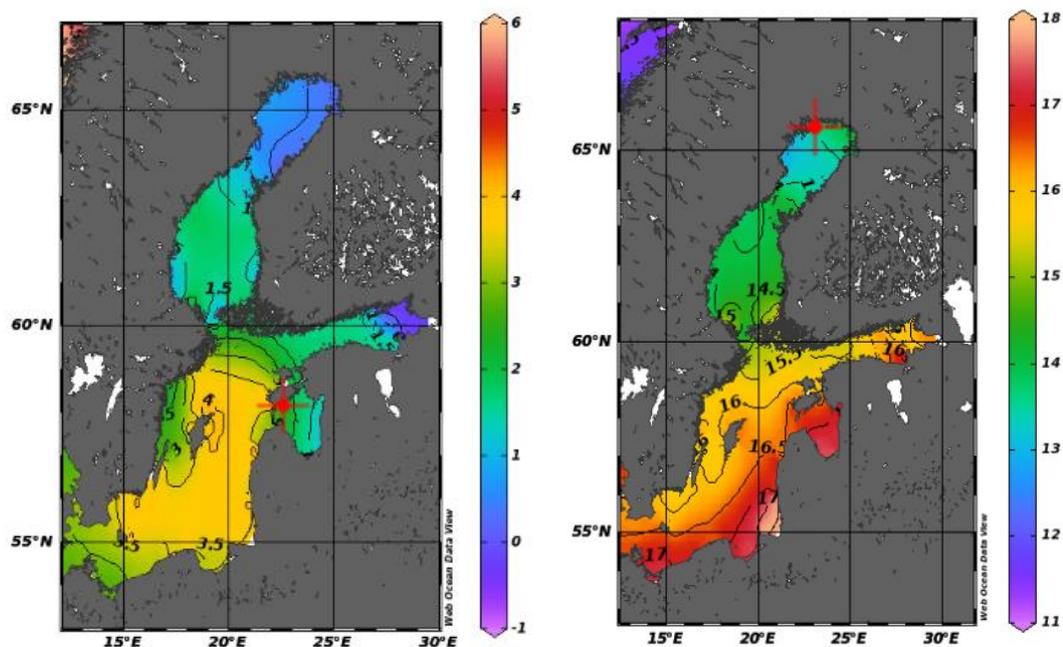


Рисунок 2 - Температура воды Балтийского моря на глубине 0м в зимний и летний период [°С].

В летний период на поверхности моря температура воды увеличивается с севера на юг. Так в Ботническом заливе температура находится в диапазоне 14,5 – 13 °С. В центральной части Балтийского моря, Рижском и Финском заливах температура составляет 16 – 17,5 °С. В Датских проливах температура воды равна 17 – 18 °С.

С глубиной температура воды уменьшается и на 100м в Ботническом заливе температура составляет около 3 °С, в то время как в центральной части Балтийского моря, Рижском и Финском заливах она достигает 4 - 4,5 °С. В Датских проливах температура воды составляет примерно 7-8 °С. (рис.2)

Воды моря хорошо стратифицированы и характеризуются выраженным сезонным циклом изменчивости температуры воды. Холодные воды, образующиеся зимой, простираются до галоклина, типичная глубина которого составляет 60-70м [2]. Летом, когда в поверхностных водах на глубинах около 15-20м развивается сезонный термоклин, ниже лежащий холодный промежуточный слой обычно сохраняет "память" о суровости предыдущей зимы. В летний период температура промежуточного холодного слоя соответствует температуре поверхностного слоя (вплоть до галоклина) предыдущей весны. Более глубокие воды, ниже галоклина, образуются в основном за счет боковой адвекции соленых вод североморского происхождения, которые смешиваются с окружающими водами во время их прохождения в Балтийское море и через него. В соответствии с гипсографическими кривыми Балтийского моря, объем глубоких слоев ниже 100 м составляет всего около 12 % всего объема моря (21 205 км³) и вклад боковой адвекции тепла в общее теплосодержание Балтийского моря относительно невелик [3].

Что касается солёности, то солёность вод Балтийского моря приблизительно в 5 раз ниже средней солёности Мирового океана. В поверхностных водах моря солёность составляет 5 – 6 ‰ в центральной части Балтийского моря, Рижском, Ботническом и Финском заливах, а в Датских проливах диапазон солёности составляет 19 – 33.5 ‰. Причем солёность уменьшается по мере отдаленности от Северного моря (рис.3).

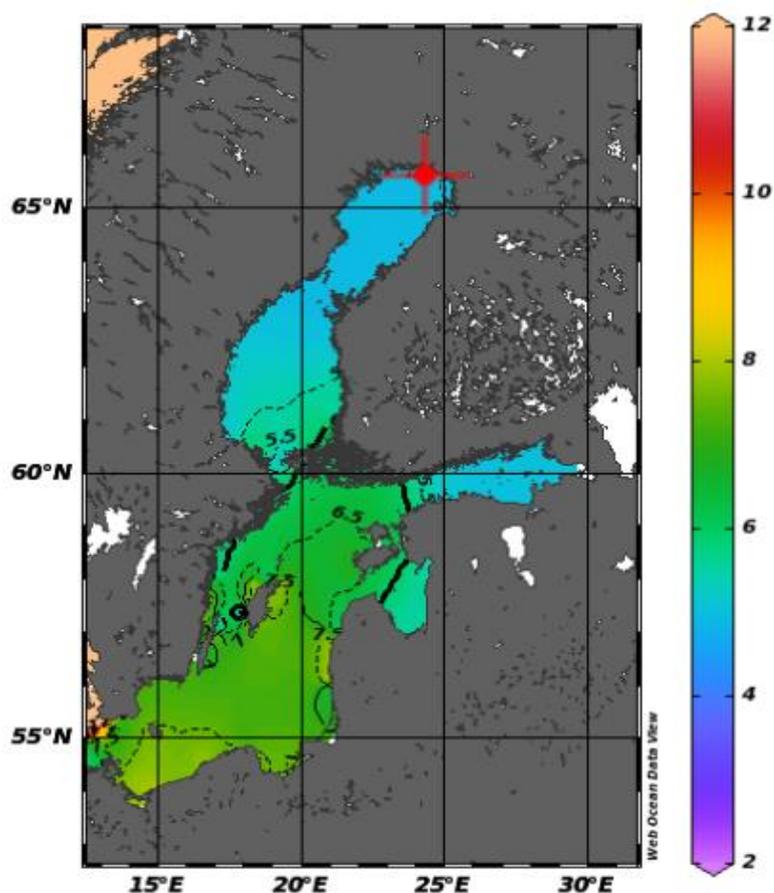


Рисунок 3– Соленость воды Балтийского моря на поверхности моря.

С глубиной соленость воды увеличивается. На глубине 100м на большей части акватории моря соленость лежит в диапазоне 7,5 – 11 ‰. Так в Ботническом заливе соленость не превышает 7,5‰, но на севере равна примера 5 ‰ и далее увеличивается с продвижением на юг. В центральной части моря, а также в Рижском и Финском заливах составляет 10,5 - 11 ‰. В Датских проливах составляет 19 - 33 ‰.

Также на соленость поверхностных вод влияют осадки. Бассейн Балтийского моря получает ежегодно относительно высокий объём осадков – 450 км³. Для северной части моря характерно большое количество выпадающих осадков и низкое испарение.

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.

Готландская впадина является наиболее показательным районом для описания режима солёности и развития стратификации в Балтийском море. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что, начиная с 1980-х годов, солёность вод в слое над галоклином понижена. Такие периоды также имели место в 1900-е и 1930-е годы и в несколько меньшей степени в 1960-х годах. Существенное изменение придонной солёности вод в Балтийском море происходит при спорадических затоках североморских вод, в результате которых происходит обновление больших объёмов воды.

1.3 Водобмен с Северным морем

Балтийское море связано с Северным морем через довольно узкие и мелкие Датские проливы. Глубина в проливах Малый и Большой Бельт в самых мелководных местах – всего 18 м, а в проливе Зунд – лишь 8 м. В связи с чем приток соленых вод обычно довольно ограничен – около 475 км^3 в год, в сравнении с оттоком пресных вод – около 940 км^3 , перемещаемых в год в Северное море. В то же время Балтийское море постоянно пополняется пресными водами, поступающими из более 250 рек, среди которых крупнейшими являются Одра, Висла, Неман, Западная Двина и Нева. В результате вода в море солоноватая и существенно ниже, чем солёность Мирового океана (около 35 ‰). В полузакрытых заливах со значительным притоком пресных вод, таких как Финский залив с Невской губой и Рижский залив с устьем Западной Двины, солёность еще ниже. Приток соленой воды и отток солоноватой – это постоянные процессы, происходящие одновременно. Отток солоноватых вод происходит в поверхностном слое, в то время как соленые воды перемещаются в противоположном направлении в нижнем слое. Это ведет к расслоению водной толщи и формированию барьера между более солеными придонными водами и менее солеными поверхностными водами, называемого галоклином. Кроме того, наблюдается также расслоение на более

холодные придонные воды и теплые поверхностные воды, формирующее барьер, называемый, особенно заметный летом и ранней осенью, но исчезающий зимой, когда поверхностные воды охлаждаются.

1.4 Кислородный режим Балтийского моря

Гидрологический режим Балтийского моря формируется в условиях устойчивой стратификации, обусловленной сложным взаимодействием соленых вод Северного моря с распресненными водами Балтийского моря. Также на формирование кислородных условий важную роль играет рельеф дна. Рельеф Балтийского моря разнообразен большими площадями (около 30%), которые имеют глубину 20-25 м (рис.4), чередующимися рядом более глубоких бассейнов в Центральной части моря, Ботническом море и Финском заливе[5].

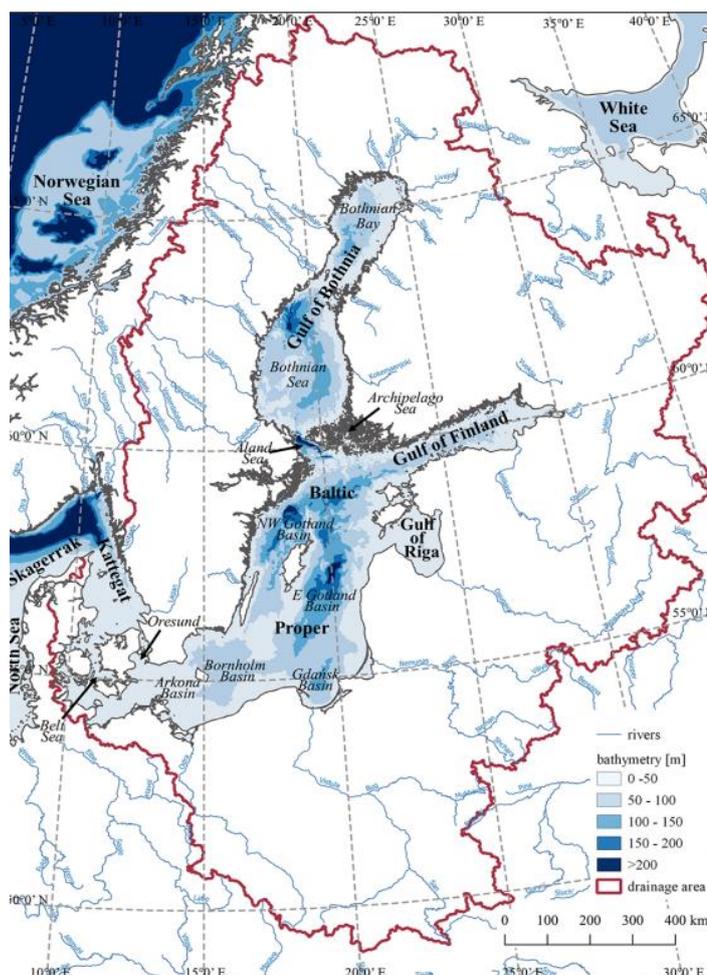


Рисунок 4 — Батиметрия Балтийского моря.[5]

Затоки необходимы для возобновления обедненной кислородом донной воды в бассейнах, что в Балтийском море не происходит. Из-за данных факторов убыль кислорода от поверхности моря до дна связана с процессами биохимической деструкции (разрушение) взвешенных веществ, которые замедляются из-за пониженной температуры воды, которые обычно возникают при отсутствии перемешивания. Так в 2005 году концентрации растворенного кислорода в поверхностном слое колебались в диапазоне 6–9 мг/л. В придонном слое наблюдались минимальные (ниже 3,0 мг/л).

На дне Балтийского моря еще в прошлой веке возникла гипоксия, когда концентрация растворённого в воде кислорода ниже 2 мг/л [6]. Также она отрицательно сказывается на морской экосистеме и увеличивает территорию так называемых мертвых зон — мест, в которых невозможно устойчивое поддержание жизни. Площадь гипоксии занимает значительную часть акватории Балтийского моря. Однако в Центральной части моря она имеет постоянный характер, а в Финском заливе и Датских проливах сезонный, преимущественно летний, характер (рис.5). Также море страдает аноксией, когда концентрация кислорода составляет 0 мг/л.

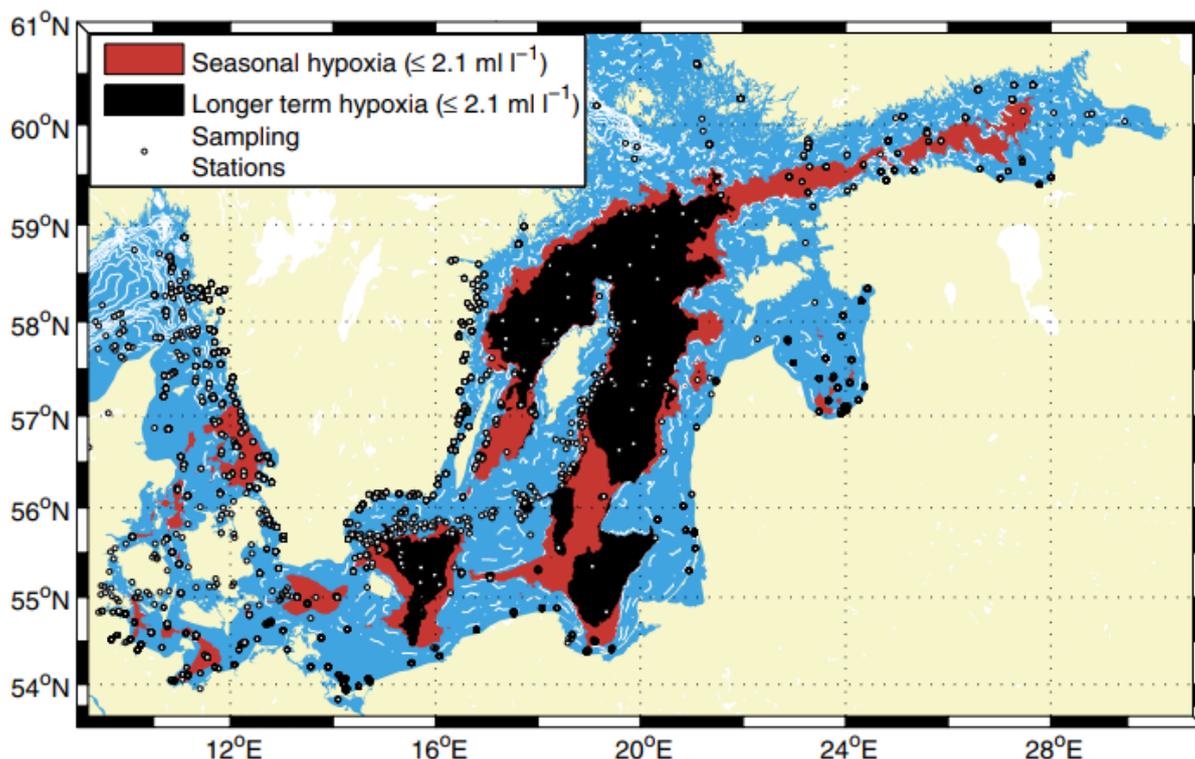


Рисунок 5 — Площади сезонной (красный) и постоянной гипоксии (черный) в 2001-2006 годах в Балтийском море. [6]

Основными факторами, вызывающим гипоксию в Балтийском море являются:

1) Вертикальная стратификация вод. Когда водная колонна в открытом море постоянно стратифицирована верхним слоем солоноватой воды, отделенной от более глубокого слоя соленой воды, что ограничивает перенос кислорода с поверхности.

2) Ограниченный водообмен с Северным морем из-за узких Датских проливов.

3) Роста нагрузки азота и фосфора на водоем (эвтрофикация) влечет за собой вспышку цветения сине-зеленых водорослей, в результате чего снижается глубина проникновения света (прозрачность воды), затрудняется процесс фотосинтеза растений пелагиали. Отмершие автотрофы опускаются на дно и формируют запас органического вещества, на окисление которого расходуется кислород, которого и так мало.

4) Изменение климата. В течение 20-го века на акватории Балтийского моря наблюдалось повышение температуры воздуха. За столетний период тренд повышения температуры воздуха составил $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие, что привело к увеличению длительности вегетационного сезона. Наиболее значительное потепление на акватории Балтийского моря произошло в последние десятилетия; за последние 15 лет среднегодовая температура воды увеличилась в отдельных районах на $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]. В Балтийском море с июля по октябрь наблюдается массовое развитие цианобактерий, что вызывает приводящее к «цветению» воды. Так как на акватории моря наблюдаются благоприятные для их развития условия.

1.5. Эвтрофикация Балтийского моря, как одна из главных экологических проблем.

С начала 20-го века Балтийское море превратилось из моря с чистой водой в эвтрофную морскую среду.

Эвтрофирование водоема – это естественный процесс, чрезмерного обогащения воды биогенными соединениями (прежде всего азот и фосфор). Антропогенное воздействие многократно усиливает и ускоряет процесс эвтрофирования водоема. Данный процесс приводит к интенсивному росту водорослей и истощению кислорода на дне моря, что в дальнейшем приводит к обширным районам с бескислородными условиями и влияет на всю экосистему.

Поступление биогенных 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 с водосборного бассейна и из атмосферы, а также в результате сбросов из точечных источников, таких как очистные сооружения или промышленные предприятия. Речной сток является основным источником поступления азота и фосфора, при этом диффузные источники (стоки с сельскохозяйственных

угодий), составляют меньшую долю, в то время как точечные источники вносят наименьший вклад от общего объема поступления [10]. В период 1997-2003 годов среднегодовые поступления составили 36000 тонн фосфора и 737000 тонн азота, согласно данным А.В. Весман [15].

Соединения биогенных элементов (Р и N) играют лимитирующую роль в функционировании экологических систем. Влияя на динамику популяций организмов низших трофических уровней, они могут определять кинетику трансформации органических веществ и биохимического потребления O_2 . Поэтому количественные сведения о кинетике трансформации соединений биогенных элементов и их циклы в воде необходимы для моделирования процессов эвтрофирования (рис.6,7). Основными «потребителями» биогенных соединений является фитопланктон, который поедается зоопланктоном. Чем больше биогенных соединений в воде, тем больше будут размножаться водоросли.

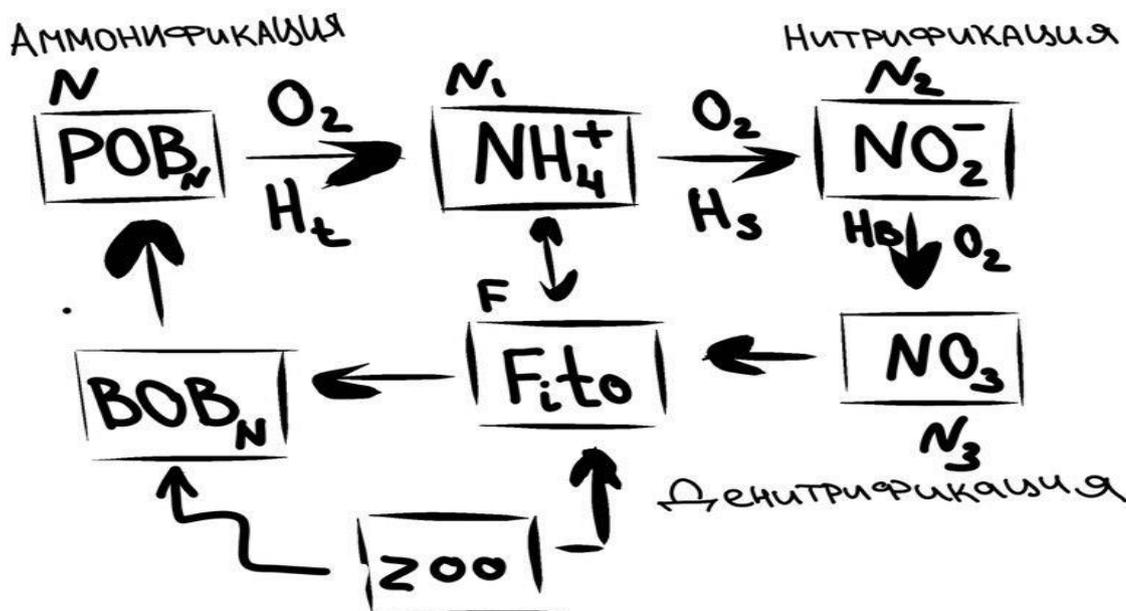


Рисунок 6– Цикл азота в воде.

POB_N — растворённое азотсодержащее органическое вещество трансформируется $\Rightarrow NH_4^+$, NO_2 и NO_3 ; BOB_N — азотсодержащий детрит, бактерии нитрифицирующие Ht — Heterotrophs, N_3 — Nitrosomonas, N_6 — Nitrobakter — осуществляют трансформацию с потреблением O_2 , Fito — азот автотрофных организмов, Zoo — фосфор гетеротрофных организмов.

Аммонификация — это процесс, посредством которого микроскопические организмы, такие как бактерии или другие виды разлагающихся существ, преобразуют соединения, содержащие азот, из мертвого органического вещества в простые молекулы, такие как аммиак.

Находящиеся в водоёме нитрифицирующие бактерии окисляют аммоний до нитрита, в результате реакции помимо нитрита получается водород и вода и выделяется энергия. Эту энергию бактерии используют для своей жизнедеятельности. Полученный нитрит другие нитрифицирующие бактерии окисляют до менее токсичного нитрата. Оба процесса проходят в водной среде и в верхних слоях грунта, для обоих процессов нужно, чтобы в воде было большое количество кислорода. По этой причине нитрификация — это так называемый аэробный процесс.

Большинство получившегося нитрата потребляется растениями для своего роста, часть выводится с ежедневными подменами воды, а часть участвует во втором процесс — денитрификации.

Денитрификация — это процесс анаэробный, проходящий без потребления кислорода. Если нитрификация проходит в воде и в верхних слоях грунта, то денитрификация проходит в нижних слоях грунта водоёма, куда не попадает кислород. Одни микроорганизмы, находящиеся в грунте, преобразуют нитрат (NO_3), полученный в процессе нитрификации, в нитрит (NO_2). Другие, находящиеся в грунте микроорганизмы — денитрифицирующие, преобразуют нитриты в газообразный азот (N_2), который покидает водоём. И те и другие бактерии в этих процессах получают из соединений азота кислород для своей жизнедеятельности.

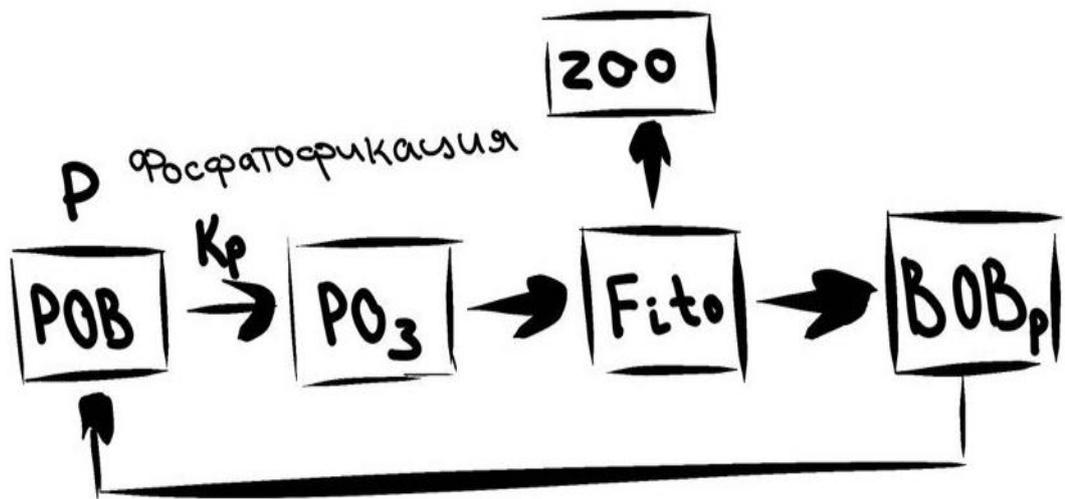


Рисунок 7 — Цикл фосфора в воде.

POB — растворённый органический фосфор, Fito – фосфор автотрофных организмов, Zoo-фосфор гетеротрофных организмов, BOBp - фосфор мертвого органического детрита (взвешенные частицы органического происхождения).

Ключевую роль, определяющую направление геохимических потоков в донных отложениях биогенных соединений, играет кислородный режим в придонных водах (рис.8).

Кислород может подавлять ферменты денитрификации, но в то же время стимулировать нитрификацию донных отложениях, являющуюся источником NO₃. Однако в аноксидных условиях среды скорость денитрификации снижается из-за ограничения доступа нитратов, а также конкурентного превосходства микроорганизмов, редуцирующих нитраты до аммония. Кроме кислорода присутствие в воде аниона HS⁻ (сероводород) также замедляет процессы денитрификации и нитрификации. В аноксидных условиях также протекают процессы анаэробного окисления аммония (реакция окисления аммония нитритами с образованием молекулярного азота).

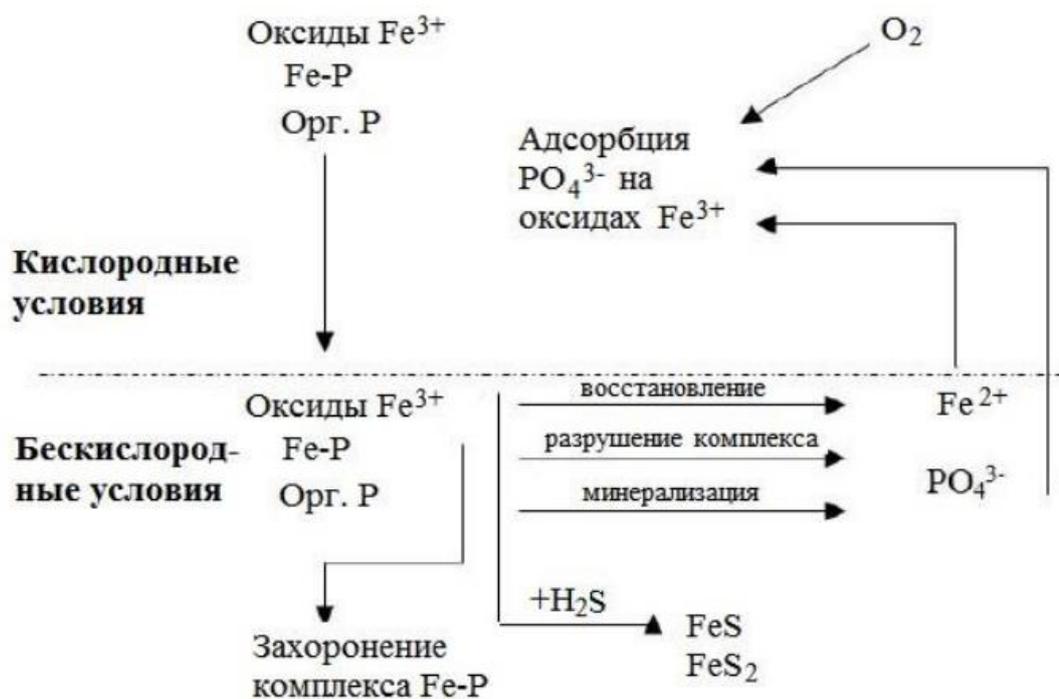


Рисунок 8 — Потоки соединений фосфора и железа в донных отложениях в окислительных и восстановительных условиях [12].

В окислительных условиях фосфаты имеют способность адсорбироваться на поверхности оксидов металлов, прежде всего железа, и таким образом переходить в захороненное состояние, что означает удерживание донными осадками. При смене окислительных условий на восстановительные процессы идут в обратном направлении: комплекс Fe–P разрушается, происходит выход фосфатов из донных отложений. В результате их концентрация в поровой воде возрастает. Железо, в свою очередь, посредством диффузии перемещается в окислительную зону, и цикл повторяется. Разрушение комплекса Fe–P в бескислородной среде происходит за счет присутствия в среде сероводорода, который связываясь с Fe^{2+} , выпадает в осадок и уменьшает доступность ионов железа для связывания фосфатов (рис.8). Однако чем дольше данный комплекс находится в захороненном состоянии, тем более устойчивым он становится и тем меньше подвержен разрушению. Двухвалентное железо, образующееся под зоной ирригации (т.е. в условиях аноксии), посредством диффузии

перемещается вверх и окисляется, связывая фосфор. Т.е. фосфор подвергается циклическому перемещению между аноксией и окисленной зоной донных отложений.

Таким образом, кислородный режим определяет прохождение химических реакций в водной толще и донных отложениях, что в свою очередь определяет направление потоков биогенных соединений.

Вывод по главе

В настоящее время Балтийское море подвержено эвтрофикации из-за замедленного обмена с Северным морем и устойчивой стратификации вод, значительной антропогенной нагрузке на водосборе. Процесс эвтрофирования ускоряется в условиях наблюдаемого в регионе изменения климата. Например, сброс сточных вод различных предприятий, выброс мусора, удобрения с полей несут в море азото/фосфорсодержащие вещества, что еще больше усугубляет экологическую обстановку акватории. Одним из последствий эвтрофирования водоема является гипоксия и аноксия. Такое явление в придонных водах способствует тому, что биогенные соединения начинают высвобождаться из донных отложений таким образом выступая вторичным источником загрязнения водоема, усиливая процесс эвтрофикации.

С конца прошлого столетия значительная часть Балтийского моря подвержена данному процессу, которое негативно сказывается на экосистеме моря.

2 Система NEST поддержки принятия решений для управления Балтийским морем

2.1 Описание системы NEST

Система Nest была создана в 2007 году усилиями многих ученых Балтийского института Nest (BNI), который в настоящее время является частью Центра Балтийского моря Стокгольмского университета, для поддержки принятия решений для управления Балтийским морем. Затем система была успешно использована для разработки сегмента эвтрофикации — Плана действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (ПДБМ) [16]. Она связывает весь регион Балтийского моря, от водораздела до морских экосистем, посредством данных и моделей [7]. Система Nest содержит несколько модулей таких как: Атмосфера, Балтийское море, Водосбор, Экономика и Инструменты. (рис.9)

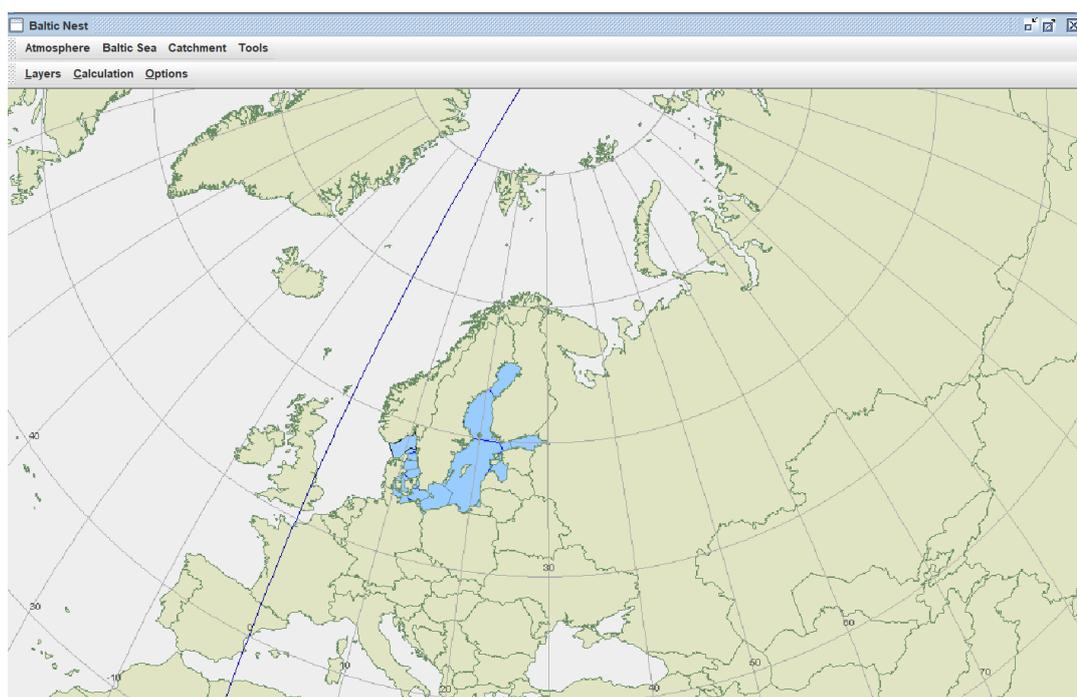


Рисунок 9 – Интерфейс программы Nest [7]

Модели описывают физико-биогеохимические характеристики моря, а также его пищевые сети и используются в сценариях того, как рыболовство,

эвтрофикация и изменение климата влияют на уникальную экосистему Балтийского моря.

Модуль Атмосфера (Atmosphere)

С помощью этого модуля можно получать данные об атмосферных выбросах азота и серы и их осаждении в Европейском регионе. Доступ к этим данным осуществляется через Интернет из баз данных UNECE/EMEP, размещенных в Осло и Вене, а также модели DENM в Дании.

Модуль Baltic Sea

Данный модуль предназначен для исследования гидрографические и геохимические условия в Балтийском море. Он включает в себя следующие данные:

1. Морские распределенные базы данных (Marine distributed databases). В этом выпадающем меню можно извлекать информациях, просматривать и анализировать информацию о гидрохимических условиях в море, получить удаленный доступ к измерениям из многих крупных баз данных, расположенных в различных исследовательских по всей Балтике.

2. Модель SANBALTS (Simple As RequiredBALtic Sea) описывает состояние эвтрофикации, от гипоксии до продуктивности, в семи основных бассейнах в годовом масштабе.

3. Модель BALTSEM (Time-dependent ecosystem model BALTSEM) подобно модели SANBALTS имитирует физику и биогеохимию Балтийского моря, но с гораздо более высоким пространственным и вертикальным разрешением. С помощью модели можно изучить последствия изменения климата при различных сценариях [7].

4. Результаты моделирования рыб (Fish modeling results). Данная модель используется для оценки воздействия различных вариантов управления рыболовством, а также воздействия эвтрофикации и тюленей на треску, сельдь и кильку.

Модуль Водосбор (Catchment)

С помощью данного модуля можно сделать оценки речной биогенной нагрузки в бассейны Балтийского моря из различных водосборных бассейнов. Например, как сток биогенных веществ в Балтийском море зависит от почвенного покрова, сельского хозяйства, населения стран, окружающих море.

Экономика (Economy)

Данный модуль может быть использован для принятия решений по минимизации затрат (Cost minimisation model) для мер в основных сферах общества, необходимых для достижения конкретного улучшения качества воды в любом из семи подбассейнов Балтийского моря. Однако данные, лежащие в основе модели, не обновляются, но модель по-прежнему качественно показывает принципы, как можно достичь решения по минимизации затрат для стран Балтики.

2.2 Физико-биогеохимическая модель SANBALTS

Это сопряженная физико-биогеохимическая модель, описывающая влияние изменения нагрузки биогенными веществами (азотом и фосфором) на состояние окружающей среды в семи основных подбассейнах Балтийского моря. (рис.10), а также их основные процессы происходящие в воде.

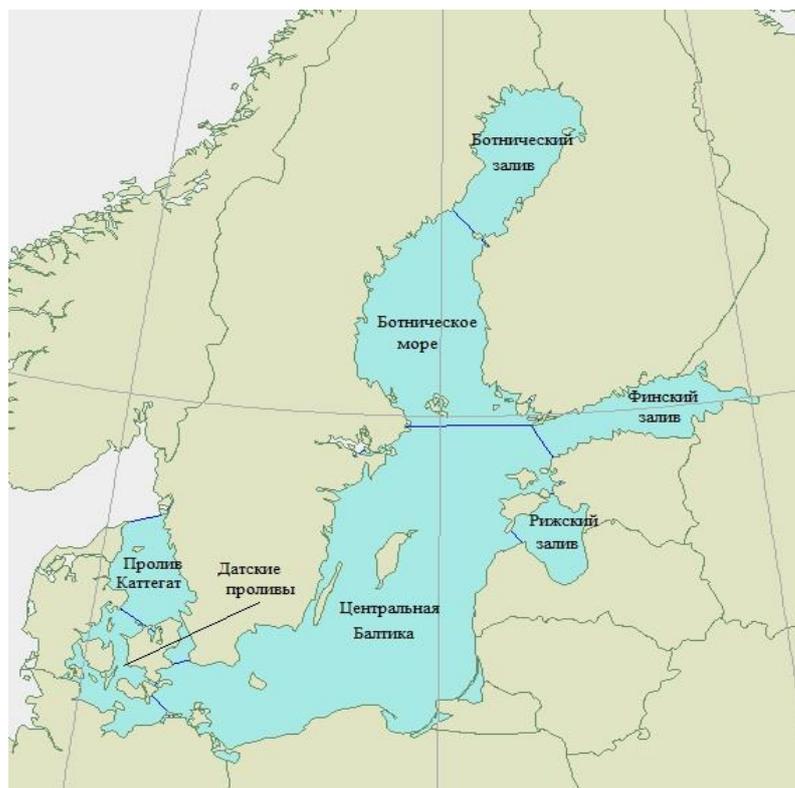


Рисунок 10 – Подбассейны Балтийского моря, рассматриваемые в модели [7]

Модель реализована в стационарном режиме, который показывает, какое трофическое состояние в конечном итоге будет установлено в результате изменений в поступлении биогенных веществ. Основной целью модели является моделирование взаимодействия между источниками поступления и расходовании биогенных веществ (внешняя нагрузка), водообменом между подбассейнами и внутренними биогеохимическими потоками [8].

Модель имеет временное разрешение — нацелена на экспресс-моделирование взаимодействий между годовыми интегралами внешних входов, переноса веществ между подбассейнами и биогеохимических потоков, а переменные состояния модели представляют собой среднегодовые значения их естественных прототипов.

В каждом из семи подбассейнов модели динамика биогенных веществ описывается шестью пелагическими переменными и представлена на блок-схеме (рис.11):

- ONS – растворенные устойчивые фракции органического азота
- ON — содержание азота во всех лабильных фракциях (в мертвых и живых, растворенных и твердых частицах).
- DIN — растворенный неорганический азот
- OPS — растворенные устойчивые фракции органического фосфора
- OP — содержание фосфора во всех лабильных фракциях (в мертвых и живых, растворенных и твердых частицах)
- DIP — растворенный неорганический фосфор

Эти переменные разделяются на лабильные (легкорастворимые) и устойчивые соединения.

Бентосные переменные:

- BEN- легкоразлагаемые захораниваемые фракции азота донных отложений
- BEP - легкоразлагаемые захораниваемые фракции фосфора донных отложений

Бентосный азот и фосфор рассматриваются в модели как биодоступные фракции (отмерший фито/зоопланктон).

Также в Центральной части Балтики в слое ниже 60 м моделируется средняя концентрация кислорода в качестве регулятора круговорота биогенных веществ.

В настоящей работе особый интерес будут представлять процессы захоронения и выхода азота и фосфора из донных отложений.

Выход азота и фосфора из донных отложений рассчитывается по формуле:

$$O_{B(P/N)} = (1 - n_{(P/N)}) * W_{(P/N)},$$

Захоронение биогенных соединений рассчитывается по формуле:

$$X_{(P/N)} = n_{(P/N)} * W_{B(P/N)},$$

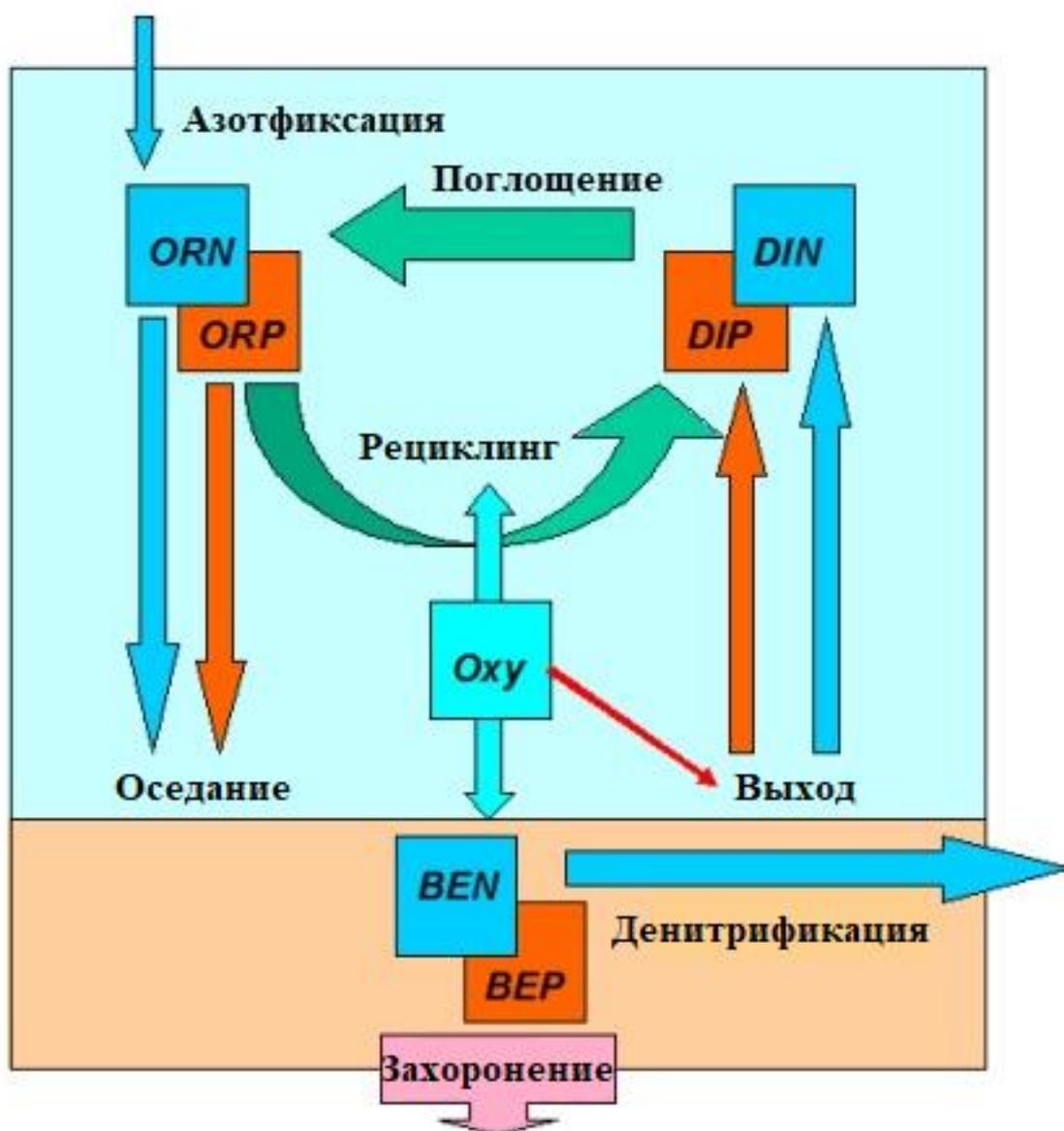
где:

O_B — поток выхода фосфора/азота из донных отложений;

$W_{(P/N)}$ — поток минерализации фосфора/азота, который зависит от температуры;

$n_{(P/N)}$ — коэффициент удержания биогенных соединений донными отложениями, который нелинейно зависит от концентрации растворенного кислорода в придонных водах и повышается с увеличением O_2 ;

$X_{(P/N)}$ — поток захоронения фосфора/азота в донные отложения.



ORN, ORP – устойчивые фракции органического азота и фосфора в мг/м³,
 DIN, DIP – растворенные неорганические азот и фосфор в мг/м³, которые потребляются фитопланктоном и переходят в органическую форму,

BEN, BEP – легкоразлагаемые фракции азота и фосфора донных отложений в г/м³, которые захораниваются (бентос), Оху – растворенный кислород в г/м³.

Рисунок 11 – блок-схема модели SANBALTS [8].

На данный момент в модели представлены такие сценарии как PLC-3, PLC-4 и PLC-5, основанные на данных, собранных ХЕЛКОМ и ЕМЕР (Совместная Программа мониторинга и оценки дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ в Европе), соответствующих 1995, 2000, 2006 годам. Установленные нагрузки согласно ПДБМ являются допустимыми нагрузками по азоту и фосфору для каждого бассейна. Restore default loads имеет данные ХЕЛКОМ о биогенной нагрузке, усредненные за 1997-2003 гг. Также можно использовать данные нагрузок, усредненных за 2008-2012 и 2013-2017 гг.

2.3 Исходные данные модели

Динамика биогенных веществ в Балтийском море сильно зависит от многолетних и межгодовых колебаний, которые вызваны природными процессами и антропогенным воздействием.

В модели рассматриваются следующие основные источники поступления биогенных соединений: атмосферные осадки, точечные источники и поступление с реками, а также затоки из Северного моря через пролив Скагеррак [9].

В модели поступление органических питательных веществ разделено на лабильные и устойчивые соединения, предполагая, что лабильные меньше в поступлении азота из северо-восточной лесной части водосборного бассейна (20–30%), чем из юго-западных сельскохозяйственных и урбанизированных районов (30–40%). Доля лабильного органического фосфора принята неизменной и составляет около 90%.

Бассейновые оценки атмосферных осадков неорганического азота были получены в рамках совместной программы мониторинга и оценки

загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе и приведены в модели в виде средних значений за 1997–2002 гг. Поступление лабильного органического азота из атмосферы составляет 20% от поступления неорганического азота, в то время как для фосфора предполагается, что атмосферные осадки приносят примерно 15 кг P на км²/год в виде фосфатов по всем бассейнам в соответствии с площадью их поверхности.

Принос биогенных веществ из Скагеррака рассчитывался как произведение притока воды и усредненных концентраций за год, рассчитанных с помощью инструментов Swing Station и системы ассимиляции данных (DAS) на основе данных, извлеченных из базы данных Baltic Environment (BED). Потоки воды между бассейнами, включая обмен со Скагерраком, были рассчитаны по сотням тысяч измерений солености по методу Кнудсена в качестве долгосрочных средних значений за 1991–1999 гг.

Прозрачность природных вод определяется концентрацией частиц, в том числе планктона, и растворенных веществ, таких как гуминовые кислоты, и может рассматриваться как совокупный результат, как интенсивности автохтонной первичной продукции, так и вклада аллохтонного вещества. Поэтому используется как один из экологических индикаторов, характеризующих состояние эвтрофикации в различных суббассейнах.

Чтобы обеспечить сопоставимость между модельными и наблюдаемыми характеристиками, фактические измерения были агрегированы с теми же пространственными и временными разрешениями, что и в модели. По 3D-полям, реконструированным с помощью DAS по данным BED, были рассчитаны временные ряды среднегодовых объемно-взвешенных концентраций питательных веществ и кислорода, а также площади отложений, покрытых водами, содержащими менее 2 мг/л кислорода.

Эти среднегодовые концентрации были рассчитаны как средние значения всех измерений, выполненных в течение каждого года, и объединены. Корректировка этих значений на сезонные колебания производилась по факторам, оцениваемым как отношение между двумя наборами среднегодовых

значений [9]. Все источники рассчитывались с индивидуальным подходом. Например, речные переносы и прибрежные точечные источники органических и неорганических веществ были приведены в качестве средних значений за 1997–2003 гг. на основе данных, предоставленных ХЕЛКОМ. Этот временной интервал включает в себя такие важные события, как экстремально влажные и засушливые 1998 и 2003 годах, а также повышенный сток рек в Ботнический залив в 2000 г.

2.4 Поступления биогенных соединений из разных источников

Для сравнения были выбраны значения поступления азота и фосфора по нагрузкам за 2000 год и осредненные за 2013-2017 год по моделям SANTBALTS. Выбор пал на данные годы, чтобы оценить эффект от мер, принятых для снижения нагрузки загрязнения на водосборном бассейне Балтийского моря, количественно оценить и описать водные нагрузки, сбрасываемые непосредственно в море, поступление биогенных соединений из атмосферы в Балтийское море и его суббассейны, оценить изменения и тенденции нагрузки загрязнения за данный период.

По гистограммам видно, что поступление азота к 2017 году стало меньше, чем в начале века, когда только начали пытаться решить проблему эвтрофикации в Балтийском море. Общий приток азота в море сократился на 196001 тонн/год, также сократилось поступление азота из атмосферных осадков на 40000 тонн/год, с рек на 133850 тонн/год, поступление из точечных уменьшилось примерно на 10000 тонн/год, как и с пролива Скагеррак (рис.12)

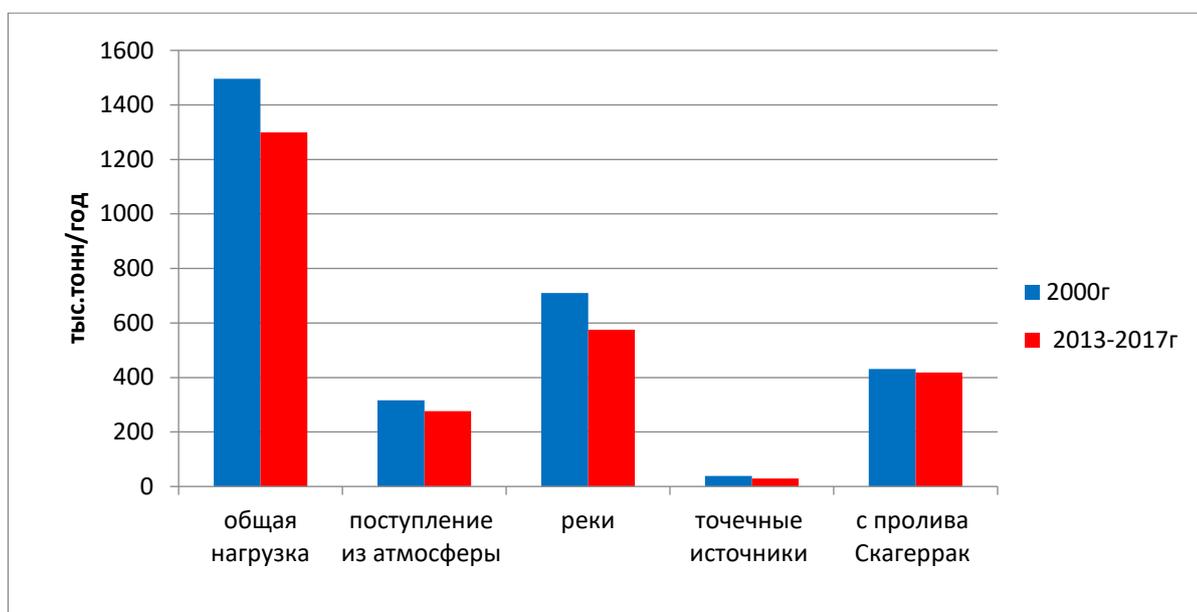


Рисунок 12 – Количество поступления азота по 2 нагрузкам из источников (тысяч тонн/год)

По гистограмме видно, что поступление фосфора сократилось примерно на 10,5 тысяч тонн/год в 2013-2017 гг. по сравнению с 2000 г. Поступление с точечных источников сократилось в 2 раза, из атмосферных осадков на 100 тонн/год, с рек на 9,8 тысяч тонн/год. Однако поступление с пролива Скагеррак увеличилось примерно на 780 тонн/год (рис.13).

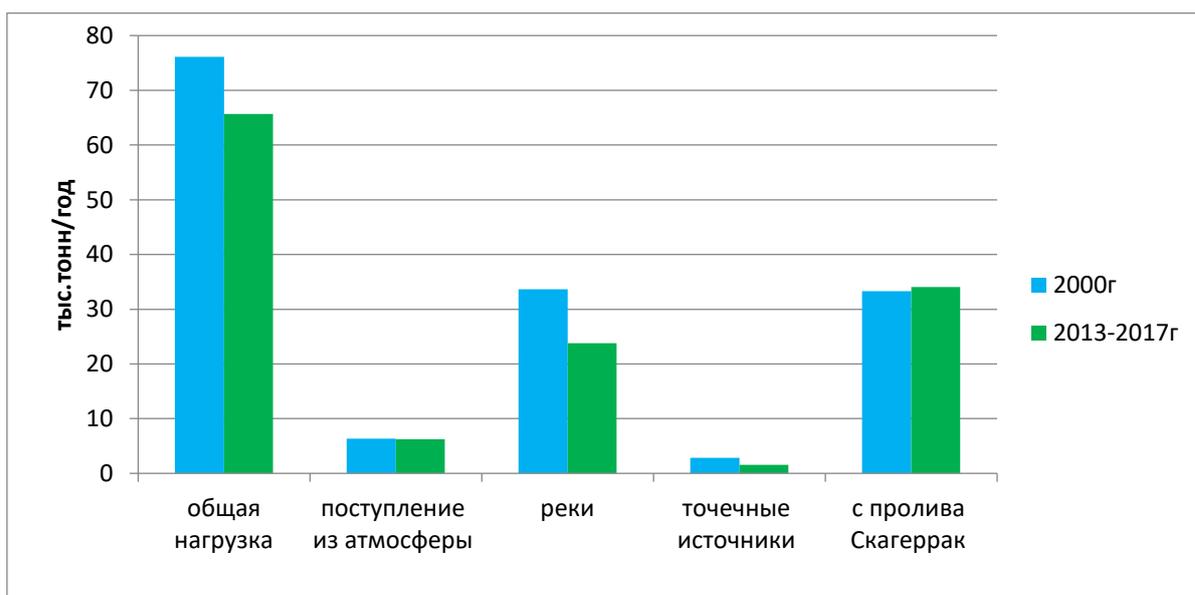


Рисунок 13 – количество поступления фосфора по 2 нагрузкам из источников (тысяч тонн/год)

Рассмотрим вклад различных источников азота на Балтийское море. По диаграммам можно увидеть, что реки являются основным источником поступления азота в воды Балтийского моря. В начале 21 века доля поступления азота с рек составляет 47%, а в 2013-2017 годах 45%. Наименьшая доля поступления азота в воду приходится на точечные источники и составляет 2-3% в каждом выбранном периоде. Поступление биогенных соединений вместе с осадками в море не изменилось за 17 лет и составляет 21% от общей нагрузки (рис.14).

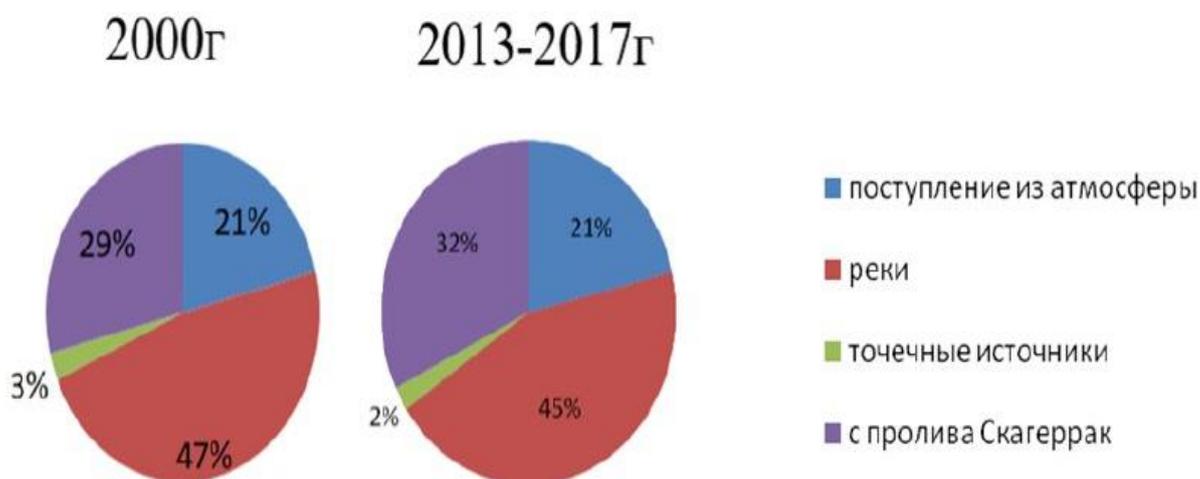


Рисунок 14 – Доли поступления азота в Балтийское море из разных источников

Далее рассмотрим вклад в нагрузку по фосфору. По диаграммам видно, что за период с 2000 года по 2013-2017 года наибольшую часть поступления фосфора в воды Балтийского моря вносят реки (36% и 44% соответственно) и заток через Датские проливы (44% и 52% соответственно), а наименьшую точечные источники (4% и 2%). Однако за период 2013-2017 год процентное соотношение нагрузки с пролива Скагеррак примерно на 8% увеличилось (рис.15).

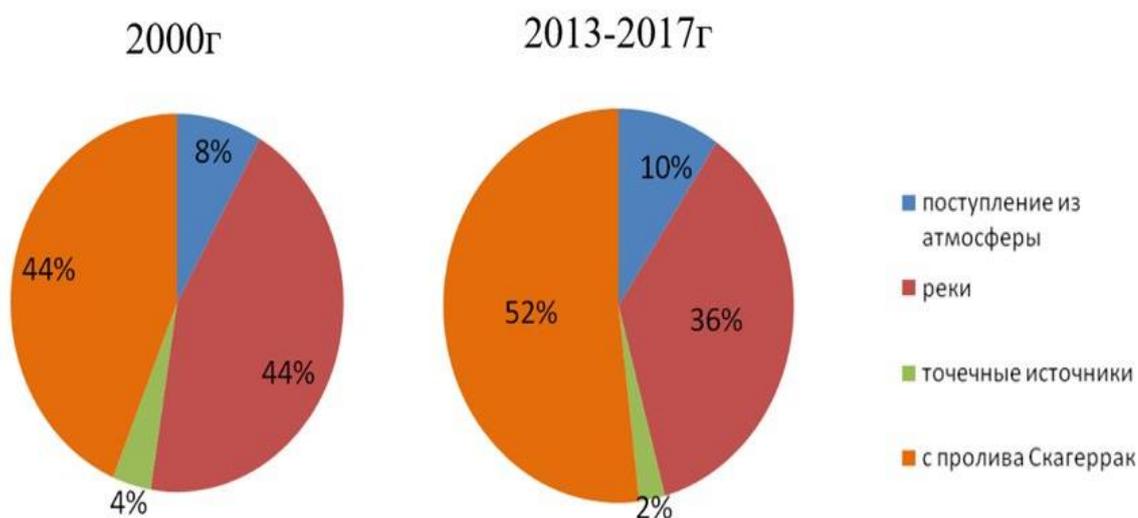


Рисунок 15 – Доли поступления фосфора в Балтийское море из разных источников

В целом, поступления биогенных соединений, поступающих в Балтийское море с рек, с пролива Скагеррак, из точечных источников и атмосферы, сократились на 13,3% по азоту и на 14,5% по фосфору в период с 2000 года по 2013-2017 годы. Максимальное поступление питательных веществ в Балтийское море согласно ПДБМ должно составлять около 21 000 тонн фосфора и 600 000 тонн азота ежегодно, что не было достигнуто за исследуемый срок. За этот период поступление биогенных веществ в основном сокращалось из точечных источников, таких как очистные сооружения и выпуски промышленных сточных вод. Для дальнейшего снижения нагрузки для улучшения экологической ситуации, требующей принятия мер по устранению диффузных источников питательных веществ, таких как стоки с чрезмерно удобренных сельскохозяйственных земель.

Но для достижения «чистой воды», что является одной из главных целей Плана действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю, поступления фосфора и азота в Балтийское море необходимо еще сократить примерно на 15% и 26% соответственно.

Вывод по главе

В данной главе была рассмотрена модель SANBALTS. С помощью данной модели были выявлены основные источники загрязнений биогенными веществами Балтийского моря и оценен их вклад. Также можно увидеть как изменилась ситуация, связанная с эвтрофированием вод моря, а также с зонами гипоксии в Центральной части моря. По данным SANBALTS было проведено сравнение нагрузок из различных источников за 2000 год и за 2013-2017 годы (осредненные данные). Анализ показал, что по сравнению с 2000 годом нагрузка в 2013-2017 годах уменьшилась на 10,5 тысяч тонн/год по фосфору и на 19,6 тысяч тонн/год по азоту. Тем не менее целевые показатели по ПДБМ не были достигнуты, поэтому поступления биогенных веществ следует снизить еще в несколько раз для достижения хорошего экологического состояния водоема.

Основным источником поступления азота и фосфора является сток рек, составляющая примерно 45% от общей нагрузки за весь исследуемый период, а на долю нагрузки из атмосферы приходится 21%, примерно 30% приходится на поступление биогенных веществ с пролива Скагеррак. Наименьший вклад в нагрузку вносят точечные источники примерно 2-3%.

Отмечается незначительное изменение доли поступления биогенов из разных источников. Так в 2013-2017 годах уменьшилось поступление азота с водосборного бассейна (с 47% до 45%), и фосфора (с 44% до 36%), таким образом увеличилось доля поступления в водоем из Северного моря.

3. Исследование процессов захоронения и выхода биогенных соединений из донных отложений

3.1 Захоронение и выход азота и фосфора из донных отложения

Процессы захоронения и выхода биогенных соединений из донных отложений играют важную роль в эвтрофировании Балтийского моря.

Вышедшие из донных отложений в толщу воды азот и фосфор являются вторичным источником загрязнения.

На модели SANBALTS для периодов 2000 г и 2013-2017 гг. были проведены расчеты по оценке потоков захоронения и выхода азота и фосфора из донных отложений. Расчеты проводились для каждого из подбассейнов моря с учетом их площади и объемом вод (рис. 20-23).

По гистограммам видно, что захоронение биогенных соединений за 17 лет снизилось во всех подбассейнах Балтийского моря. Самый большой поток захороненного фосфора наблюдается в Ботническом море (примерно 9,1 тысяч тонн/год), а наименьшие значения за 2000 год были в Датских проливах (около 0,2 тысяч тонн/год). По осредненным данным за 2013-2017 годы в Ботническом море также наблюдается наибольшие значения (около 6 тысяч тонн/год), а в Рижском заливе и Датских проливах наименьшие среди всех подбассейнов Балтийского моря около 0,25-0,3 тысяч тонн/год (рис.16).

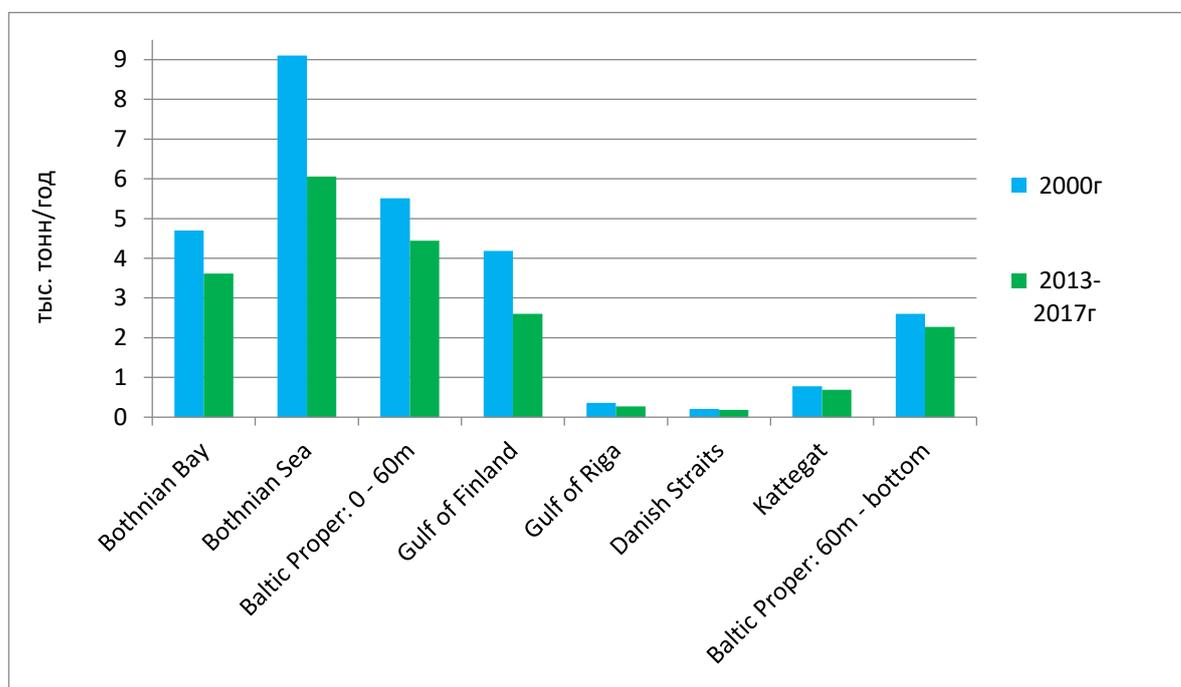


Рисунок 16 – Поток захоронения фосфора в 2000 году и по осредненным данным за 2013-2017 годы.

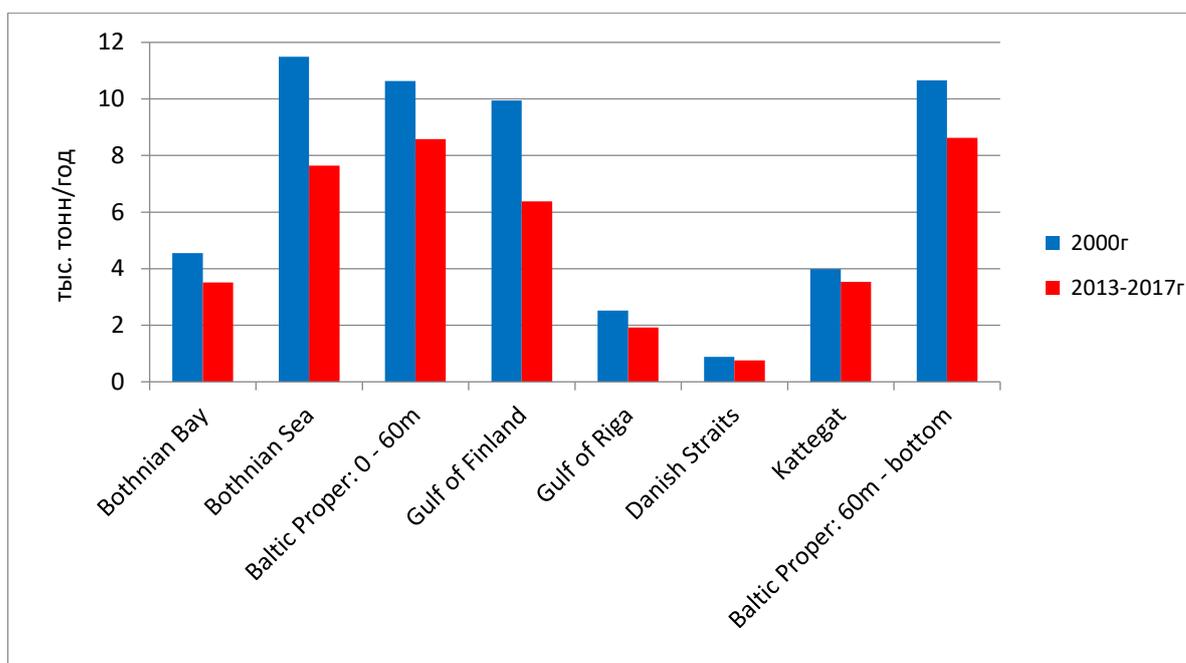


Рисунок 17 — Поток захоронения азота в 2000 году и по осредненным данным за 2013-2017 годы.

По гистограммам можно увидеть, что поток захоронения азота в Ботническом море достигает наибольших значений, примерно 11,8 тысяч тонн/год, а в Датских проливах наименьших около 1,3 тысячи тонн/год за 2000 год. Положительную динамику снижения потока захоронения можно заметить как по фосфору, так и по азоту. За 2013-2017 годы значения потоки захоронения азота снизились во всех подбассейнах моря. Наибольшая разница заметна в Ботническом море и в Финском заливе, где поток уменьшился на четверть. В центральной части моря в 2013-2017 годах поток азота в донные отложения был наибольшим (8,4 тысяч тонн/год), а в Датских проливах значения достигали 1,2 тысячи тонн/год (рис.17).

Из-за уменьшения нагрузки поступлений из различных источников выход биогенных соединений из донных отложений изменился.

Для этого были построены гистограммы, по которым видно, что поток выхода фосфора из донных отложений в толщу воды сократился с 2000 года по 2013-2017 годы. Наибольшие значения наблюдаются в центральной части (до

галоклина) моря, равные примерно 70 тысяч тонн/год в 2000 году и 58 тысяч тонн/год в 2013-2017 годах, а наименьшие в Ботническом заливе около 5 тысяч тонн/год. (рис.18)

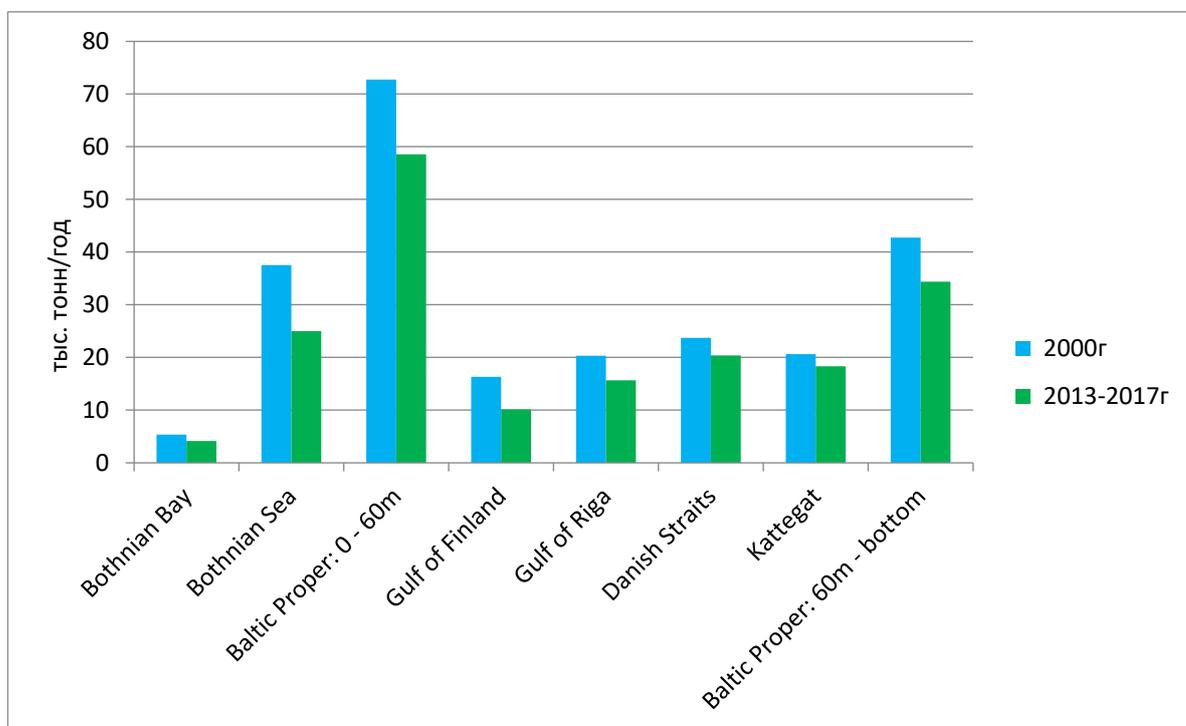


Рисунок 18 — Поток выхода фосфора из донных отложений в 2000 году и по осредненным данным за 2013-2017 годы.

Выход азота из донных отложений тоже сократился за данный период во всех подбассейнах моря. В центральной части Балтики значения выхода азота из донных отложений достигали 450 тысяч тонн/год в 2000 году, а к 2013-2017 годам уменьшились до 350 тысяч тонн/год. В то время как в Ботническом и Финском заливах значения не превышали 70 тысяч тонн/год, но к 2013-2017 годам составило около 45-50 тысяч тонн/год, что незначительно, но снизилось. В Датских проливах выход из донных отложений снизился на 25 тысяч тонн/год с 2000 года по 2013-2017 годы (рис.19).

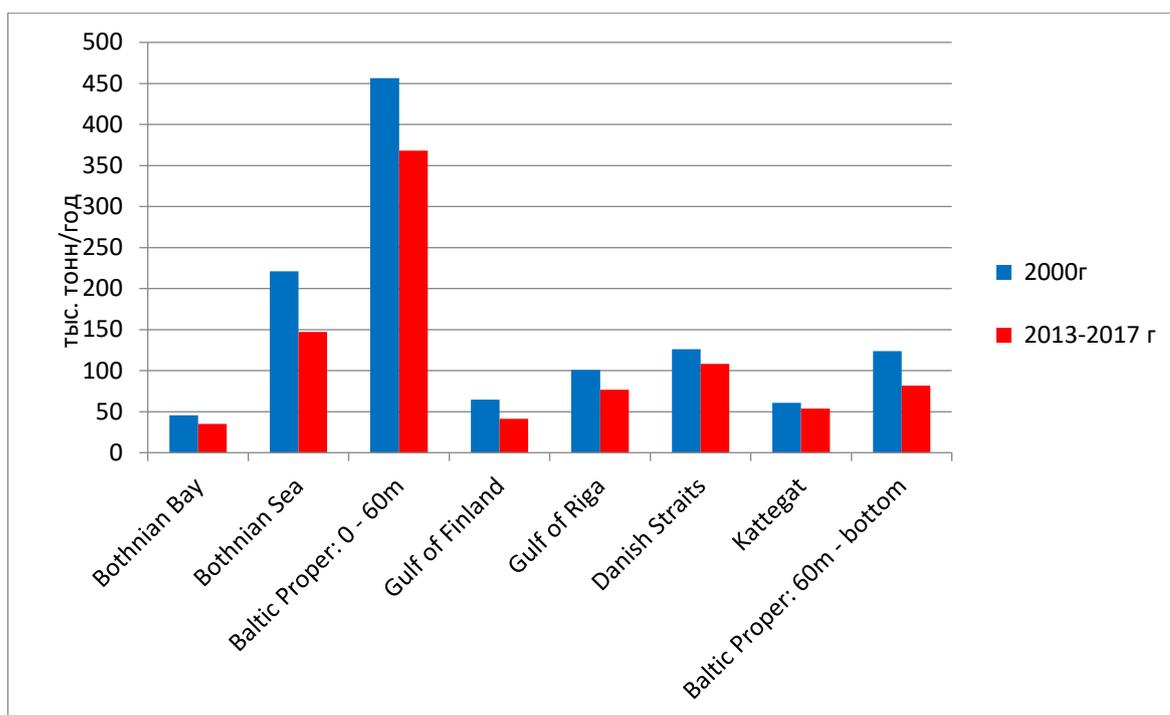


Рисунок 19 — Поток выхода азота из донных отложений в 2000 году и по осредненным данным за 2013-2017 годы.

Одним из главных факторов влияющих на выход из донных отложений биогенных соединений является концентрация растворенного кислорода в придонных водах моря. По данным взятых с DAS в 2000 году в Ботническом заливе концентрация растворенного кислорода была равна 8,17 мг/л, а к 2013-2017 году концентрация увеличилась до 8,22 мг/л, а значения выхода биогенных соединений снизились примерно на 22%. В Ботническом море выход биогенов из донных отложений снизился на 33%, а концентрация кислорода наоборот увеличилась с 6,38 мг/л до 6,55 мг/л за данный период. В 2013-2017 годах концентрация O₂ в Финском заливе увеличилась по сравнению с 2000 годом и составляет 3,1 мг/л в среднем по всему подбассейну, кроме того выход из донных отложений тоже уменьшился на 35% по азоту и на 38% по фосфору. В остальных подбассейнах моря в 2013-2017 годах ситуация имеет также положительную тенденцию. Концентрация кислорода увеличилась относительно 2000 года, а выход из донных отложений в Рижском заливе уменьшился на 23% по азоту и на 25% по фосфору. Выход из донных

отложений также уменьшился и в Центральной части моря на 20% по азоту и фосфору, в проливе Каттегат снизился на 22% по азоту и на 11% по фосфору, в Датских проливах уменьшился на 16% по азоту и на 13% по фосфору. Данное положение подтверждает модельные расчеты, то есть чем выше концентрация кислорода в воде, тем меньше будет выход биогенов из-за высокого коэффициента удержания в донных отложениях, что хорошо влияет на экологическую ситуацию в Балтийском море. Биогенные соединения остаются в донных отложениях и не участвуют во вторичном цикле эвтрофикации.

3.2 Транспорт биогенных веществ между бассейнами

Ввиду высокой взаимосвязи между подбассейнами Балтийского моря, нагрузка биогенных соединений связана с переносом вод из соседних подбассейнов на большие расстояния. Это свойство имеет свои положительные и отрицательные последствия для эвтрофикации отдельных подбассейнов Балтийского моря. На это влияет сочетание высокой буферной емкости и сильной взаимосвязи подбассейнов, что обуславливает медленную и относительно слабую реакцию трофического состояния Балтийского моря на возможное снижение биогенной нагрузки.

Рассмотрим подробнее как осуществляется горизонтальный перенос биогенных веществ из одного подбассейна в другой. Для исследования были построены схемы потоков общего фосфора и общего азота между суббассейнами Балтийского моря за период с 2000 года по 2013-2017 годы. При сравнении полученных схем можно заметить, что вынос общего азота в 2013-2017 годах из Балтийского моря в Северное сократился в сравнении с 2000 годом на 50 тысяч тонн/год. По расчетам было выявлено, что аккумулятивной зоной является Центральная часть моря, в которой задерживается около 250 тысяч тонн/год азота в 2000 году и 209 тысяч тонн/год в 2013-2017 годах. Учитывая, что в 2000 году в Балтийское море поступило около полутора миллиона тонн/год азота из разных источников, то в Северное море вышло 600 тысяч тонн/год, что составляет примерно 40% от поступления биогенов в воду.

Ситуация, сложившаяся в 2013-2017 годах, показала, что вынос в Датские проливы общего азота увеличился и составил 42% от общего поступления в воду (рис.20)

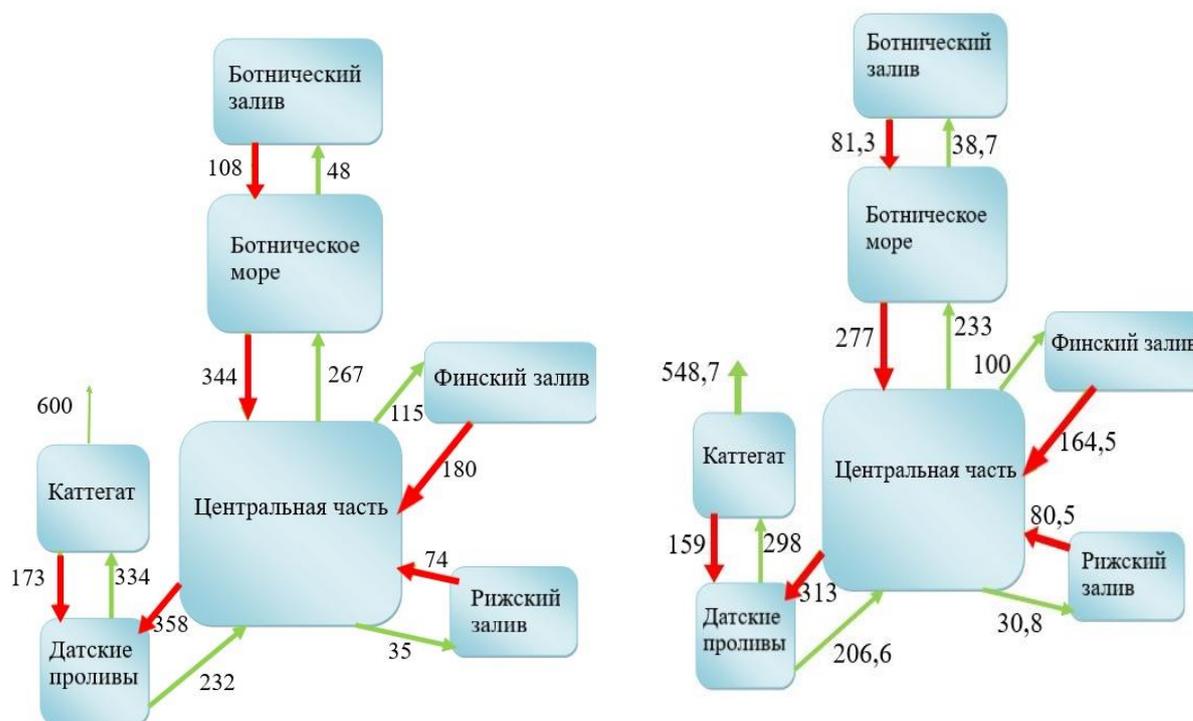


Рисунок 20 — горизонтальная адвекция общего азота(10³ тонн/год) внутри Балтийского моря за 2000 г (слева) и 2013-2017 г (справа)

Что касается переноса общего фосфора, то по схеме видно, что в 2000 году из Центральной части моря в Ботническое море поступает вместе с переносами воды 24 тысячи тонн/год, в то время как в 2013-2017 годах поступило 18,9 тонн/год, то есть поступление уменьшилось на 21%.

В Финский и Рижский заливы из Центральной части моря поступление фосфора с 2000 год по 2013-2017 годы снизилось на 20%,

Также по схеме горизонтальной адвекции общего фосфора между подбассейнами моря видно, что аккумулятивными зонами являются Ботническое море и Ботнический залив, а также Центральная часть Балтики,

где остается около 16-20% от приносимого из соседних подбассейнов и поступающего из различных источников фосфора. Также можно заметить, что вынос общего фосфора за выбранный период сократился на 3,2 тысячи тонн/год. В 2000 году доля вынесенного общего фосфора от поступившего в море из различных источников составляет 64%, а в 2013-2017 годах увеличилась и составляет около 70% (рис.21).

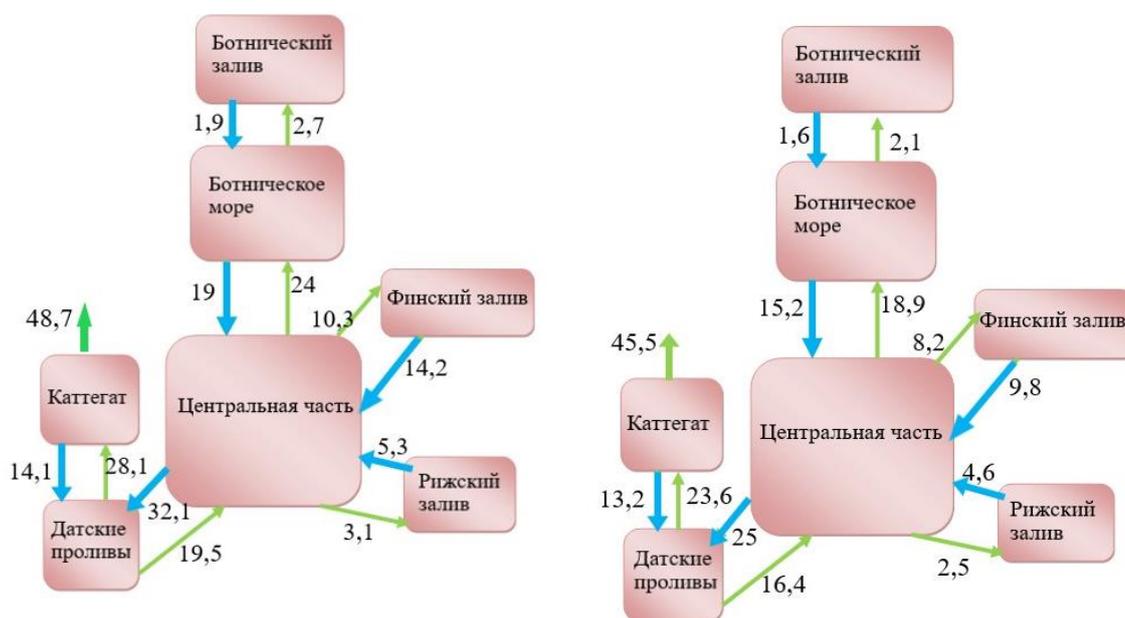


Рисунок 21 – горизонтальная адвекция общего фосфора(10³ тонн/год) внутри Балтийского моря за 2000 г (слева) и 2013-2017 г (справа)

Вывод по главе

По данным модели были исследованы основные процессы эвтрофикации, происходящие в придонных водах Балтийского моря в период 2000 года и с 2013 по 2017 год с осреднением данных, конкретно в каждом из его подбассейнов. Таким образом, захоронение и выход биогенных соединений из донных отложений за исследуемый период уменьшились. Кроме того средняя

концентрация растворенного кислорода в придонном слое в каждом из подбассейнов моря увеличилась, но Центральная часть моря все еще подвержена постоянной гипоксии.

Далее были вычислены процессы горизонтального перемещения веществ между подбассейнами моря для азота и фосфора, так как Вынос общего азота в 2013-2017 годах из Балтийского моря в Северное сократился в сравнении с 2000 годом на 0,5 тысяч тонн/год. По расчетам было выявлено, что аккумулятивной зоной является Центральная часть моря. Вынос общего фосфора за выбранный период сократился на 3,2 тысячи тонн/год. Аккумулятивными зонами для него являются Ботническое море и Ботнический залив, а также Центральная часть Балтики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования были получены следующие результаты:

- Одной из основных экологических проблем моря является эвтрофикация, вызванная чрезмерным поступлением азота и фосфора в водоем. Как следствие этого явления гипоксия в придонных водах (ниже галоклина), влияющая на процессы захоронения и выхода биогенных веществ из донных отложений;

- с помощью модели SANBALTS были проведены сравнения по биогенной нагрузке, захоронению и выходу из донных отложений азота и фосфора, а также перенос биогенных соединений между подбассейнами моря. В результате сравнения было выявлено снижение нагрузок поступления биогенов в акваторию Балтийского моря. Вследствие чего по всему морю снизились потоки захоронения на 17% и выхода из донных отложений на 14%;

- кроме этого, были обнаружены аккумулирующие зоны Балтийского моря, в которых задерживается около 20% отложений азота и фосфора;

Для достижения благоприятного экологического состояния моря требуется дальнейшие сокращения поступления в воду биогенов из рек и атмосферы, а также дальнейшие натурные исследования этого водоема.

Таким образом, путем решения поставленных задач, сформулированная во введении цель работы, заключающаяся в оценке и анализе потоков захоронения и выхода из донных отложений азота и фосфора на основе данных о нагрузках на Балтийское море по модели SANBALTS была успешно достигнута.

Список литературы:

1. Добровольский, А.Д. Моря СССР / А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин – М.: Изд-во МГУ, 1982. – С.44-47.
2. Hinrichsen, H.H. Correlation analyses of Baltic Sea winter water mass formation and its impact on secondary and tertiary production / H.H. Hinrichsen, A. Lehmann, C. Petereit, J. Schmidt – Kiel, Germany: Oceanologia, 49 (3), 2007. – P. 381-395.
3. Leppäranta, M. The physical oceanography of the Baltic Sea / M. Leppäranta, K. Myrberg Springer-Verlag – Berlin: Springer, 2009. – P.378.
4. Madsen, K. S. Long-term temperature and salinity records from the Baltic Sea transition zone / K. S. Madsen, N.K. – Helsinki: Boreal Environment Research 14(1), 2009. – P.125-131.
5. Biogeochemical functioning of the Baltic Sea / K. Kulinski, G. Rehder. – Helsinki: Earth System Dynamics Discussions, 2022. – P.633-685.
6. Литина, Е.Н. Динамика гипоксических зон в Балтийском море на рубеже XX и XXI веков / Литина Е.Н., Захарчук Е.А. – Водные ресурсы 47(3), 2020. – P.322-329.
7. Fredrik, W. Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea / Fredrik Wulff, Alexander Sokolov, Oleg Savchuk. – Stockholm: Technical Report No. 10, 2013. – P.70.
6. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2020, том 47, № 3, с. 322–329
8. Savchuk, Oleg P. Modeling the Baltic Sea Eutrophication in a Decision Support System / Oleg P. Savchuk, Fredrik Wulff – AMBIO A Journal of the Human Environment, 2007. – P.8.
9. Savchuk, Oleg P. Simple as Necessary Long-Term large-Scale simulation model of the nitrogen and phosphorus biogeochemical cycles in the Baltic Sea – Stockholm: Department of Systems Ecology, 2006. – P.23.

10. Pawlak, Janet F. Eutrophication in the Baltic Sea / Janet F. Pawlak, Maria Laamanen and Jesper H. Andersen // Baltic Sea Environment Proceedings No. 115A. – Helsinki: Helsinki Commission, 2009. – P.138.

11. Woa23 // webODV Explore URL: <https://explore.webodv.awi.de/> (дата обращения 20.05.24).

12. Волощук Е.В. Оценка влияния абиотических и биотических факторов на экологическое состояние придонных вод и донных отложений Финского залива в условиях изменения климата: диссертация кандидат наук географических наук. – СПб, 2016. – С.122.

13. Data Assimilation System // Stockholm university URL; <https://nest.su.se/das/> (дата обращения 31.05.2024).

14. Towards a Baltic Sea unaffected by Eutrophication / Helcom Ministerial Meeting, 2007. URL: http://www.helcom.fi/BSAP/en_GB/intro (дата обращения 31.05.2024).

15. Весман, А.В. Современные проблемы Балтийского моря // Современные научные исследования и инновации, 2012. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2012/03/10613> (дата обращения: 01.06.2024).

16. План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю // Helsinki Commission URL: https://helcom.fi/BSAP/en_GB/intro (дата обращения 02.06.2024).