



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)

«Распространение гипоксических зон в Балтийском море: причины и
последствия»

Исполнитель: Волик Марина Евгеньевна

Руководитель: к. г. н., Волощук Екатерина Васильевна

«К защите допускаю»

И.о. Заведующего кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2025г.

г. Санкт-Петербург
2025

Оглавление	
Введение.....	3
1. Физико-географическая характеристика Балтийского моря	5
1.1. Климатические особенности Балтийского моря.....	6
1.2.Термохалинная структура вод	9
1.4. Эвтрофирование моря и развитие гипоксии.	11
1.5. Меры по защите Балтийского моря	18
2. Особенности гидрохимических условий в придонных слоях Балтийского моря за многолетний период.....	22
2.1. Материалы и методы	22
2.2. Гидрохимические условия придонных вод Ландсорсткой впадины.....	23
2.3. Гидрохимические условия придонных вод на станциях восточнее о. Готланд.....	28
2.4. Гидрохимические условия придонных вод Готландской впадины.	32
2.5. Гидрохимические условия придонных вод на станциях западнее о. Готланд.....	37
3. Связь крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике с кислородными условиями в Балтийском море.	45
3.1. Влияние индекса NAO на заливы североморских вод.....	45
3.2. Влияние заливок на гидрохимические условия на разрезе станций Готландской котловины.	48
4. Последствия распространения гипоксических зон в Балтийском море.	57
Заключение	60
Список использованных источников	62

Введение

Балтийское море — одно из самых уникальных и чувствительных морских экосистем в мире. Это обуславливается его особенным строением и гидрологическим режимом, а также его географическим положением. Яркой характеристикой Балтийского моря является его низкая соленость, что во многом связано со значительным количеством пресной воды, поступающей из рек и озер, а также ограниченным обменом с открытым океаном. Помимо этого, бассейн Балтийского моря, занимающий площадь в четыре раза большую, чем само море, является местом проживания более 75 миллионов человек. В результате этого на море оказывается значительное антропогенное воздействие.

Эти факторы создают особые условия для жизни морских организмов, а также делают экосистему более уязвимой к изменениям окружающей среды. Кроме этого в регионе также наблюдаются изменения климата, также оказывающие воздействие на функционирование экосистемы.

Гипоксические зоны в море — это участки, где концентрация растворённого кислорода (O_2) становится менее 2 мл/л, что приводит к деградации водных экосистем и их гибели.

В Балтийском море гипоксия возникает из-за высокой антропогенной нагрузки, устойчивой стратификации, препятствующей перемешиванию поверхностных, обогащённых кислородом вод и придонных гипоксических, а также из-за ограниченного водообмена с Северным морем.

Возникновение и распространение гипоксических зон в Балтийском море приводит к массовой гибели донных организмов, снижению биоразнообразия, а также к экономическим потерям в промысле и туризме прибрежных регионов.

Именно по причине специфических особенностей и уязвимости Балтийского моря и его экосистем, проблемой, имеющей достаточную

актуальность в данный момент, является распространение гипоксических зон в центральной Балтике.

Таким образом, целью данного исследования становится выявление особенностей гидрохимических условий Балтийского моря в условиях наблюдаемой гипоксии глубоководной части вод.

Задачами является:

1. Дать физико-географическое описание района исследования.
2. Выявить особенности гидрохимических условий в Ландсборской и Готландской впадинах за многолетний период.
3. Исследование связи крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике с кислородным режимом придонных вод Балтийского моря.
4. Оценить влияние затoka североморских вод в 2003 году на гидрохимические характеристики разреза в Готландской впадине.

1. Физико-географическая характеристика Балтийского моря

Балтийское море является внутриконтинентальным (внутриматериковым) шельфовым бассейном Атлантического океана. Оно омывает берега Дании, Германии, Польши, Латвии, Литвы, Эстонии, России, Финляндии и Швеции [1].

Балтийское море имеет площадь 419 тыс. км² и, по своему геологическому строению, является неглубоким морем с сильно расчлененным рельефом дна. В нем преобладают глубины менее 100 м, средней при этом считается глубина 51 м, но посередине его северной части имеется район с глубинами более 100 м, а максимальная глубина моря наблюдается в Ландсортской котловине и составляет 470 м [1, 2].

Крайняя северная точка Балтийского моря находится на полярном круге (65°50' с. ш.), а южная — в Щецинском заливе у города Висмара (53°40' с. ш.). Таким образом, длина моря по меридиану составляет 12°10', что примерно равно 1350 км. Западная граница моря расположена недалеко от порта Фленсбург (9°25' в. д.), а восточная — в порту Санкт-Петербурга (30°15' в. д.), что означает, что по параллели море вытянуто на 20°50', что также примерно равно 1350 км (по параллели 54° с. ш.). Расстояние от порта Торнео, который находится на крайнем севере моря, до мыса Скаген составляет около 1800 км. Из-за большой вытянутости вдоль меридиана и параллели отдельные районы Балтийского моря размещаются в различных физико-географических и климатических зонах. Это в свою очередь оказывает влияние на океанологические процессы, происходящие в море и отдельных его районах [1].

Связь Балтийского моря с Атлантическим океаном осуществляется через Северное море, проливы Скагеррак, Каттегат и мелководные проливы Большой и Малый Бельт, Эресунн (Зунд) и Фемарн-Бельт, (проливов глубина на порогах 7-18 м). Именно затрудненный водообмен между Балтийским и

Северным морями играет важную роль в формировании природных особенностей Балтийского моря [1].

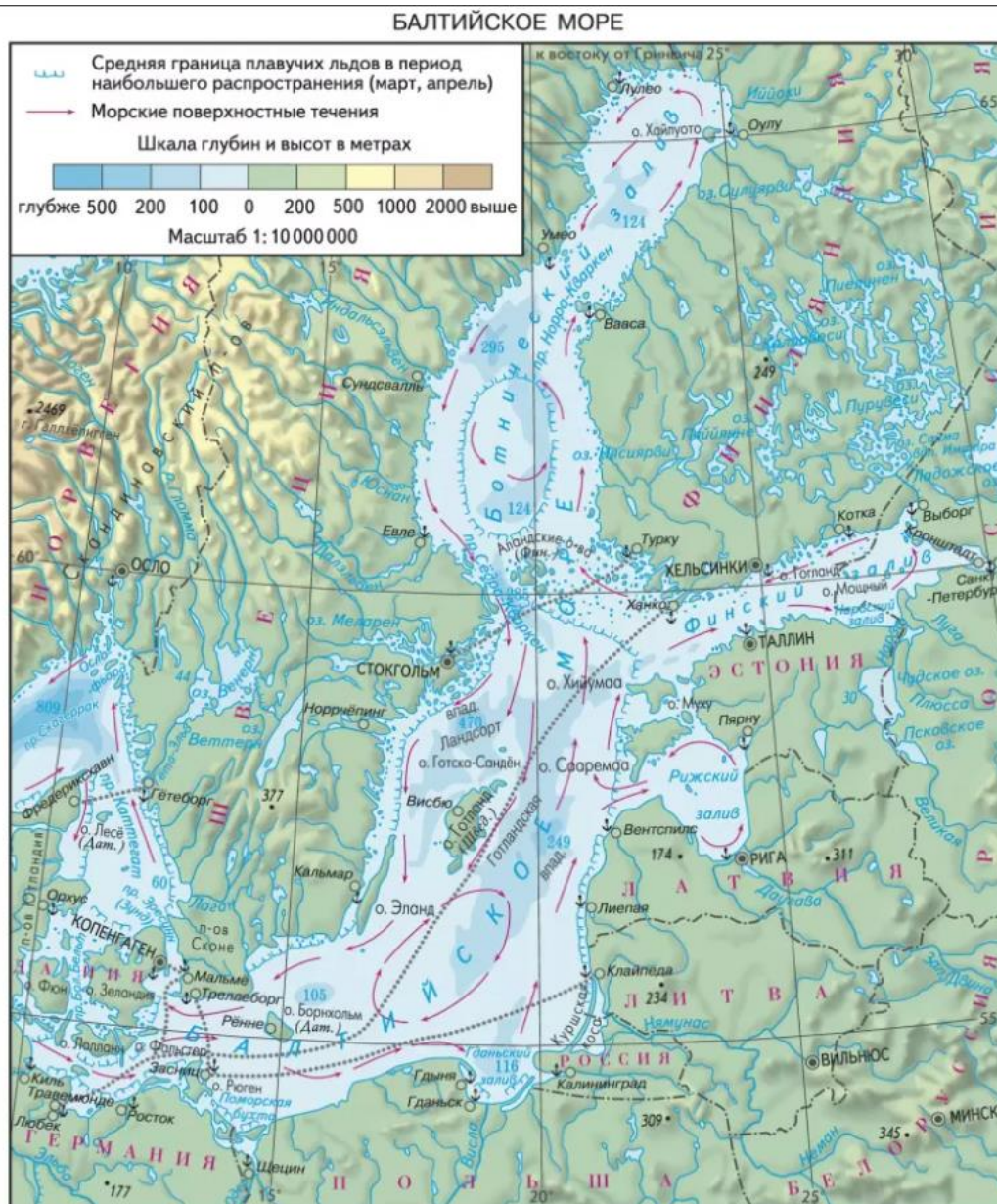


Рисунок 1. Физическая карта Балтийского моря с поверхностными течениями [3].

1.1. Климатические особенности Балтийского моря

Для Балтийского моря характерен умеренный морской климат с чертами континентального [3].

Циклоническая деятельность достигает своего пика в осенне-зимний период, когда циклоны приносят облачную и дождливую погоду с сильными западными и юго-западными ветрами. Средняя температура воздуха в феврале

варьируется от $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на юге до $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в центральной части моря, достигая $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на севере и востоке, а в северной части Ботнического залива может опускаться до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Иногда на Балтику проникает холодный арктический воздух, который может понижать температуру до $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Летом также дуют западные ветры, но они менее сильные и приносят прохладную влажную погоду с Атлантического океана. В июле температура воздуха составляет $14\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в Ботническом заливе и $16\text{--}18\text{ }^{\circ}\text{C}$ в других районах моря. Редкие поступления теплого средиземноморского воздуха могут кратковременно повышать температуру до $22\text{--}24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков колеблется от 400 мм на севере до 800 мм на юге [3].

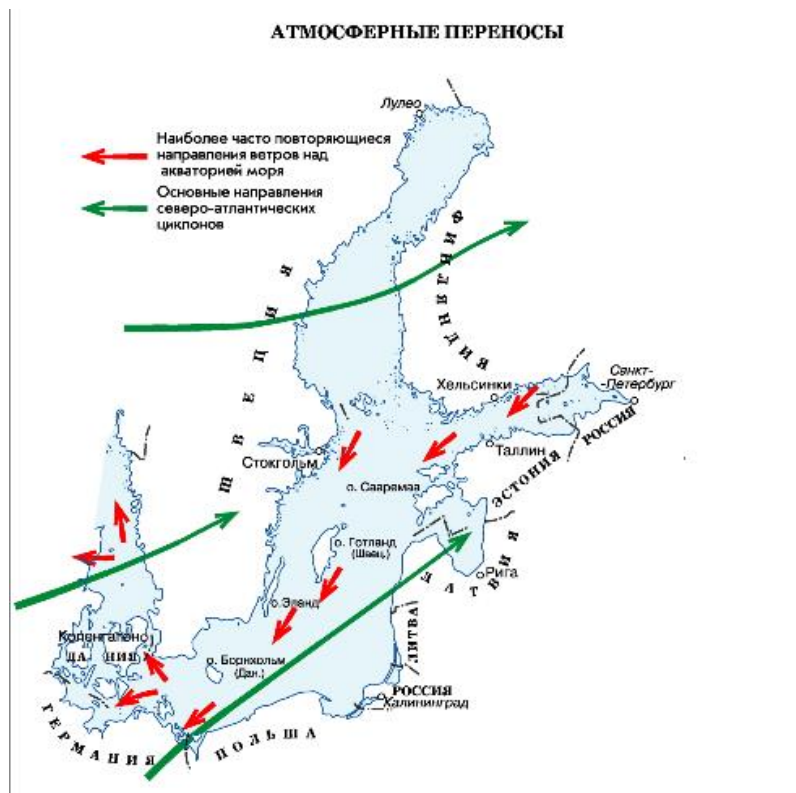


Рисунок 2. Схема атмосферных переносов над Балтикой.

Средняя месячная скорость ветра повсеместно составляет $3\text{--}7\text{ м/с}$, причем осенью и зимой она больше, чем весной и летом. В вершине Ботнического залива в районе порта Хернёсанд, а также на северном побережье пролива Скагеррак в районе портов Осло и Стрёмстад средняя месячная скорость ветра около 2 м/с [2].

Летом на побережье хорошо выражен суточный ход скорости ветра. Как правило, наименьшая скорость ветра отмечается ночью и утром, а наибольшая после полудня [2].

Лед в описываемом районе образуется ежегодно, но сроки его появления и исчезновения, а также степень распространения зависят от суровости зимы [2].

Процесс льдообразования происходит в направлении с востока на запад. Первый лед, как правило, появляется в заливах и бухтах, глубоко вдающихся в берег. В западной части моря первый лед в суровые и очень суровые зимы появляется в середине или в конце декабря, а в умеренные и мягкие - в январе - начале февраля. В проливах Зунд, Большой Бельт, Малый Бельт, Каттегат и Скагеррак первый лед появляется в середине января (в проливе Скагеррак в суровые зимы - в начале января) [2].

Максимальное развитие ледяного покрова отмечается в конце февраля – марте [2].

Разрушение ледяного покрова в восточной части моря происходит в направлении с запада на восток. В районе проливов Зунд, Большой Бельт, Малый Бельт, Каттегат и Скагеррак разрушение ледяного покрова начинается в середине марта; в апреле проливы уже полностью свободны ото льда. Средняя толщина льда в описываемом районе невелика (0,1 - 0,3 м), но в суровые и очень суровые зимы она может увеличиваться до 0,8 м, а иногда до 1 м [2].

В открытом море, а также в открытых частях заливов обычно наблюдается дрейфующий лед, состоящий из битого льда и ледяных полей, перемещающихся в направлении ветра. Сплоченность дрейфующего льда обычно 8-10 баллов, в апреле она понижается на 1 - 2 балла [2].

Средняя продолжительность ледового периода в южной части моря 20-25 дней, а в северной части она достигает 160-210 дней. Наибольшая продолжительность этого периода (220-245 дней) наблюдается в

Ботническом заливе в районе портов Евле, Кеми, Марианхамина, Оулу, Рахе, Торнео [2].

1.2.Термохалинная структура вод

Главными факторами, влияющими на термохалинный режим моря, являются солнечное нагревание поверхности, сток рек и приток глубоководных океанических вод. Эти элементы формируют общую картину термохалинных условий в море. В верхних слоях воды температура может значительно колебаться, тогда как на глубинах свыше 50 метров она остается довольно стабильной: в южной части моря температура держится на уровне 3–4 °С, а в северной части Ботнического залива близка к нулю [4].

В летние месяцы температура воды на поверхности, как правило, близка к температуре воздуха. На восточном побережье вода теплее из-за влияния прогретых воздушных масс с юга, тогда как на западном побережье температура ниже из-за холодных течений, идущих с севера из Ботнического залива. Зимой ситуация меняется: восточные участки моря становятся холоднее западных, так как они находятся под воздействием охлажденных воздушных масс с материка, в то время как западные области получают теплые воздушные массы из Атлантики [4].

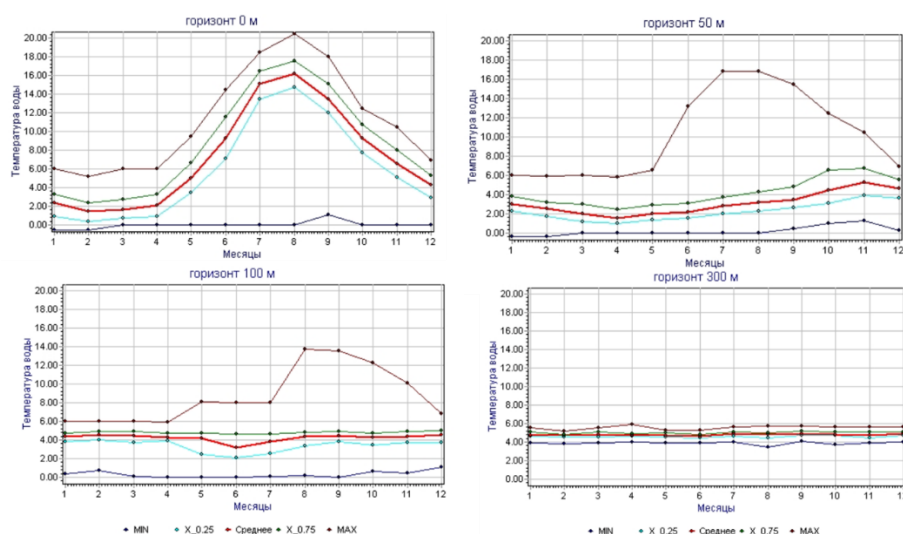


Рисунок 3. Годовой ход температур воды на разных горизонтах в Балтийском море за период наблюдений 1900-2005 [7].

Ограниченный обмен воды с Северным морем и большой приток речных вод приводят к низкой солености в большинстве районов акватории. В Балтийское море впадает около 250 рек. Речной сток в среднем составляет 472 км^3 в год и по территории он распределяется неравномерно, в центральную часть попадает около 112 км^3 . Количество пресной воды атмосферных осадков (172 км^3 в год) практически равно испарению. На поверхности моря соленость уменьшается с запада на восток, что связано с поступлением речных вод из восточной части бассейна Балтики. В северных и центральных областях бассейна соленость также немного снижается с востока на запад, так как в циклонических потоках соленые воды перемещаются с юга на северо-восток вдоль восточного побережья более активно, чем вдоль западного. Снижение солености наблюдается также и с юга на север в заливах [4].

Почти во всем море заметно значительное увеличение солености от поверхности к дну. Изменение солености с глубиной происходит в основном одинаково по всему морю, за исключением Ботнического залива. В юго-западных и отчасти центральных районах моря она плавно и незначительно увеличивается от поверхности до горизонтов 30–50 м, ниже, между 60–80 м, располагается резкий слой скачка (галоклин), глубже которого соленость снова несколько увеличивается к дну. В центральной и северо-восточной частях соленость очень медленно возрастает от поверхности до горизонтов 70–80 м, глубже, на горизонтах 80–100 м, залегает галоклин, и далее соленость слегка увеличивается до дна [4].

В осенне-зимний период в Балтийское море поступает больше вод из Северного моря, в летне-осенний период этот приток уменьшается. Это приводит к изменению солености глубинных вод. Осенью и зимой соленость верхних слоев немного увеличивается из-за снижения речного стока и процессов, связанных с образованием льда. Весной и летом соленость на поверхности в среднем снижается на $0,2\text{--}0,5\text{‰}$ по сравнению с холодным временем года, что связано с влиянием речного стока и таянием льда. Кроме сезонных изменений, в Балтийском море также наблюдаются значительные

межгодовые колебания солености, что отличает его от многих других морей Мирового океана. Эти изменения в солености играют важную роль в регулировании различных физических, химических и биологических процессов. Из-за низкой солености поверхностных вод их плотность также невысока и уменьшается с юга на север, оставаясь относительно стабильной в разные сезоны [4].

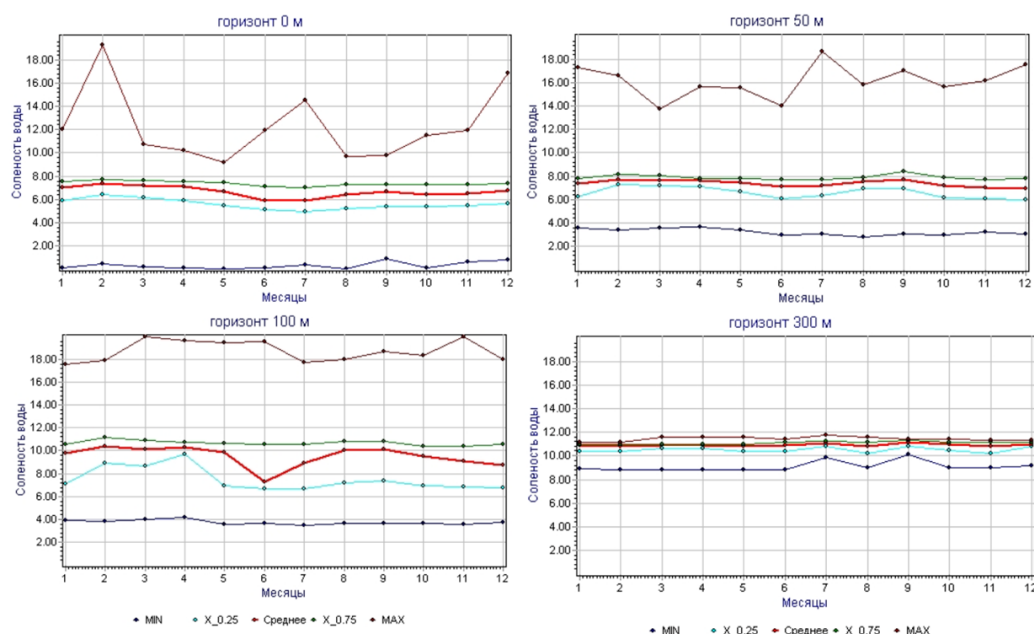


Рисунок 4. Годовой ход солености воды в ‰ на разных горизонтах в Балтийском море [7].

1.4. Эвтрофирование моря и развитие гипоксии.

Нагрузка на Балтийское море выражается в разных видах загрязнения, в том числе и в химическом. Состав воды Балтийского моря определяется взаимодействием трех основных факторов: речным стоком впадающих в море рек; периодическими затоками, биохимическими процессами продуцирования (в процессе фотосинтеза), деструкции органического вещества и биологического круговорота веществ. Наиболее важными в рассмотрении элементами, для понимания гипоксии, в Балтийском море являются кислород, азот и фосфор [8].

Кислород. В Балтийском море распределение и изменчивость кислорода существенно отличаются от открытого океана и большинства других морей.

Это обусловлено его затрудненным вертикальным обменом из-за устойчивой стратификации. При этом потребление кислорода увеличивается с приближением ко дну и в глубинах оно выше, чем его поступление из поверхностных вод. Основные источники кислорода в Балтийском море - это его абсорбция (поглощение) из атмосферы, при условии его недостаточного (ниже 100 %) содержания, фотосинтеза в верхнем (эвфотическом) слое в течение вегетационного периода и затоки североморских вод. Расходуется кислород на различные окислительные процессы: биологические (дыхание водных организмов), биохимические (дыхание бактерий, разложение органических веществ) и химические (окисление химических элементов и соединений) [8].

Когда растворенный кислород почти исчерпан, бактерии начинают использовать для дыхания другие вещества. Сначала используется кислород нитратов, превращающихся в атмосферный азот (денитрификация), а затем по исчерпанию нитратов, используется кислород сульфатов (сульфатредукция), что в последствиях приводит к образованию сероводорода [8].

Сезонный ход кислорода в поверхностном слое вод имеет максимум весной и минимум летом. Годовой максимум связан с весенней вспышкой фитопланктона и фитобентоса (на мелководье). Летний минимум обусловлен снижением фотосинтетической деятельности фитопланктона, связанным с истощением запасов биогенных элементов, и уменьшением растворимости кислорода в воде из-за прогрева поверхностного слоя и увеличения интенсивности окислительных процессов при повышении температуры. С началом холодного сезона содержание кислорода начинает увеличиваться на поверхности за счет абсорбции из атмосферы, а по мере усиления конвекции – и на нижележащих горизонтах. С началом весеннего прогрева содержание кислорода на поверхности быстро уменьшается; в подповерхностных более холодных слоях этот процесс замедлен, подповерхностный максимум кислорода появляется в июне и существует до октября [8].

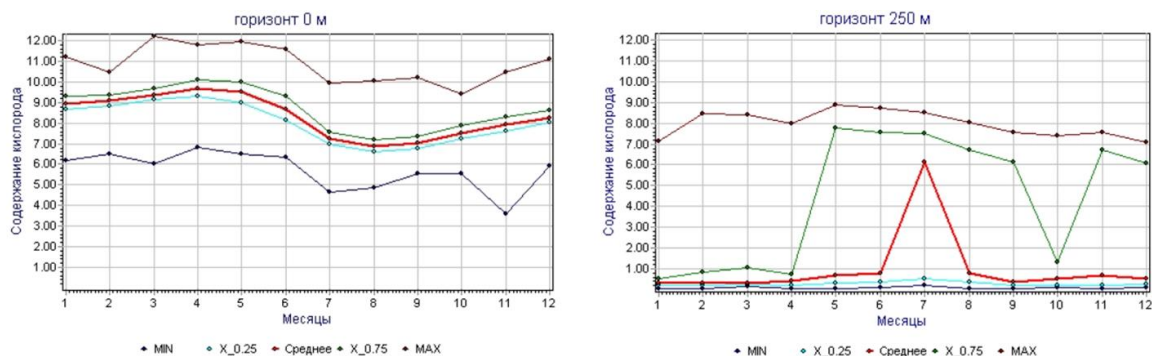


Рисунок 5. Годовой ход содержания кислорода на горизонтах в 0 и 250 м в Балтийское море [2].

Фосфор. Фосфор является ключевым элементом в экосистемах всех водоемов. Он необходим для роста водных организмов, так как является важным питательным элементом, который циркулирует в пищевой цепи, однако его избыток может привести к плохим последствиям. Естественными источниками его поступления являются речные стоки, которые переносят фосфор из экосистем бассейна непосредственно в само море, разложение организмов, а также в результате эрозии почвы. Наиболее крупным источником поступления является антропогенный фактор. Тратиться фосфор на поглощение его водными растениями, биологические процессы, а также осаживается на дно.

Сезонный ход фосфатов в поверхностном слое Балтийского моря имеет максимум зимой и минимум летом. Зимний максимум содержания биогенов над галоклином определяется двумя причинами: Происходящее в конце зимы наиболее интенсивное вертикальное перемешивание верхнего слоя, его осолонение и обогащение биогенами из нижележащих слоев и ослабление поглощения питательных солей в процессе новообразования органического вещества в это время из-за недостатка солнечной энергии. Весной содержание фосфатов резко снижается по обратным причинам — ослабление или даже прекращение конвективного перемешивания (а значит и поступления фосфатов из нижележащих слоев) и весенняя вспышка фотосинтеза. К лету процесс фотосинтеза ослабевает из-за лимитации его содержанием биогенов, а величина фосфатов достигает минимума [1].

Азот. Соединения азота представлены рядом органических и неорганических соединений. Органические формы содержатся главным образом в белках тканей живых организмов, продуктах их жизнедеятельности и распада. К важнейшим неорганическим соединениям относятся ионы аммония NH_4^+ , нитритов NO_2^- и нитратов NO_3^- , а также растворенные газы – молекулярный азот N_2 и закись азота N_2O [8].

Регенерация азота происходит медленно и осуществляется специфическими бактериями-нитрификаторами при отсутствии дефицита кислорода. В случае анаэробных условий идет процесс денитрификации, осуществляемый бактериями-денитрификаторами, в ходе которой нитраты восстанавливаются через нитриты до молекулярного азота, закиси азота и аммония; денитрификация рассматривается как один из важнейших «стоков», выводящих азот из биогеохимического круговорота. Азот поступает в повышенных количествах со стоком из-за сельскохозяйственной деятельности [6, 8].

Максимум минерального азота, поступающего в море с речным стоком, приходится на весну, поступающего из атмосферы – на лето.

Динамика азота в условиях Балтийского моря имеет сложный характер, что связано с особенностями его биогеохимического круговорота, заметную роль в котором играют процессы азотфиксации и денитрификации [8].

Балтийское море получает чрезмерное количество питательных веществ (фосфора, азота), что приводит к эвтрофикации водоема, сопровождающегося повышенным цветением воды и последующим увеличением потребления кислорода.

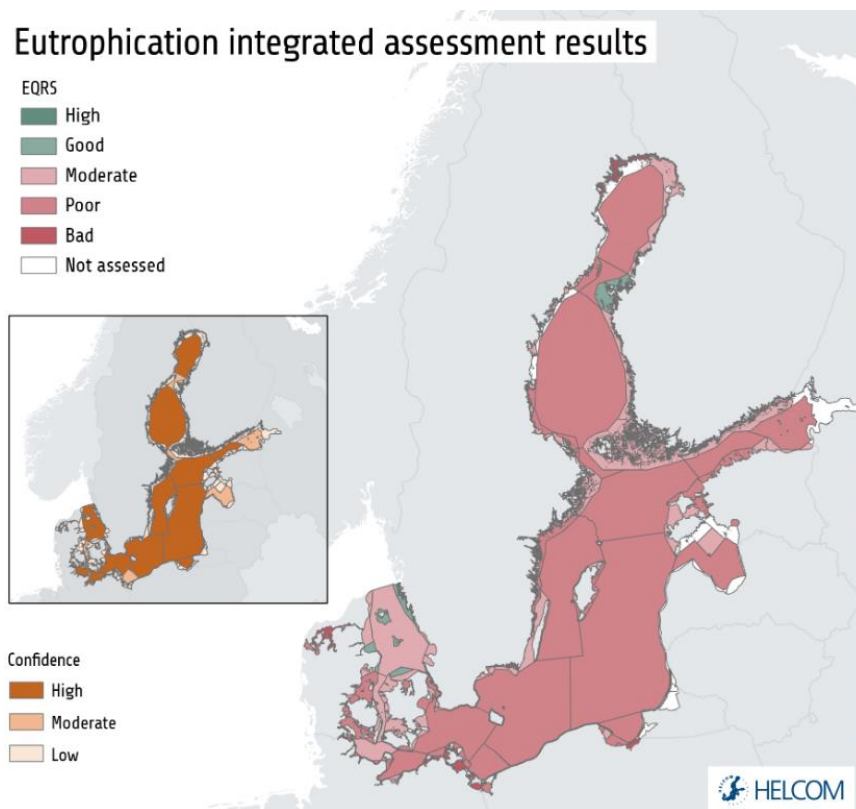


Рисунок 6. Комплексное состояние эвтрофикации в Балтийском море 2023 г [7].

Как уже говорилось выше, Гипоксическая зона – область, в которой содержание кислорода ниже необходимых, для существования жизни, условий (<2 мг/л O_2). Из-за суровости данных условий, порой такие зоны называют «Мёртвыми».

При рассмотрении 6 и 7 рисунков видно, что наибольшие гипоксические зоны находятся в области высокого уровня эвтрофикации.

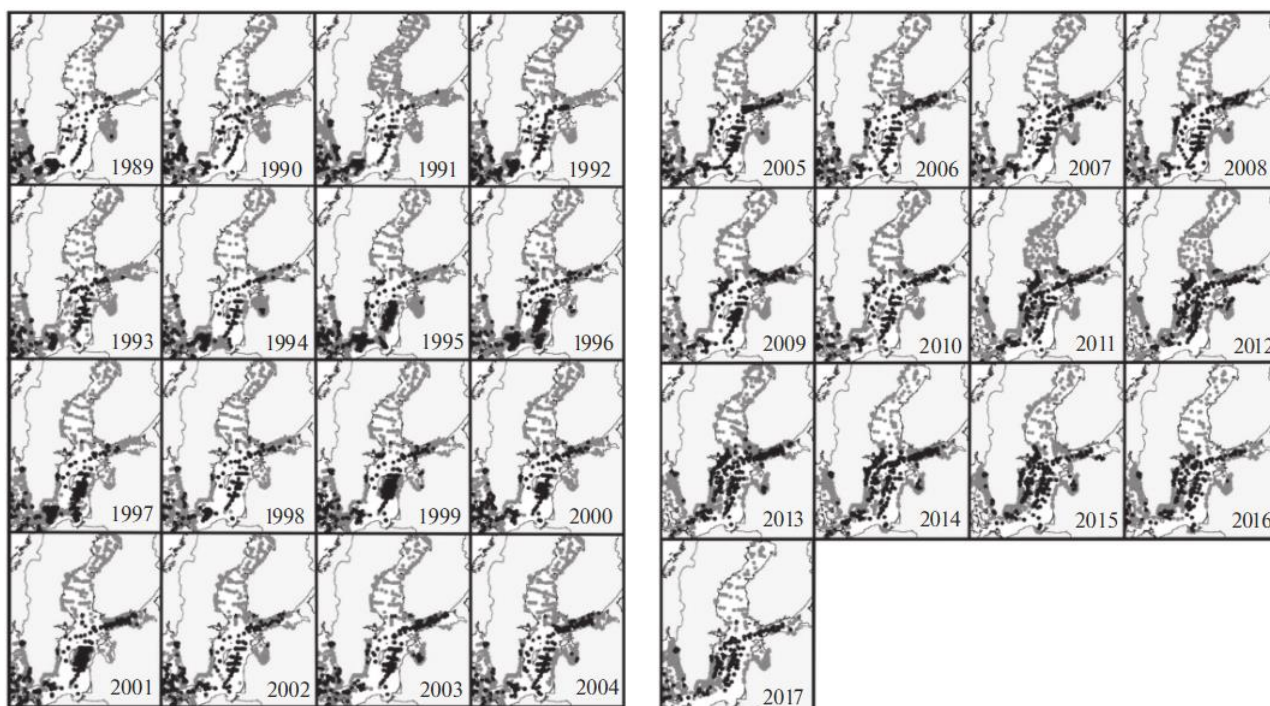


Рисунок 7. Динамика развития гипоксических зон (чёрные метки) с 1989 г. по 2017 г. [5].

При рассмотрении рисунка 7 видно, что на данный момент Балтийское море достаточно серьёзно подвержено данной проблеме и «мёртвые» зоны наблюдались уже в 1989 году, ежегодно возникая после, иногда увеличиваясь в площади, иногда уменьшаясь. Для дальнейшего исследования крайне необходимо понимать, почему вообще появляются зоны низкого содержания кислорода. Одной из причин является рассмотренная выше эвтрофирование водоема. Из других факторов можно выделить:

Устойчивая стратификация вод. Циркуляция вод Балтийского моря, которая в основном является циклонической, сильно влияет на гидрологические и гидрохимические условия, как и поступление пресного речного стока, климат и ограниченный водообмен с Северным морем. [3, 4].

В результате слияния распресненных вод, выходящих из Ботнического и Финского заливов, в северной части моря формируются поверхностные течения, средняя скорость которых примерно равна 3-4 см/с. Водообмен с Северным морем в среднем составляет 1660 км³ в год и проявляется в глубинной циркуляции вод через датские проливы. Более пресные воды с поверхностным стоковым течением уходят из Балтийского моря в Северное

море, солёная североморская вода с придонным течением поступает через проливы из Северного моря. [3, 4].

Из-за указанных выше аспектов, гидрологическая структура Балтийского моря в большинстве районов представлена поверхностной и глубинной водными массами, разделёнными тонким промежуточным слоем. [3, 4].



Рисунок 8. Распределение солёности на разрезе в Балтийском море [4].

Затоки североморских вод. Проникновение солёных североморских вод в Балтийское море является важным элементом гидрологического, термохалинного и гидрохимического режима моря по всей его толще и у дна. Называют это проникновение — затоком. Небольшие затоки являются постоянным явлением, однако существенное влияние на режимы моря оказывают редкие, мощные затоки, которые обновляют придонный слой воды вплоть до Финского залива. При сокращении притока солёной воды в Балтийском море на больших глубинах и во впадинах рельефа дна создаются условия для гипоксии и последующего появления заморных явлений, потому это явление наблюдается в центральной Балтике, как постоянное и многолетнее, в то время как в более мелководных областях, таких как Финский Залив, это сезонное явление.

Количество мощных и сильных затоков значительно снизилось, что, естественно, оказало влияние на обновление вод в придонном слое Балтики, и, соответственно, ограничило поступление кислорода, что в том числе является фактором образования гипоксических областей.

Таким образом, можно сказать, что, если не уменьшить антропогенную нагрузку на Балтийское Море, гипоксические зоны будут продолжать увеличиваться возникать и увеличиваться в площади, так как повлиять мы можем только на человеческий фактор.

1.5. Меры по защите Балтийского моря

Балтийское море страдает от масштабного загрязнения, поступающего с разных источников. В основном загрязнение идёт из точечных источников на суше или в море (промышленные предприятия, электростанции, места сброса стоков, очистные сооружения) и из диффузных источников с речным и поверхностным стоком (например, сельскохозяйственные загрязнения, бытовые отходы, транспорт). Кроме того, загрязняющие вещества переносятся по воздуху в Балтийский регион с Британских островов, из Центральной и Восточной Европы и даже из более удалённых районов [11].

В случае гипоксии, основными влияющими биогенами, которые в больших количествах поступают в Балтийскую экосистему, являются азот (N) и фосфор (P). Поступление фосфора и азота в Балтийское море извне, включая поступление из Датских проливов и Каттегата, оценивается в 53 000 тонн P и 1 060 000 тонн N в год. Примерно 50% азота приходит из атмосферы, в том числе через азотфиксацию. Фосфор приносится главным образом с суши- 90%. Наибольший прирост поступления азота и фосфора произошёл, скорее всего, после 1950 г [11].

Также необходимо учитывать, что уже сейчас на дне находится большое количество донных отложений, в которых захоронены загрязняющие и биогенные элементы. И их накопление будет только продолжаться при сохранении нынешней экологической ситуации.

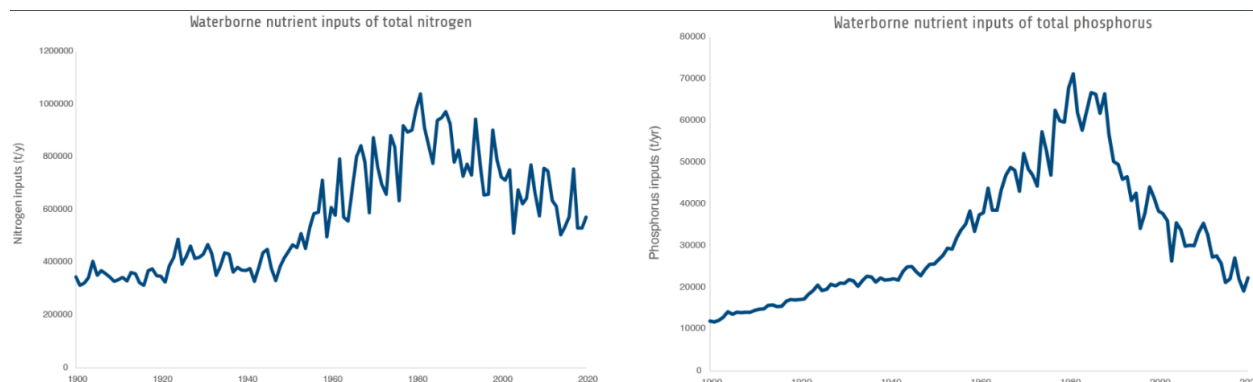


Рисунок 9. Временной ход нагрузки с водосборного бассейна общего азота (слева) и общего фосфора (справа) в Балтийское море. [7].

Проблемой загрязнения Балтики начали заниматься уже достаточно давно, после вступления в силу в 1980 г. Конвенции по защите морской среды Балтийского моря экологическая ситуация улучшилась за счёт введения в строй большого количества очистных сооружений сточных вод, сокращения использования химических удобрений, контроля за техническим состоянием судов. Тем не менее, загрязнение все ещё остается достаточно серьёзным [3].

В 1988 году в Декларации министров ХЕЛКОМ (ХЕЛКОМ 1988) были согласованы меры по сокращению нагрузки биогенных веществ на уровне порядка 50% загрязнения, а достижение уровня загрязнения Балтийского моря, не затронутого эвтрофикацией, было определено в качестве одной из целей Плана действий по Балтийскому морю в 2007 году (ХЕЛКОМ 2007). С 1980-х годов поступление биогенных веществ в Балтийское море сократилось, а в некоторых суббассейнах произошло значительное сокращение. Например, поступление азота через сток в Балтийское море в настоящее время находится на уровне 1960-х годов, а поступление фосфора — на уровне 1950-х годов. В 2015 году общий объем поступления азота в Балтийское море был примерно на 7 % больше максимально допустимого значения, в то время как поступление фосфора оставалось на 44 % выше этого порогового значения (HELCOM 2018) [12].

В России также прибегают к мерам, для уменьшения загрязнения Балтийского моря, например, с начала XXI века в Петербурге планомерно

реализуется Программа по прекращению сброса неочищенных сточных вод в водные объекты.

Наблюдаемое в регионе потепление климата является ещё одним фактором, который оказывает влияние на состояние экосистемы.

Изучение изменений климата показывает, что потепление в регионе Балтийского моря будет продолжаться в XXI веке, с основным влиянием на температуру воды и ледовые условия. В ближайшие десятилетия ожидается повышение температуры поверхностного слоя моря, изменение стока рек, возможное распреснение, а также сокращение длительности ледового периода и площади ледяного покрытия. [13].

По региональным моделям «океан—атмосфера» прогнозируется, что к концу XXI века среднегодовая температура воздуха в Балтийском регионе повысится на 1,5–4,3 °С, что приведёт к увеличению температуры поверхности моря. Изменения экосистемы Балтийского моря анализируются с помощью модельных оценок, которые учитывают климатические сценарии и уровни биогенной нагрузки, включая сценарий снижения загрязнений по Плану действий по Балтийскому морю (BSAP). Все эти оценки сходятся в том, что ожидается рост поступления биогенных веществ с суши и расширение зон гипоксии, однако масштабы изменений существенно варьируются в зависимости от используемых глобальных, региональных и балтийских моделей. Согласно сценариям BSAP, изменения в поступлении питательных веществ будут оказывать более значительное влияние на биогеохимические процессы в Балтийском море, чем климатические изменения. Высокие уровни биогенной нагрузки усиливают негативное воздействие климатических факторов на экосистему. Без снижения поступления питательных веществ процессы эвтрофикации и дефицита кислорода будут только усиливаться. В мелководных районах снижение концентрации кислорода связано с ростом температуры, тогда как в глубоководных зонах оно определяется уровнем биогенной нагрузки. За последние десять лет в Финском заливе наблюдается

заметное повышение температуры, что также отражается на состоянии экосистемы. [13].

Таким образом, экосистема Балтийского моря является сложной, чувствительной и уязвимой, требующей внимания и защиты, и уже в данный момент подверженная серьёзной опасности, из-за уменьшения количества мощных затоков вод Северного моря, высокой степени загрязнения биогенами и изменения климата, за чем следует распространения зон с дефицитом кислорода, где невозможно устойчивое поддержание жизни, что в будущем будет приводить к проблемам, в том числе, с рыболовным промыслом.

2. Особенности гидрохимических условий в придонных слоях Балтийского моря за многолетний период.

2.1. Материалы и методы

Как обозначалось в первой главе – гидрохимический режим Балтийского моря имеет свои особенности. Именно по этой причине по всей территории Балтики достаточно долгое время проводятся мероприятия, направленные на сбор информации о химическом состоянии водоема, в том числе и в наиболее глубоких, придонных толщах моря. Одним из мест постоянной гипоксии и аноксии являются Готландская и Ландсортская впадины, которые являются наиболее глубокими точками Балтийского моря, из-за чего попадания туда кислорода обуславливаются в основном лишь затоками североморских вод.

Для последующего анализа особенностей гидрохимических условий был выбран ряд станций, окружающих остров Готланд и затрагивающих Готландскую и Ландсортскую впадины. На данных станциях были получены данные о концентрациях растворенного кислорода (O_2), фосфора фосфатного (PO_4-P), нитритов и нитратов (NO_2+NO_3-N) в июле и августе с 1990 по 2020 год в придонных слоях. Месяцы были выбраны так, чтобы вести наблюдение в период активного размножения фитопланктона, так как именно при их отмирании в придонных слоях происходит активное потребление кислорода.

Также брались данные о содержании гидрохимических параметров, а именно о растворенном кислороде (O_2), фосфоре фосфатном (PO_4-P), нитритах и нитратах, аммонии (NH_4-N), в толще воды. Профили будут рассматриваться ближе к середине срока наблюдения.

Данные были взяты из баз данных Svenskt HavsARKivs (Shark), Института исследования Балтийского моря имени Лейбница, а также объединенной базы данных системы Nest. Содержание растворенного кислорода чаще всего определялось методом Винклера (йодометрическое титрование), однако, иногда, ради наполненности рядов данных, были взяты

результаты, подсчитанные датчиком O_2 , установленном на CTD-зонде [18, 19, 20].

На рисунке 10 представлена карта исследуемых станций в центральной части Балтийского моря.

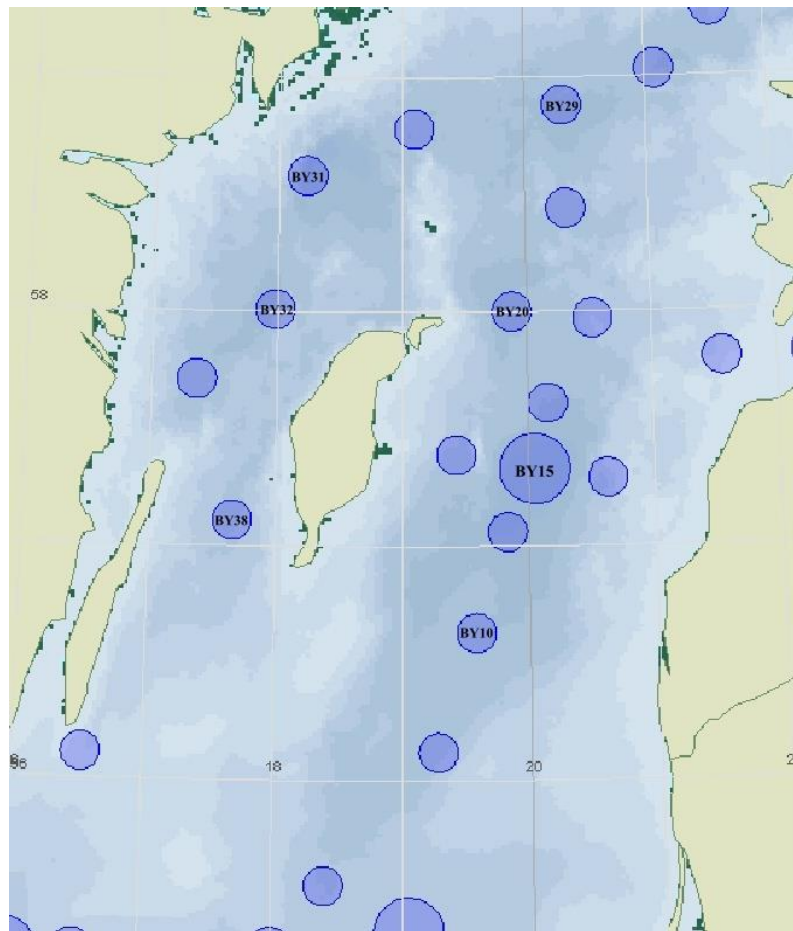


Рисунок 10. Карта расположения станций из базы данных Nest (Станции, на которых рассматривались гидрохимические параметры, подписаны).

Данные об индексе NAO за период с 1990 по 2020 годы были взяты с открытого сайта National Centers for Environmental Information (NOAA) и были осреднены для зимнего периода (Декабрь-Март) [21].

2.2. Гидрохимические условия придонных вод Ландсортской впадины

Станция BY31. Станция располагается в Ландсортской впадине, где зарегистрированная максимальная глубина во всем Балтийском море – 471

метр. Самый глубоководный горизонт, на котором снимаются достаточно часто данные – 440 метров.

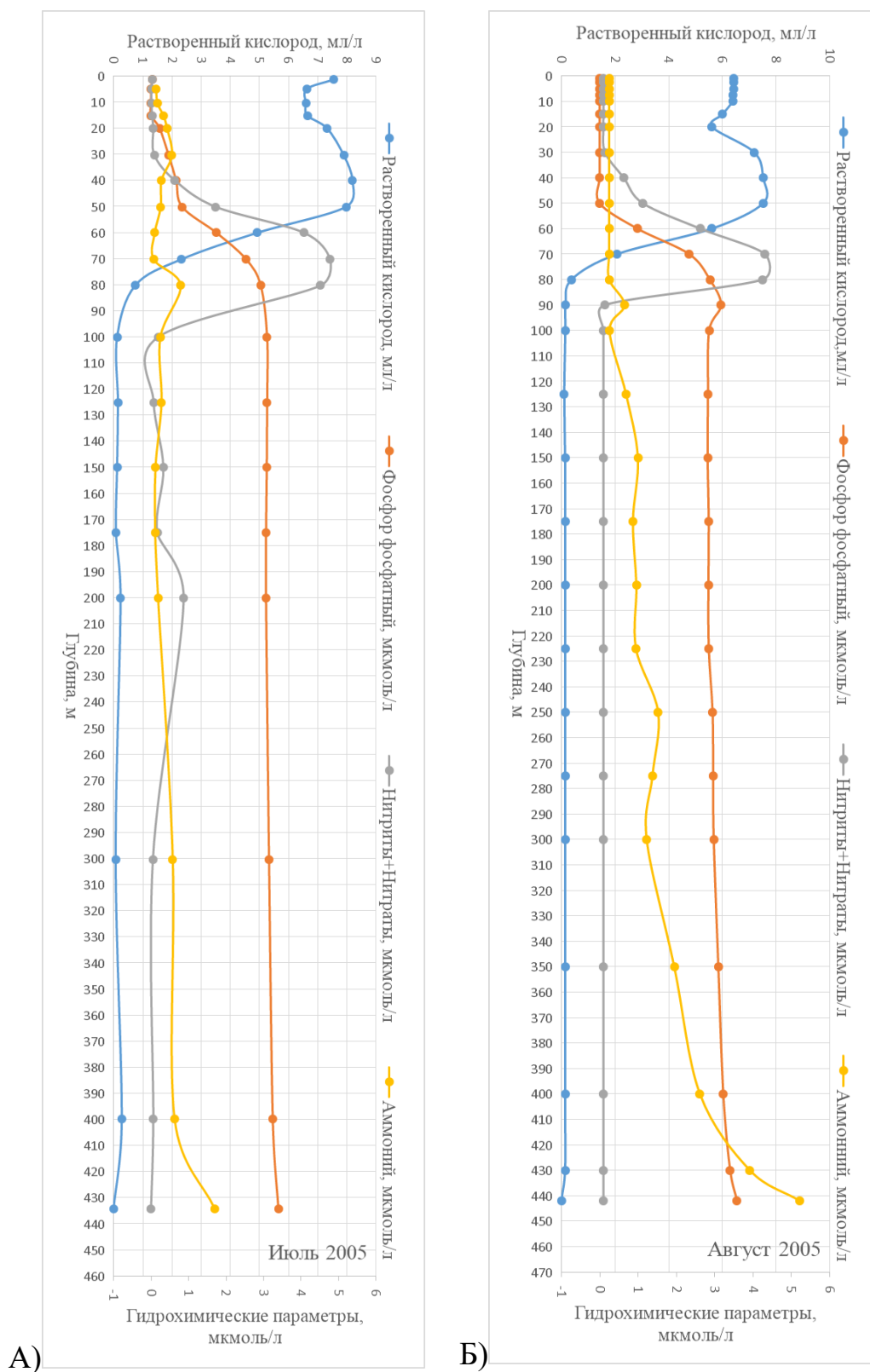


Рисунок 11. Профили хода гидрохимических параметров на станции ВУ31 в а) июле 2005 г. б) августе 2005 г.

При рассмотрении профилей (рис. 11) мы видим, что в июле 2005 года в толще воды наблюдается оксиклин. В верхних слоях, до глубины около 20 метров, концентрация растворённого кислорода (O_2) была высокой — около 6–8 мл/л, что создаёт благоприятные условия для жизнедеятельности организмов, в том числе и для начинающегося активного роста фитопланктона. С 20 метров происходит возрастание концентрации растворенного кислорода в водной толще, что может быть связано с фотосинтезом фитопланктона. Максимальное количество растворенного кислорода наблюдается на 40 м и составляет 8,2 мл/л. Далее, с 50 метров наблюдается резкий оксиклин, который продолжался до 80 метров и выражался в падении концентрации кислорода с 7,98 мл/л до 0,74 мл/л. То есть, с 75 метров уже стала наблюдаться гипоксия, где концентрация не превышала 2 мл/л. Примечательно, что на глубинах 200 и 400 метров в 2005 году наблюдалось небольшое повышение концентрации. В августе ситуация остается схожей с небольшим смещением по горизонтам вглубь. Также замечен незначительный оксиклин с 10 до 20 метров.

Распределение биогенных элементов тесно связано с кислородным режимом. Концентрация нитритов и нитратов (NO_2+NO_3-N) в июле не превышает 1 мкмоль/л до 40 метров, что связано с активным поглощением их фитопланктоном при росте, однако после происходит достаточно резкий рост до концентраций, который достигает максимума на глубине 70 метров – 4.78 мкмоль/л. Далее происходит такое же резкое снижение концентраций и с глубины 100 метров значения не выходят за 1 мкмоль/л. В августе ситуация остается схожей, однако «скачок» концентраций наблюдается теперь в слое от 50 до 90 метров. Максимальное значение сохраняется на горизонте 70 метров и составляет 4.32 мкмоль/л. Заметно, что концентрация нитрит+нитратов на глубинах со 150 метров начинает вести себя схоже с концентрациями растворенного кислорода – возрастать вместе с ним и уменьшаться.

Концентрация фосфат-фосфора (PO_4-P) в июле была незначительной на поверхности моря и практически минимальной до 20 м, однако после

начинается постепенное возрастание до 0,83 мкмоль/л на горизонте 50 метров, а следом достаточно сильный «скачок» до 2,93 на горизонте 80 метров. Далее продолжалось плавное возрастание концентрации до максимума, который был зарегистрирован на последнем горизонте, где проводились измерения - 434 м., и составлял 3.4 мкмоль/л. В августе особых изменений в ситуации не произошло, однако немного выросла концентрация в придонном слое – до 3.6 мкмоль/л.

Аммоний ($\text{NH}_4\text{-N}$) ведет себя схожим образом, его концентрация не велика в верхних слоях толщи воды, однако заметно возрастает ко дну. И в июле, и в августе, заметны небольшие скачки концентрации до глубины 100 метров, однако они не превышают 1 мкмоль/л. Однако после данного горизонта начинается заметное возрастание, которое достигает максимума в придонном слое, в июле – 1,7 мкмоль/л, а в августе 5,2 мкмоль/л. Такой рост связан с деятельностью бактерий-денитрификаторов, которые восстанавливают нитраты через нитриты до молекулярного аммония в анаэробной среде.

Таким образом мы видим, что в Ландсортской впадине существует верхний слой воды, богатый кислородом, после которого начинается гипоксическая зона, где растут концентрации аммония и фосфора фосфатного.

Интересным представляется рассмотрение хода гидрохимических показателей за многолетний период. Поскольку гипоксические явления наблюдаются в придонном слое, рассмотрим временной ход гидрохимических характеристик на глубине 440 метров. Так, на рисунке 15 представлены концентрации растворенного кислорода (O_2), фосфора фосфатного ($\text{PO}_4\text{-P}$), нитритов и нитратов за период с 1994 по 2019 год в придонных слоях, где практически не происходит обновления вод и где характерна гипоксия.

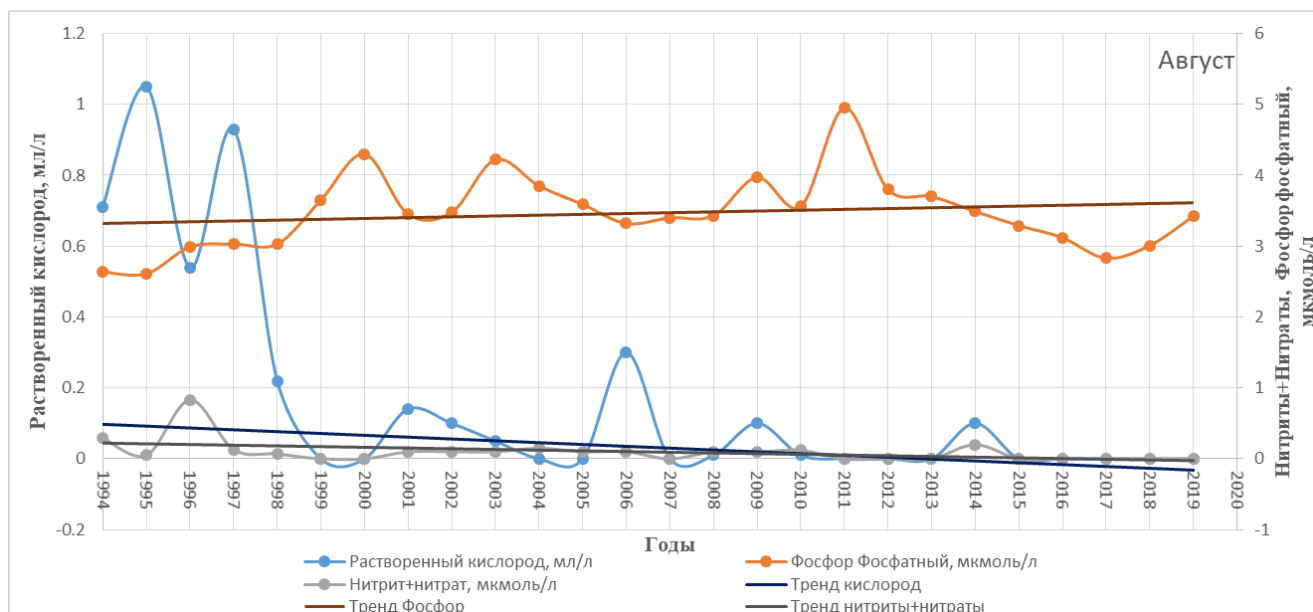


Рисунок 12. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик в Ландсортской впадине с 1990 по 2020 год в августе на глубине 440 метров.

При рассмотрении временного хода растворенного кислорода (O_2) и биогенных элементов на горизонте 440 метров видно, что в весь исследуемый период концентрация кислорода не превышала 2 мл/л. С 1994 по 1997 наблюдаются гипоксийные условия, а после уже переход к аноксии, так как концентрации растворенного кислорода практически равны 0. Наиболее высокая концентрация растворенного кислорода наблюдается в 1995 году и достигает 1 мл/л. К 2000-му году происходит снижение концентраций до 0 мл/л. И далее устанавливается достаточно заметный период минимальных концентраций. С 2001 по 2004 год наблюдается вновь небольшой рост концентраций – до 0,14 мл/л. Также «скачок» концентраций растворенного кислорода наблюдаются в 2005-2006 году, с максимумом в августе 2006 года – 0.3 мл/л. Небольшое повышение наблюдается в 2009 и 2014 годах. В остальное время концентрации очень близки к нулевым значениям. Линейный тренд указывает на устойчивое снижение концентраций растворенного кислорода.

Нитриты и нитраты (NO_2+NO_3-N) имеют не высокие концентрации на протяжении всего срока наблюдений – максимум наблюдается в 1993 году и

составляет 0.83 мкмоль/л. В динамике изменчивости нитритов и нитратов линейный тренд практически отсутствует. Амплитуда изменчивости концентрации очень маленькая. Примечательным является тот факт, что концентрации нитритов и нитратов отличны от 0 в годы, когда на горизонте наблюдались также отличные от 0 концентрации растворенного кислорода. Наиболее ярко это наблюдается в 2004 году.

Концентрации фосфора ($\text{PO}_4\text{-P}$) имеют заметную тенденцию к росту, что подтверждает линейный тренд. В начале периода наблюдений, с 1990 по 1992 имеется еще некоторое снижение концентраций, однако с 1999 наблюдается заметный «скачок» концентрации, пик которого приходится на 2011 год – 4,95 мкмоль/л. После этого наблюдается небольшое снижение концентраций до 2017 года – 2,83 мкмоль/л. Далее начинается вновь возрастание. Тенденция изменчивости фосфора противоположна тенденциям изменчивости кислорода. При отсутствии кислорода в придонном слое наблюдается выход фосфатов из донных отложений в придонную воду.

Подводя итог, наблюдаются схожие тенденции в изменчивости растворенного кислорода с нитритами и нитратами, и обратная связь с фосфором фосфатный. Растворенный кислород при этом имеет общий тренд к понижению в рассмотренном периоде, в то время как концентрации фосфора достаточно устойчиво возрастают.

2.3. Гидрохимические условия придонных вод на станциях восточнее о. Готланд.

Для лучшего понимания развития гидрохимических условий Ландсортской впадины интересным в рассмотрении являются и гидрохимические условия придонных вод на станциях, которые расположены восточнее острова Готланд. При возникновении затоков североморских вод, кислородосодержание водные массы должны также проходить и через эти станции, которые будут рассматриваться далее.

Станция ВУ38. Расположена между южной частью острова Готланд и северной частью острова Эланд. Максимальная глубина – 115 метров. Основной горизонт наблюдений – 105 метров.

Станция ВУ32. Расположена между северной частью острова Готланд и материком. Максимальная глубина – 200 метров. Основной горизонт наблюдений, на котором достаточно часто снимались измерения – 175 метров.

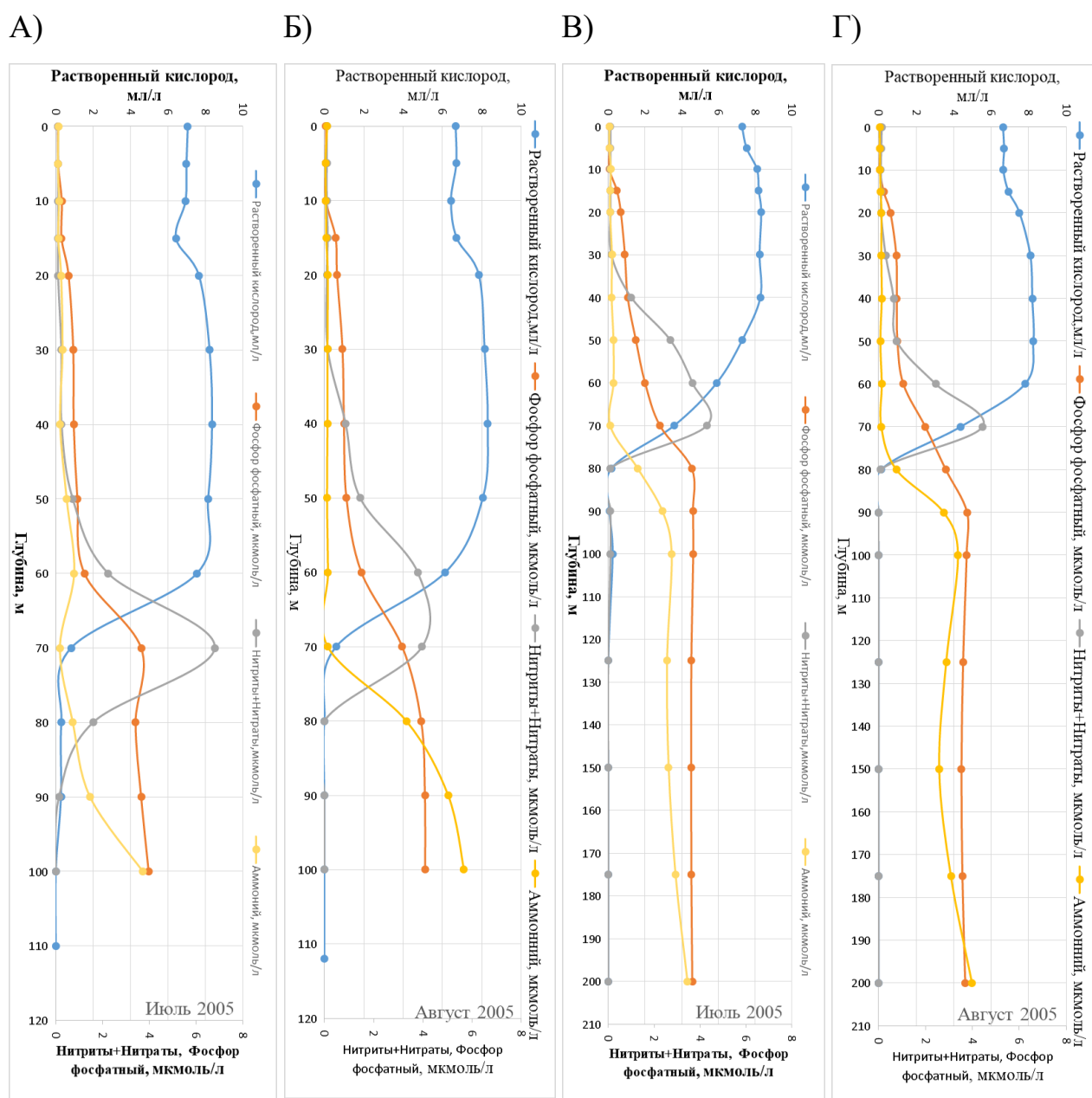


Рисунок 13. Профили хода гидрохимических параметров на станциях:
а) ВУ38 в июле 2005 г., б) ВУ38 в августе 2005 г., в) ВУ32 в июле 2005 г., г) ВУ32 в августе 2005 г.

На рисунке 13 представлены профили хода гидрохимических параметров на станциях ВУ 32 и ВУ38. Видно, что общий ход параметров аналогичен тому, что происходит в Ландсортской впадине, станции ВУ31, со смещением некоторых моментов. Например, оксиклин на станции ВУ38 начинается с глубины 60 метров, а гипоксийные явления, когда концентрации растворенного кислорода (O_2) не превышают 2 мл/л, начинают наблюдаться с глубины 70 метров.

Пики концентраций нитритов и нитратов (NO_2+NO_3-N) не смещаются и сохраняются на глубине 70 метров. Наибольшее возрастание наблюдается в июле 2005 года на станции ВУ38, когда концентрация нитритов и нитратов составляет 6,81 мкмоль/л.

Концентрации фосфора фосфатного (PO_4-P) и аммония (NH_4-N) не имеют существенных отличий в ходе с глубиной на станции ВУ32.

В случае со станцией ВУ38 произошло небольшое смещение и резкий «скачок» концентраций фосфора фосфатного наблюдался в слое с 60 до 70 метров. Концентрация аммония в слое до 70 метров достаточно низкая, после чего начинает значительно увеличиваться до глубин 100 метров.

Общий ход параметров и их взаимосвязь схожи с происходящим в Ландсортской впадине. При этом можно отследить, что незначительные повышения концентраций растворенного кислорода, которые наблюдаются в июле на глубине 80 метров на станции ВУ38 и на глубине 100 метров на станции ВУ32, не являются долгосрочными и уже в следующем месяце не отмечаются.

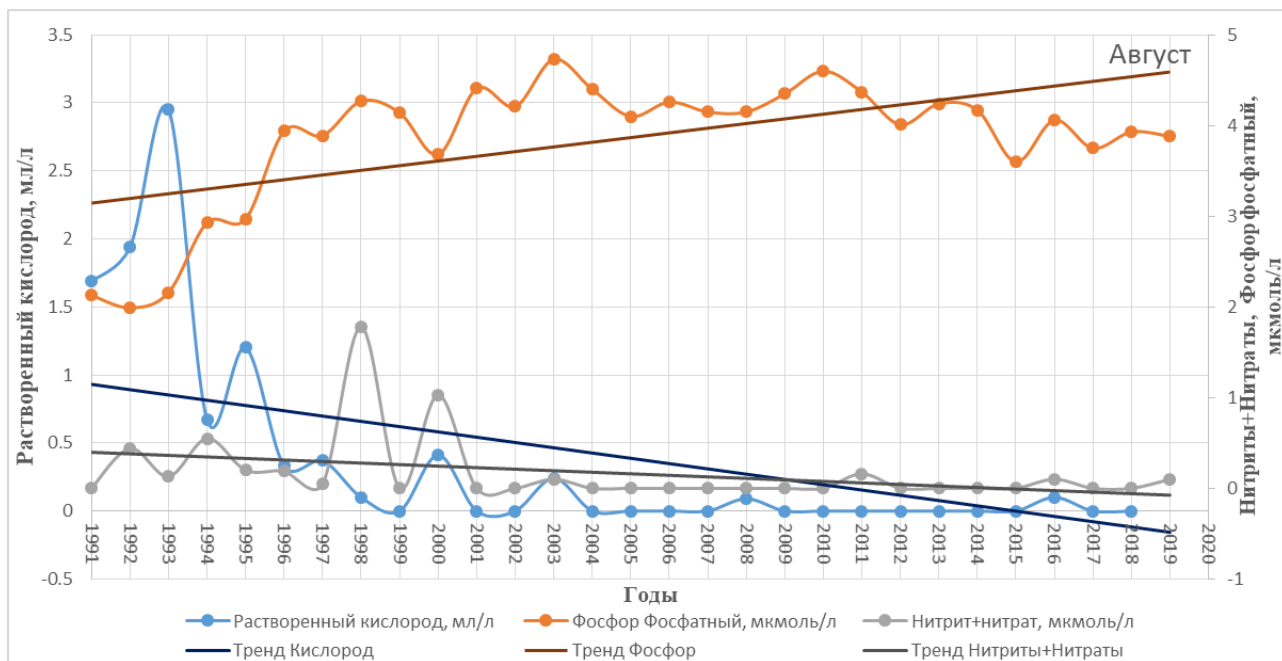


Рисунок 14. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станции ВУ38 с 1991 по 2019 год в августе на глубине 105 метров.

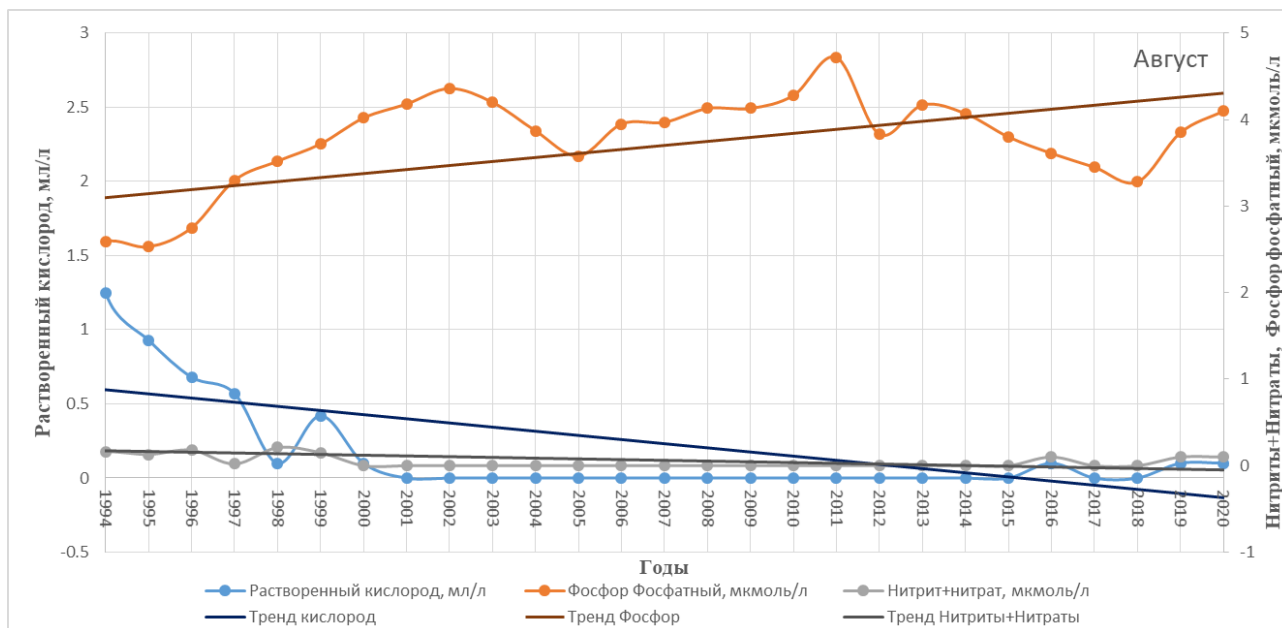


Рисунок 15. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станции ВУ32 с 1994 по 2020 год в августе на глубине 175 метров.

На основании рисунков 14 и 15 видно, что на глубине 105 м в течении большей части периода наблюдений сохраняются анаэробные условия. В начале срока концентрации растворенного кислорода (O_2) приближены к

необходимому для жизнедеятельности организмов минимуму, но уже с 1994 на глубине появляются устойчивые гипоксические условия. Незначительные повышения концентрации кислорода наблюдаются в 2000, 2003, 2008 и 2006 годах. На станции ВУ32 же, на глубине 175 метров, в августе наблюдается похожая ситуация, однако временных возрастных концентраций кислорода наблюдается меньше. Они наблюдаются в 1999 году, 2016 году и 2019 году.

Тренды показывают общую тенденцию к уменьшению концентраций растворенного кислорода.

Концентрации нитритов и нитратов (NO_2+NO_3-N) сохраняют прямую связь с концентрациями кислорода. «Скачки» концентраций наблюдаются одновременно с аналогичными у растворенного кислорода. На станции ВУ32 ситуация схожая. Тренды показывают тенденцию к уменьшению концентраций нитритов и нитратов.

Концентрации фосфора фосфатного (PO_4-P) сохраняют обратную связь с концентрациями кислорода, в большинстве случаев, уменьшаясь, при возрастании концентраций кислорода. На станции ВУ32 ситуация аналогичная. Тренды показывают общую тенденцию к увеличению концентраций фосфатного фосфора.

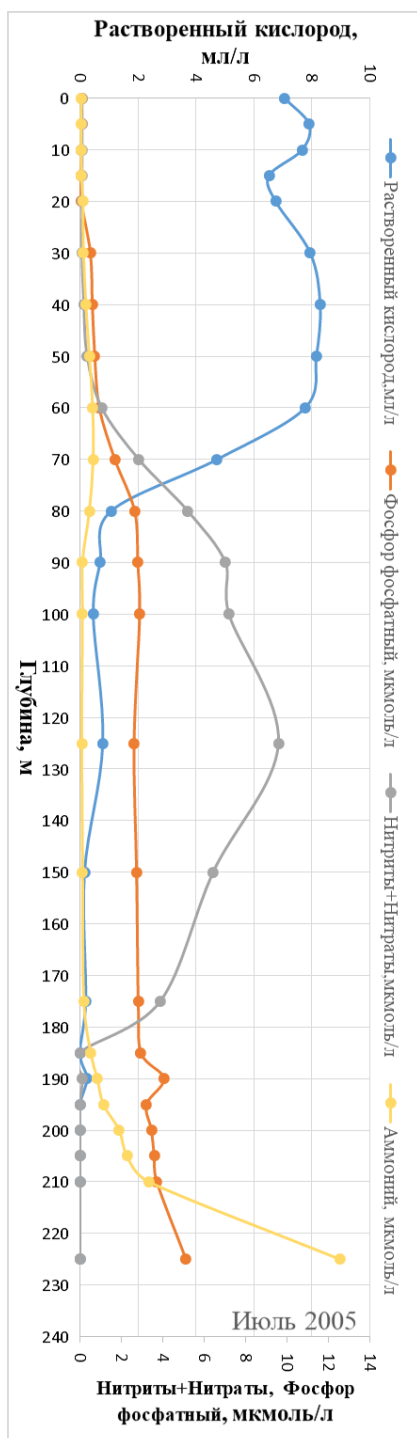
Общие тенденции хода гидрохимических параметров на станциях ВУ32 и ВУ38 схожи с происходящим в Ландсорсткой впадине, однако, наблюдаются некоторые отличия. Не наблюдалось повышения концентраций кислорода на станциях ВУ32 и ВУ38, которые бы предшествовали схожим повышениям в Ландсорсткой впадине в 2016 году. Взаимосвязь хода концентраций растворенного кислорода по цепи ВУ38-ВУ32-ВУ31 ощущается слабо.

2.4. Гидрохимические условия придонных вод Готландской впадины.

Станция ВУ15. Станция располагается в Готландской котловине, которая характеризуется сложной морфологией дна, со склонами, что разделяют впадину на несколько более мелких котловин. Глубина впадины

варьируется, но её максимальная глубина достигает 249 метров. Самый глубоководный горизонт, на котором снимаются достаточно часто данные – 240 метров.

А)



Б)

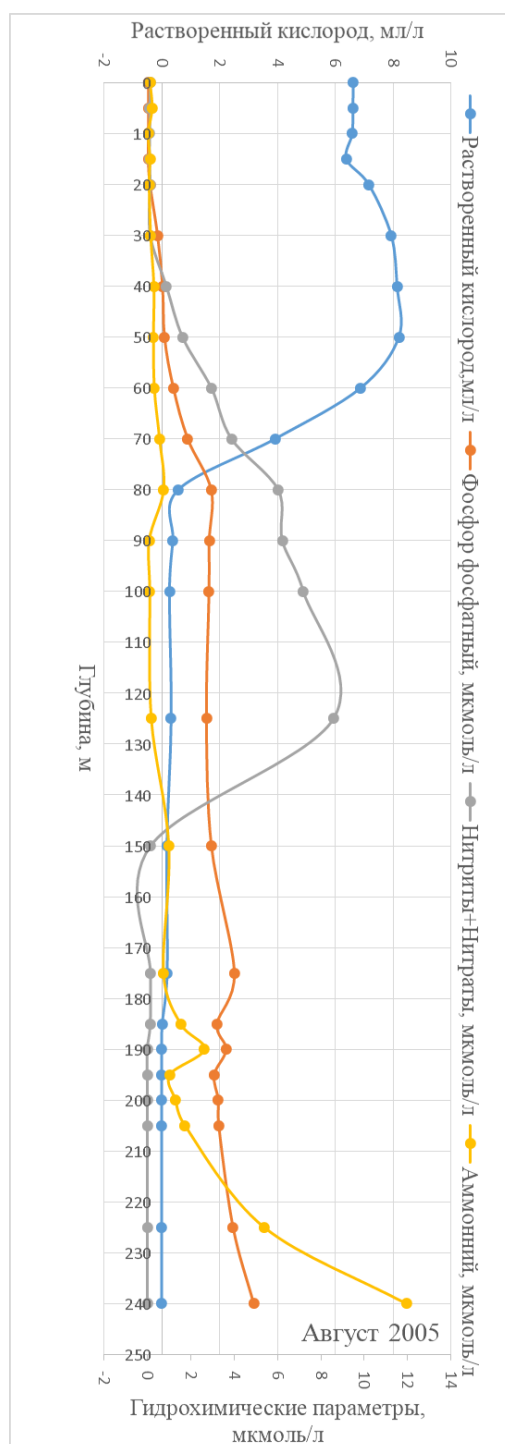


Рисунок 16. Профили хода гидрохимических параметров на станции ВУ15 в а) июле 2005 г. б) августе 2005 г.

При рассмотрении профилей в Готландской впадине (рис. 16) мы видим, что общий ход параметров примерно сопоставим с происходящим в Ландсортской впадине.

На поверхности концентрации растворенного кислорода (O_2) составляют около 7 мл/л. С глубины 20 метров начинается рост концентраций. В июле пик концентрации находится на горизонте 40 метров и составляет 8,3 мл/л, в августе пик сместился чуть глубже – на 50 горизонт со значением 8,2 мл/л. С 60 до 80 метров наблюдается оксиклин, который обозначает начало гипоксической зоны, где концентрации растворенного кислорода приближены к 0. В 2005 году наблюдаются некоторые повышения концентраций на горизонтах 125 и 190 метров, до 0,79 мл/л и 0,24 мл/л, однако уже в августе значения снова приближаются к 0.

Нитриты и нитраты (NO_2+NO_3-N) сильно отличаются в расположении пика – он сместился значительно глубже, до 125 метров, что связано с особенностями морфометрии и гидрохимической стратификации. В июле наибольшая концентрация составляет 9,6 мкмоль/л, а в августе – 8,59 мкмоль/л. В июле концентрации, отличные от 0, наблюдались до глубины 175 метров. На глубине 190 метров также заметно повышение концентрации одновременно с растворенным кислородом.

Концентрации фосфора фосфатного (PO_4-P) и аммония (NH_4-N) имеют лишь численные отличия в концентрациях, основной характер хода с глубиной сохраняется. В 2005 году в июле наблюдается небольшое повышение фосфора фосфатного на горизонте 190 метров – 4 мкмоль/л, в августе этот пик уменьшается, но все же присутствует. Также появляется небольшое пиковое значение аммоний – 2,6 мкмоль/л.

При рассмотрении профилей (рис. 16) мы убедились, что в Готландской впадине гипоксические явления проявляются в придонном слое. Рассмотрим временную динамику гидрохимических параметров на глубине 240 метров.

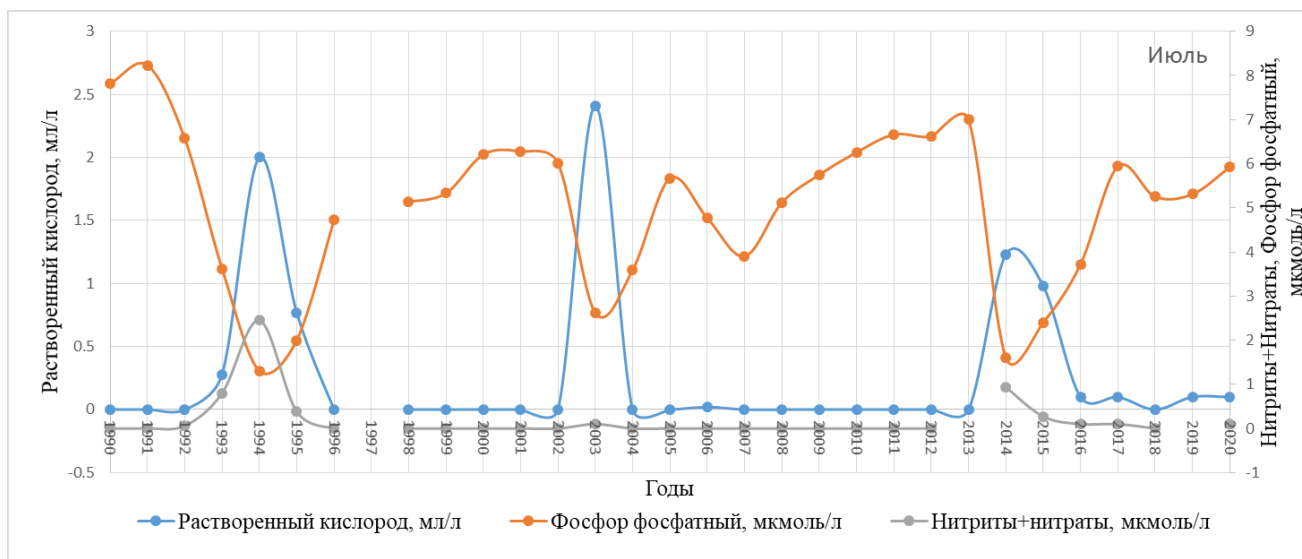


Рисунок 17. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик в Готландской впадине с 1990 по 2020 год в июле на глубине 240 метров.

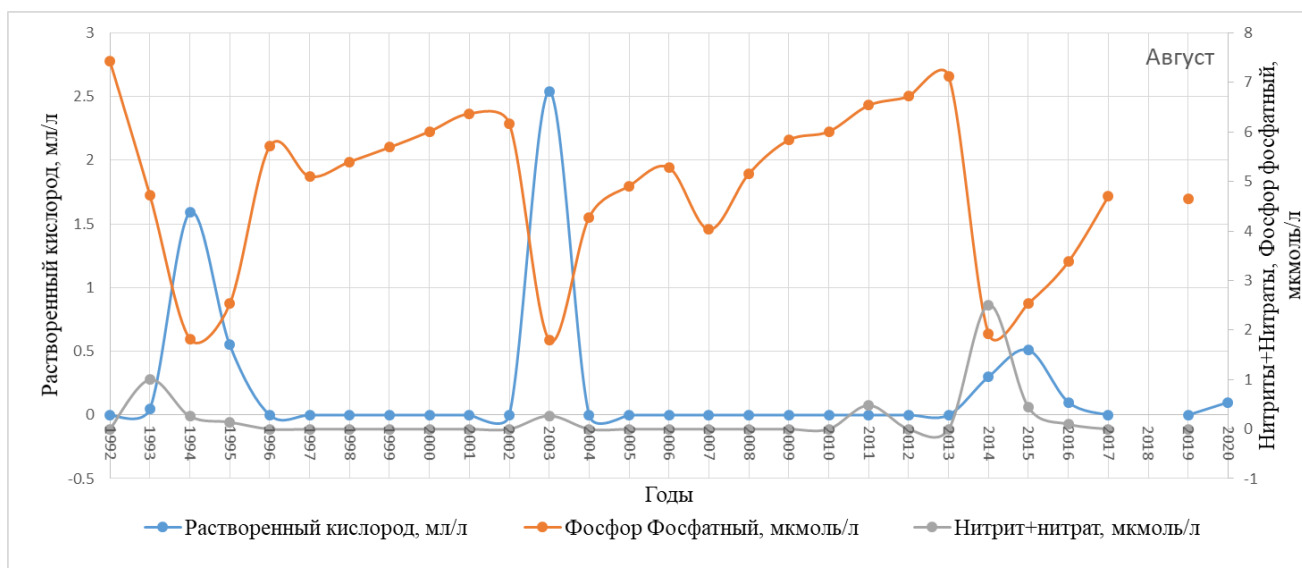


Рисунок 18. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик в Готландской впадине с 1990 по 2020 год в августе на глубине 240 метров.

На рисунках 17 и 18 представлены данные по концентрациям растворённого кислорода (O_2), фосфатного фосфора (PO_4-P), нитритов и нитратов (NO_2+NO_3-N) в придонных слоях за период с 1990 по 2020 год — зонах с минимальным обновлением воды и характерной гипоксией.

Растворённый кислород в течение периода наблюдений практически всегда имеет значения, близкие к 0 мл/л. Исключением являются лишь некоторые годы, когда в результате притока вод с более высоким содержанием кислорода происходит временная аэрация глубинных слоёв толщи воды. Так, в июле 1994 до 2 мл/л, в 2003 до 2,43 мл/л и в 2014 году до 1,23 мл/л фиксируются кратковременные подъёмы концентраций растворённого кислорода. Это связано с прохождением залива североморских вод в Балтийское море, что приводит к аэрации придонных слоев, однако эффект оксигенации не является продолжительным (уже на следующий год в придонных слоях вновь наблюдается гипоксия, связанная с накоплением органического вещества и потреблением этой органикой кислорода). Это хорошо прослеживается в 1994 и 2014 годах, когда уже в августе происходит уменьшение концентраций растворенного кислорода. В 1994 с 2 мл/л до 1,5 мл/л, а в 2014 году с 1,23 мл/л до 0,51 мл/л. В 2003 году же в августе концентрация вновь возросла, достигнув значения 2,54 мл/л. Это может быть связано с большей продолжительностью залива богатых кислородом вод.

Концентрации нитритов и нитратов приближены к нулевым значениям на протяжении всего периода наблюдений. Существенное изменение наблюдаются лишь в августе 1993, июле 1994, 2003 году и в 2014 году, когда их содержание резко возрастает, одновременно с появлением в это время концентраций растворенного кислорода, отличных от нуля.

В начале периода наблюдений концентрации фосфатов ($\text{PO}_4\text{-P}$) имеют самое высокое значение. В августе 1990 значение концентрации составляет 7,43 мкмоль/л, а в июле 1991 года отмечается значение 8,23 мкмоль/л. После концентрации фосфорного фосфата ведут себя скачкообразно. Серьезные снижения концентраций наблюдаются одновременно с ростом концентраций кислорода – в 1994 году, 2003 и 2014 году. Также небольшое снижение наблюдается в 2007 году. Концентрации фосфорного фосфата имеют общие тенденции к снижению и в июле, и в августе, что отличается от ситуации в

Ландсортской котловине. Наиболее вероятной причиной является лучшая аэрация области наблюдения.

Анализ взаимосвязей на данной станции между параметрами подтверждает наличие прямой зависимости между уровнем кислорода и содержанием нитритов с нитратами, а также обратной зависимости между кислородом и фосфатами. В периоды поступления кислородсодержащих вод наблюдается рост концентраций нитратов и кратковременное снижение фосфатов. Это согласуется с механизмами биогеохимических процессов: при наличии кислорода фосфаты связываются в донных осадках, а восстановленные формы азота (аммоний) подвергаются окислению до нитрата. Напротив, при отсутствии кислорода фосфаты высвобождаются, а нитраты восстанавливаются, что ведёт к их исчезновению из водной толщи.

Таким образом, гидрохимическая динамика в Готландской впадине на глубине 240 м указывает на стабильное присутствие гипоксических условий, периодически нарушаемых редкими притоками кислородсодержащих вод, поступающих при затопке североморских вод через датские проливы в Балтийское море. В отличие от Ландсортской впадины, Готландская расположена в более открытой и доступной для течения из проливов области, а так что поступление туда затоковых вод оказывает большее влияние, что выражается в повышении концентраций растворенного кислорода.

2.5. Гидрохимические условия придонных вод на станциях западнее о. Готланд.

Станция ВУ10. Расположена в южной части Готландской котловины. Максимальная глубина – 148 метров. Основной горизонт наблюдений – 140 метров.

Станция ВУ20. Расположена примерно в 30 км на восток от острова крайней северной точки острова Фокё. Максимальная глубина – 200 метров.

Основной горизонт наблюдений, на котором достаточно часто снимались измерения – 190 метров.

Станция ВУ29. Расположена примерно в 75 км на северо-восток от острова Готска-Сандён. Максимальная глубина – 190 метров. Основной горизонт наблюдений, на котором достаточно часто снимались измерения – 175 метров. Графического представления для станции ВУ29 не приведено, однако общие тенденции схожи со станцией ВУ20.

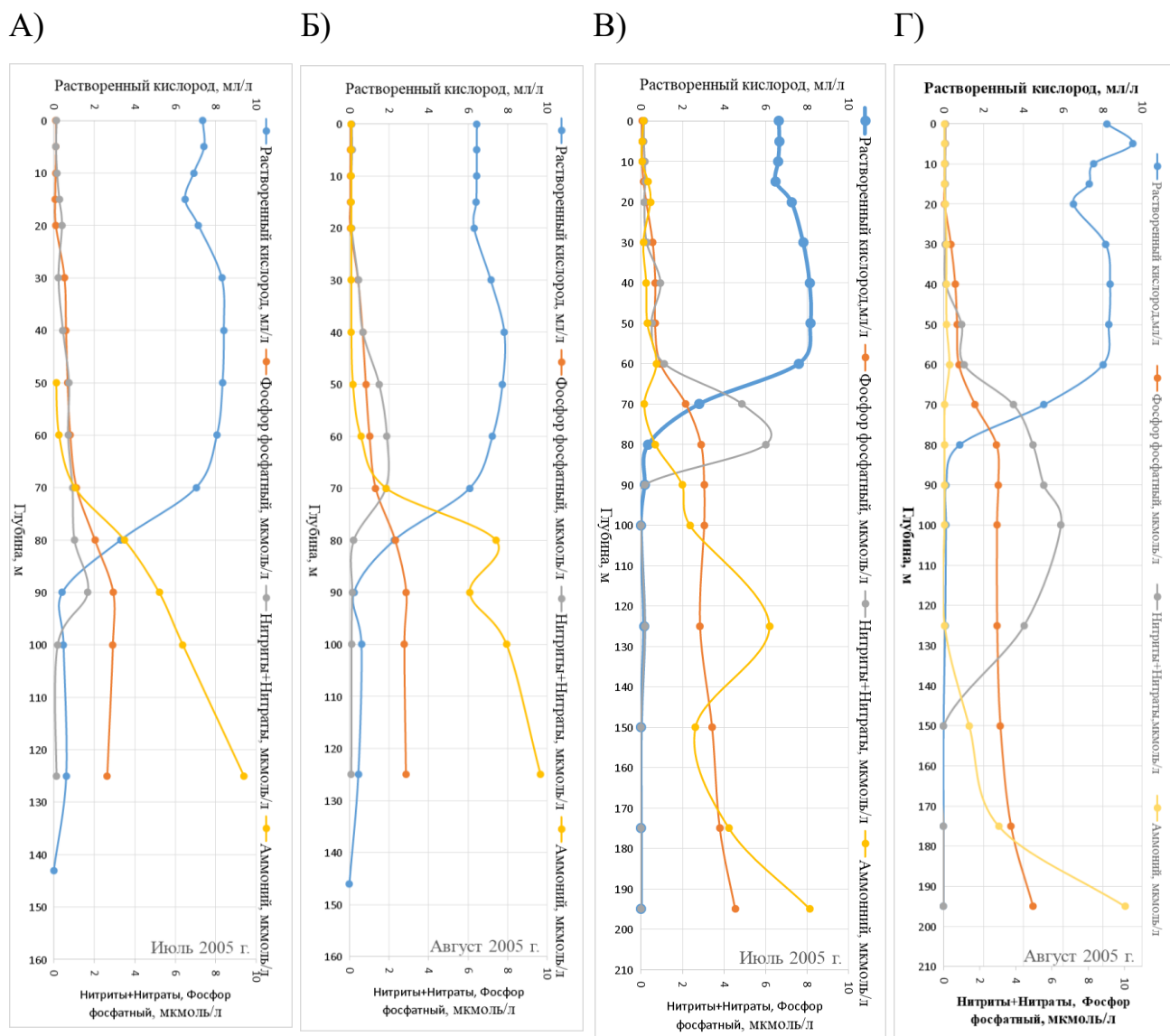


Рисунок 19. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станциях: а) ВУ10 в июле 2005 г., б) ВУ10 в августе 2005 г., в) ВУ20 в июле 2005 г., г) ВУ20 в августе 2005 г.,

В представленных на рисунке 19 графиках временного хода гидрохимических параметров на станциях ВУ10 и ВУ20 в июле и августе 2005 года прослеживается общая структура. На всех станциях верхние слои характеризуются высоким содержанием растворенного кислорода (O_2), обусловленным активным фотосинтезом фитопланктона и атмосферным обменом. В основном оксиклин наблюдается в горизонтах с 60 до 80 метров, на станции ВУ10 оксиклин смещён на горизонты 70-90 метров. В придонных слоях станций ВУ20 и ВУ29 наблюдаются гипоксийные условия, на станции ВУ10 же можно отметить, что кислород имеет отличные от нуля концентрации вплоть до глубины 125 метров.

Что касается биогенных веществ, их ход на рассматриваемых станциях в общем аналогичен станции в Готландской впадине (ВУ15). Концентрации фосфора фосфатного (PO_4-P) в придонных слоях варьировали в диапазоне примерно от 2 до 6 мкмоль/л. Нитриты и нитраты (NO_2+NO_3-N) сохраняют пик концентраций в диапазоне глубин 70-100 метров. Аммоний (NH_4-N) также ведет себя также, как и на станции ВУ15, заметно повышая концентрации ко дну. Наибольшая концентрация аммония наблюдается на станции ВУ20, где достигают 10 мкмоль/л. Наиболее низкие концентрации биогенных веществ наблюдались на станции ВУ10.

Таким образом, общий гидрохимический профиль наблюдается на всех станциях Готландской впадины, совпадая с ходом параметров на станции ВУ15. При этом на станции ВУ10 наблюдается легкий эффект насыщения придонных слоев кислородом, возможно, связанный с затоком вод, богатых кислородом.

Чтобы проследить тенденцию хода вод, насыщенных кислородом, рассмотрим также и временной ход гидрохимических параметров на этих станциях.

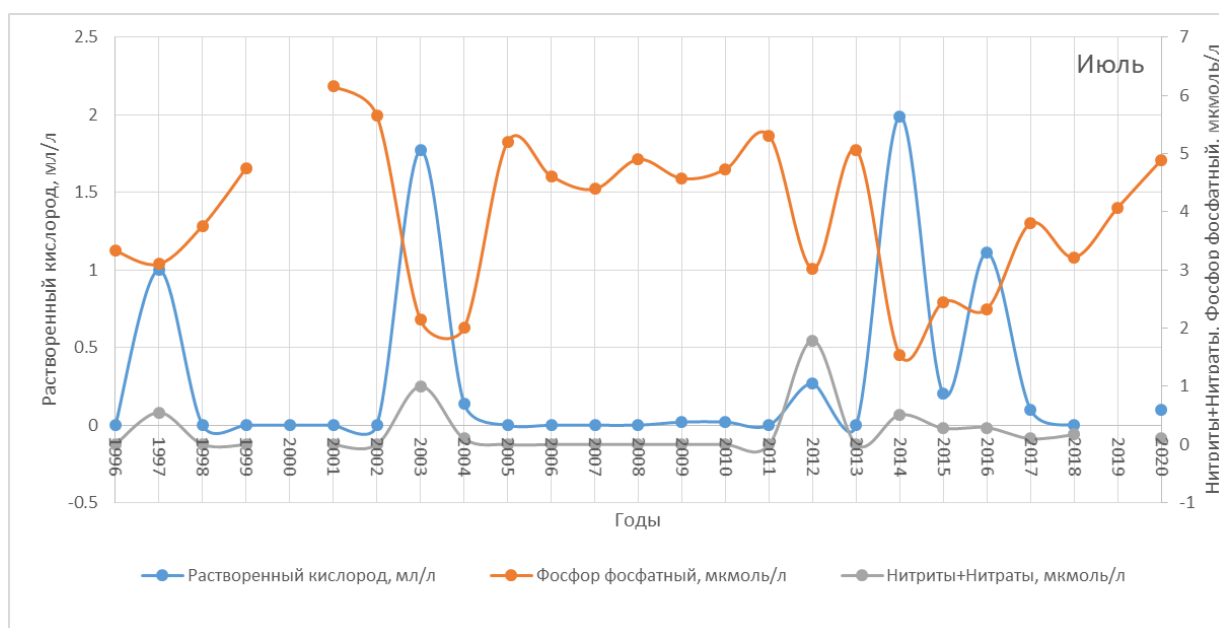


Рисунок 20. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станции ВУ10 с 1996 по 2020 год в июле на глубине 140 метров.

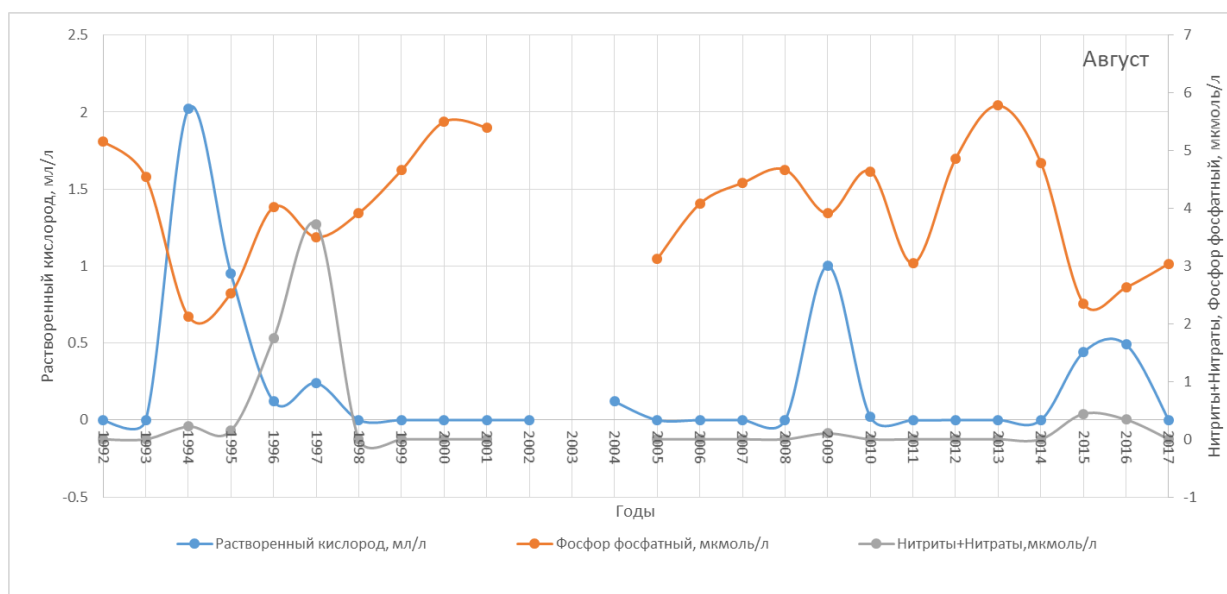


Рисунок 21. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станции ВУ10 с 1992 по 2020 год в августе на глубине 140 метров.

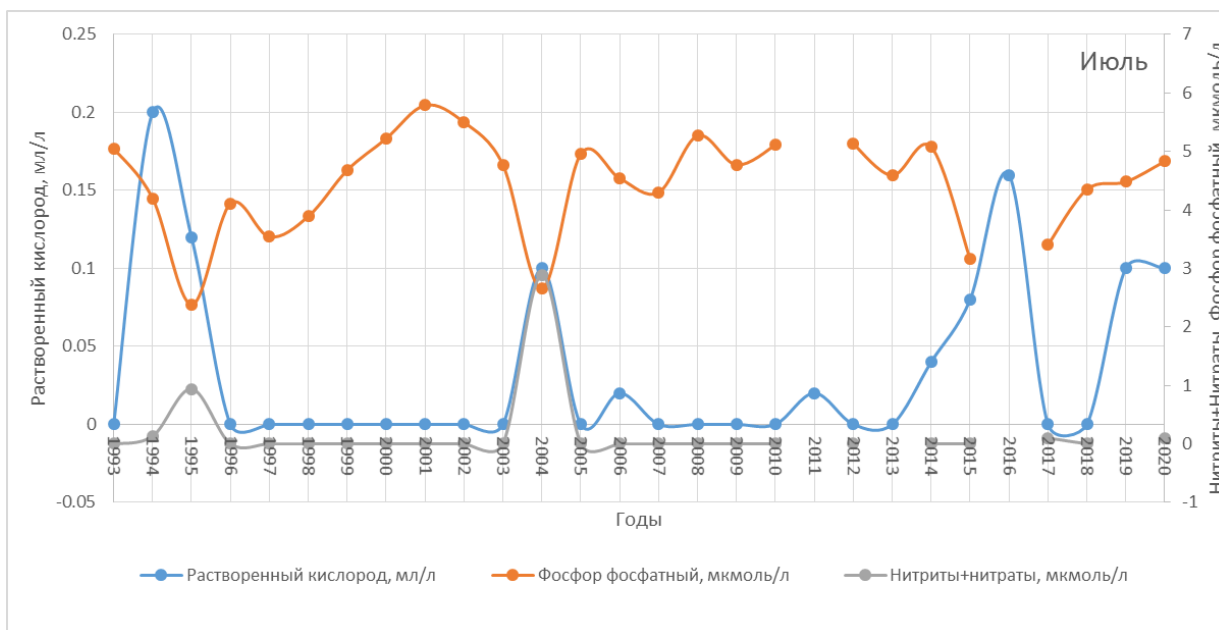


Рисунок 22. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станции ВУ20 с 1993 по 2020 год в июле на глубине 190 метров.

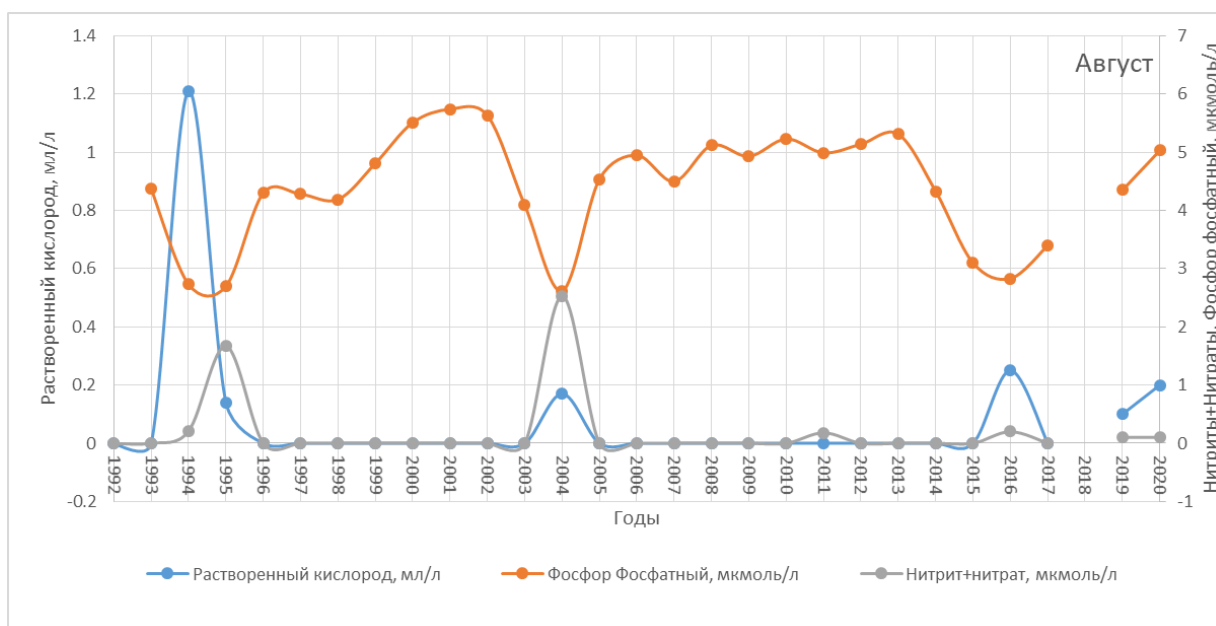


Рисунок 23. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станции ВУ20 с 1992 по 2020 год в августе на глубине 190 метров.

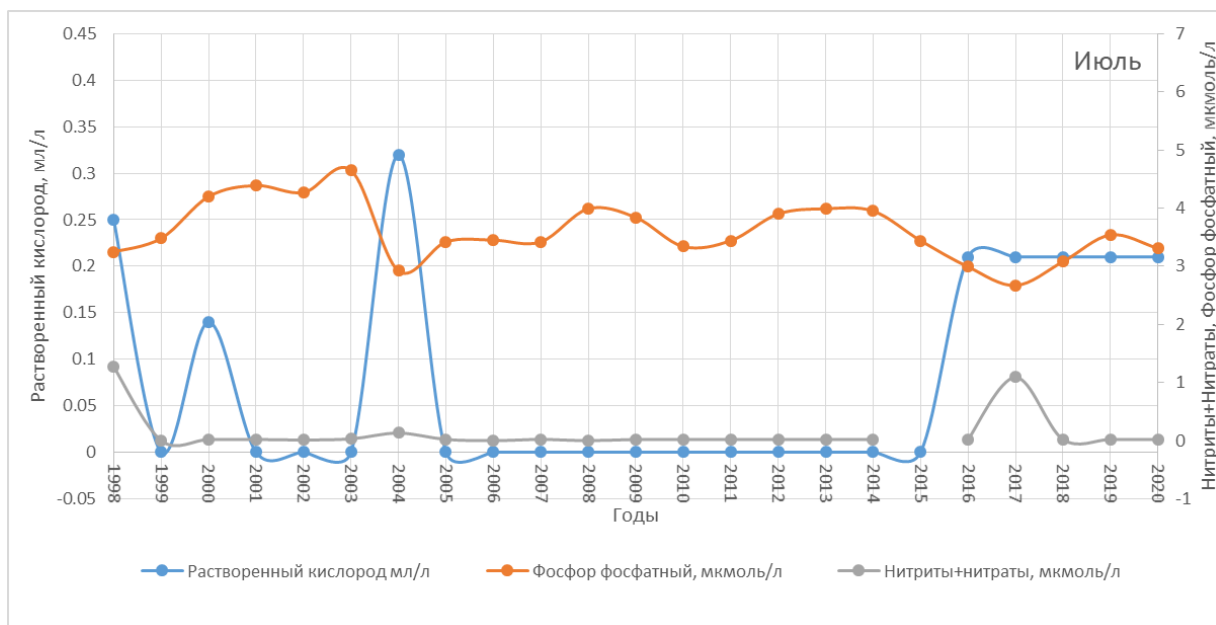


Рисунок 24. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станции ВУ29 с 1998 по 2020 год в июле на глубине 175 метров.

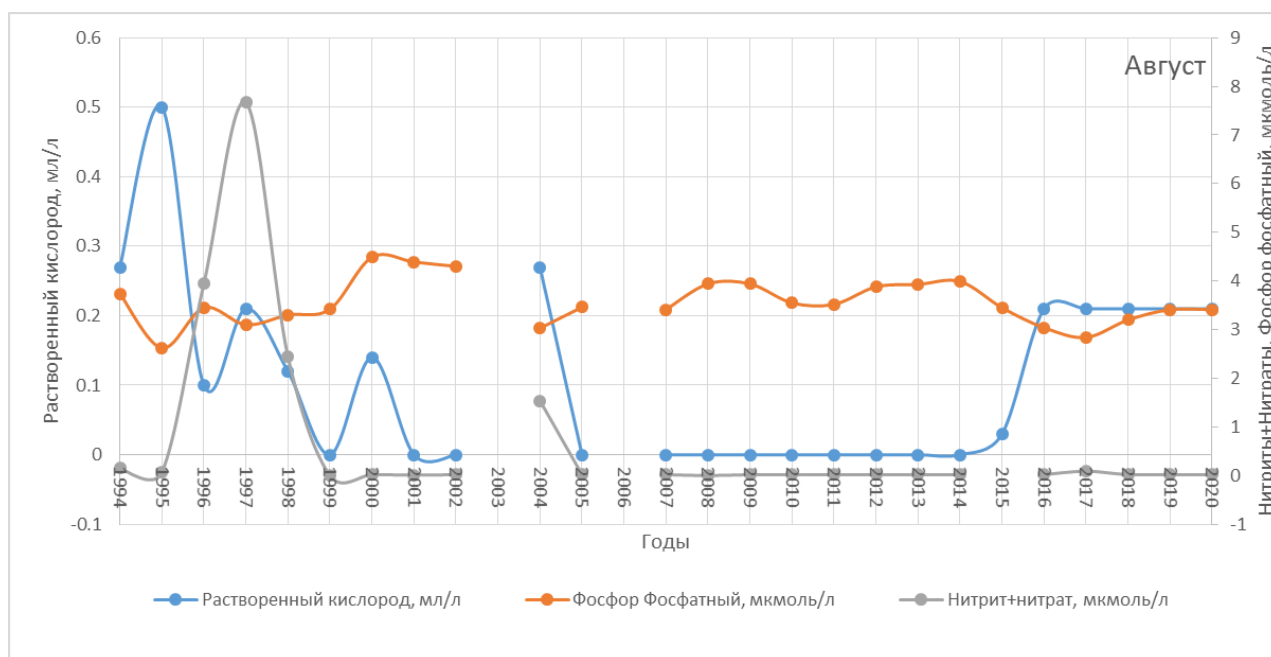


Рисунок 25. Временной ход растворенного кислорода и биогенных характеристик на станции ВУ29 с 1994 по 2020 год в августе на глубине 175 метров.

При анализе рисунков 20-25 мы наблюдаем временной ход растворенного кислорода (O_2) и биогенных веществ в придонных слоях. На всех станциях растворённый кислород в придонных слоях обычно находится на низком уровне, близком к нулю, что свидетельствует о длительной

гипоксии или аноксии. Однако в отдельные годы наблюдаются кратковременные подъёмы концентраций кислорода. Так, например, в 2003-2004 годах наблюдается повышение концентраций растворенного кислорода на всех станциях. При последовательном просмотре, можно проследить, что сначала концентрации в июле 2003 года значительно возрастают на станции ВУ10, с нуля доходя до 1,77 мл/л. Возвращаясь к прошлой подглаве, в Готландской впадине, на станции ВУ15 и в июле, и в августе, отмечались значительные возрастания концентраций до 2,5 мл/л. На следующей станции, ВУ20, рост концентраций кислорода отмечается уже в 2004 году, доходя до 0,17 мл/л в августе. На станции ВУ29 «скачок» концентрации также наблюдается в 2004 году, в июле достигая 0,32 мл/л. Получается, произошёл «волнообразный» рост концентрации, который имеет тенденцию к снижению амплитуды по мере смещения на север. Это указывает на произошедший заток североморских вод, обогащённых кислородом. И, судя по смещению на 1 год, на станциях ВУ20 и ВУ29, заток в июле-августе 2003 года дошёл до станции ВУ15, но ещё не дошёл до более северных станций, где в следующем году мы наблюдаем уже концентрации, оставшиеся после достаточно мощного затoka. В целом, этот заток принёс лишь недолгий подъём концентраций и после его «прохождения», в течении года, кислород снова приходит к 0 значениям. Похожая ситуация наблюдается также и в 2014-2015 годах, где также хорошо видно, что возросшие с затокom концентрации растворенного кислорода уже к следующему месяцу снижаются.

Концентрации биогенных веществ — фосфатов ($\text{PO}_4\text{-P}$), нитритов и нитратов ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$) — всё также демонстрируют обратную зависимость от содержания кислорода. В периоды гипоксии и аноксии концентрации фосфора фосфатного возрастают в придонных слоях, достигая значений порядка 5–6 мкмоль/л.

Нитриты и нитраты, напротив, обычно близки к нулю, однако в периоды притока кислородсодержащих вод их концентрации кратковременно

увеличиваются, что свидетельствует о восстановлении окислительных процессов в биогеохимическом цикле азота.

Пространственные различия между станциями связаны с их географическим положением и глубиной. Временные ряды показывают, что большую часть времени в придонных слоях Балтийского моря наблюдаются гипоксические и аноксические условия, однако, после мощных затопов североморских вод через Датские проливы в течение нескольких месяцев происходит аэрация придонных вод. Однако не каждый заток приводит к устойчивому улучшению — эффект зависит от объёма и характеристик затекающих вод, а также от локальных гидрометеорологических условий.

Таким образом, анализ гидрохимических параметров на различных станциях подтверждает, что аэрация придонных слоев носит временный характер, и это указывает на ключевую роль затопов североморских вод в поддержании кислородного баланса глубоководных слоёв Балтийского моря и временному восстановлению биохимических процессов (Конкретизировать). В периоды отсутствия затопов наблюдается накопление фосфатов и развитие гипоксий, что негативно влияет на экосистему региона. Эти взаимосвязи важны для оценки экологического состояния Балтики и прогнозирования изменений в условиях изменяющегося климата и антропогенного воздействия.

3. Связь крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике с кислородными условиями в Балтийском море.

3.1. Влияние индекса NAO на заливы североморских вод.

Известно, что кислородные условия в глубоководной части Балтийского моря определяются в том числе особенностями крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике. И один из индикаторов этой циркуляции выражен в виде индекса NAO [10].

Индекс NAO (North Atlantic Oscillation) представляет собой колебания давления между Азорским Антициклоном и Исландским циклоном, которые оказывают достаточно значительное влияние на климат Европы и на циркуляцию воздуха над регионом, в том числе и над Балтийским бассейном [10].

NAO может быть положительным и отрицательным. Когда он положителен Азорский антициклон усиливается, а Исландский циклон углубляется, что приводит к усилению западных ветров. Эти ветра приносят в Северную и Центральную Европу тёплую и влажную погоду. При отрицательных индексах ситуация становится противоположной: Азорский антициклон ослабевает, а Исландский циклон становится менее выраженным, что приводит к ослаблению западных ветров. В результате зимы в этих регионах становятся более холодными и сухими [10].

Так как заливы североморских вод в Балтийское море происходят преимущественно в зимний период, для оценки были взяты именно зимние значения индекса NAO, которые приведены на рисунке 26.

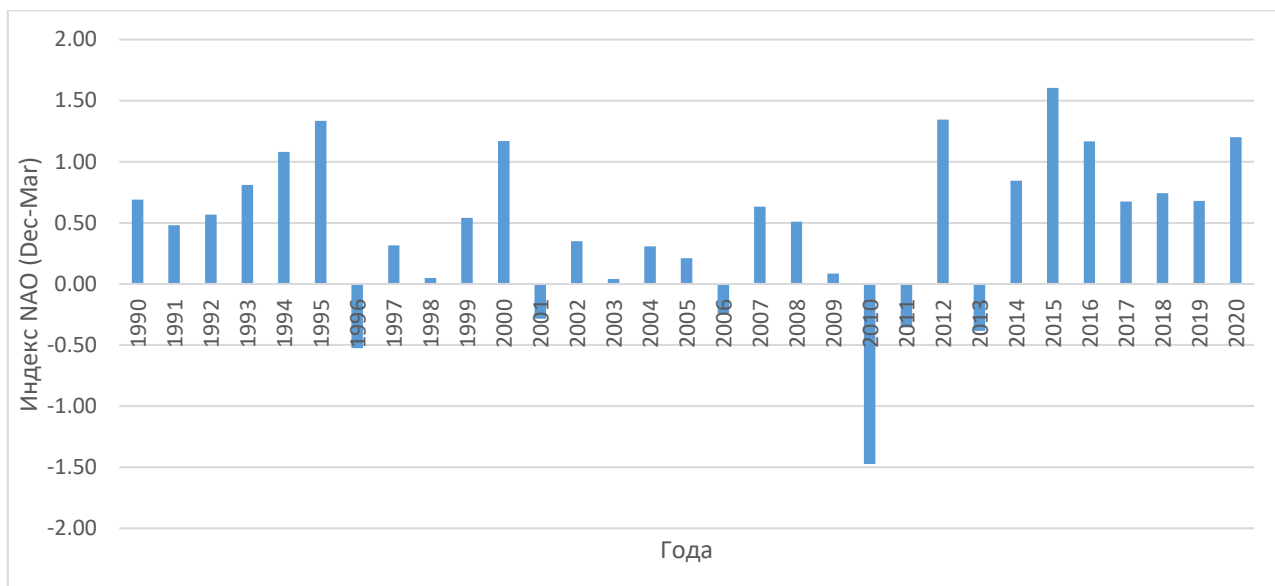


Рисунок 26. Подсчитанные индексы NAO для рассматриваемого в работе климатического периода.

Важным условием формирования заток является продолжительный период действия западных ветров, в течение которого уровень моря в Каттегате повышается, а разница в давлении заставляет соленую воду из Северного моря через узкие Датские проливы поступать в Балтийское море. Таким образом, положительный индекс NAO, который как раз является показателем усиления западных ветров, должен способствовать возникновению заток североморских вод.

Временной ряд заток североморских вод в Балтийское море представлен на рисунке 27.

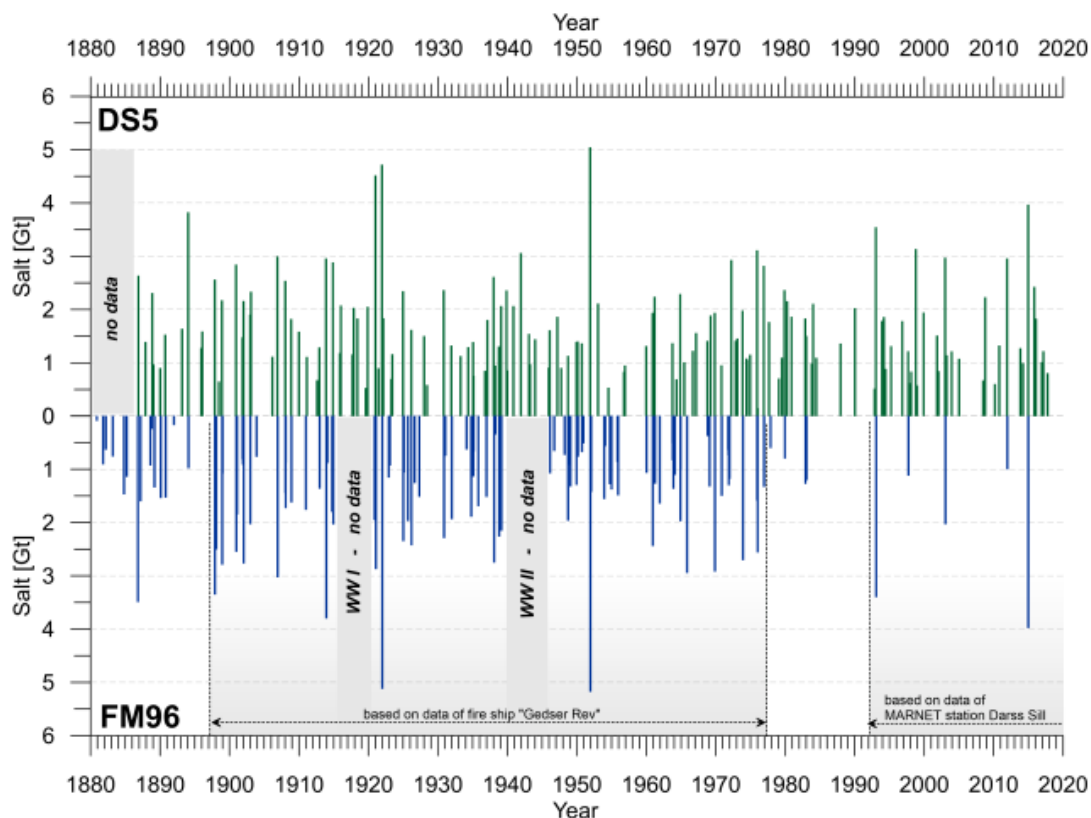


Рисунок 27. Временной ряд событий баротропного притока с 1880 по 2020 год, выраженных в гигатоннах. Зеленые столбцы – новый способ подсчета DS5, синие – старый способ FM96 Фишера и Маттеуса. [14]

Анализ представленного на рисунке 26 графика индекса NAO за период 1990-2020 годов показывает выраженную межгодовую изменчивость с несколькими периодами устойчиво положительных значений, а именно с 1990 по 1995, а после с 2014 по 2020. Наиболее значительные положительные значения наблюдались в 1995 году, достигающие показателя 1,5, в 2000 году отмечается положительный индекс 1,2, в 2015 году индекс 1,6 и 2020 году 1,2. Эти года характеризовались усилением зональной циркуляции над Северной Атлантикой, что теоретически должно было способствовать формированию благоприятных условий для притока североморских вод в Балтийское море.

При анализе рисунка 27, а именно, графика изменений баротропного притока DS5 за период 1990-2020 годов, выделяется несколько значительных эпизодов заток. Наиболее интенсивные наблюдались в 1993, 1999, 2003, 2009, 2012, 2015 и 2016 годах. Важно отметить, что данные показывают значительную межгодовую изменчивость с периодами относительного

затишья, когда большие заливы либо отсутствовали, либо имели минимальную интенсивность.

Сопоставляя, можно отметить, что во все года, когда наблюдались достаточно мощные заливы североморских вод в Балтийское море через датские проливы, имели положительный индекс NAO, который не всегда был высоким, но в таких ситуациях в предшествующих годах он также являлся положительным.

3.2. Влияние заливов на гидрохимические условия на разрезе станций Готландской котловины.

В данной подглаве представлен анализ гидрохимической структуры водной толщи на ряде станций Балтийского моря в виде разрезов в разные годы, включающий год до залива североморских вод, непосредственно год залива и год после. Рассмотрение таких временных разрезов позволяет выявить изменения в концентрациях растворённого кислорода (O_2), фосфатов (PO_4-P), нитритов и нитратов (NO_2+NO_3-N), которые отражают влияние притока кислородсодержащих североморских вод на состояние придонных слоёв. Сопоставление данных за предшествующий и годы залива даёт возможность оценить динамику биогеохимических процессов и эволюцию кислородного режима. Рассматриваемый разрез представлен на рисунке 28.

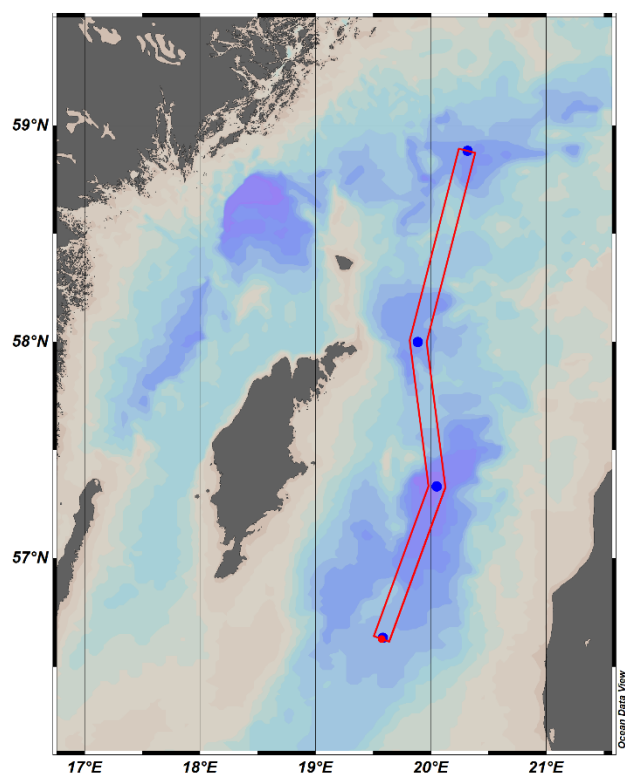
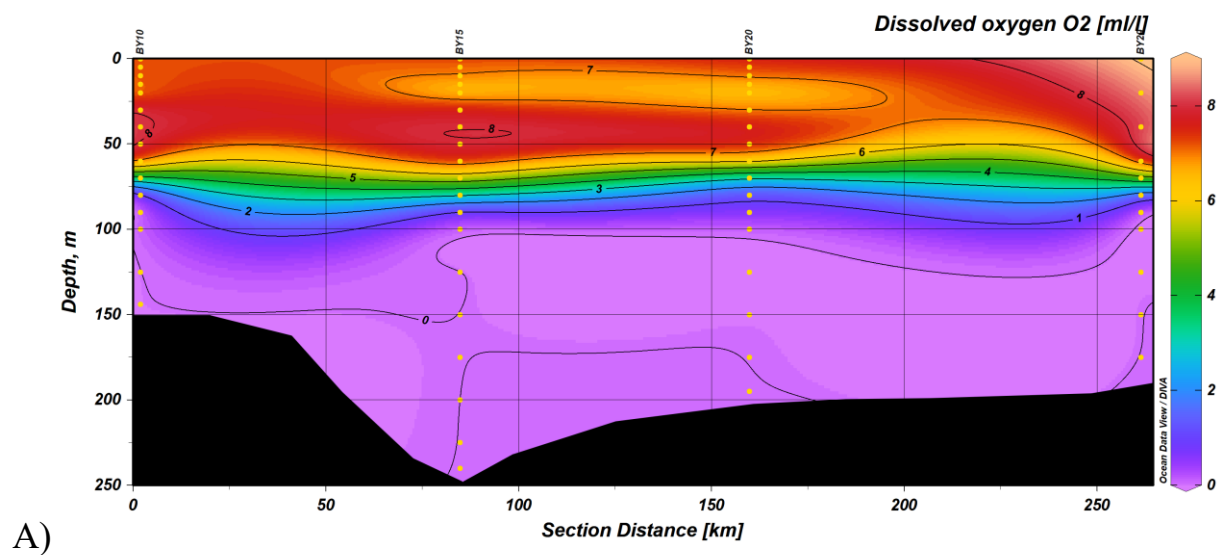


Рисунок 28. Расположение станций на разрезе в центральной Балтике (Разрез ВУ10-ВУ29) в 2002-2005 г.

Для рассмотрения был построен разрез за июль с 2002 по 2005 год, чтобы полностью отследить, что происходит с гидрохимическими параметрами до, в год затора и после него.



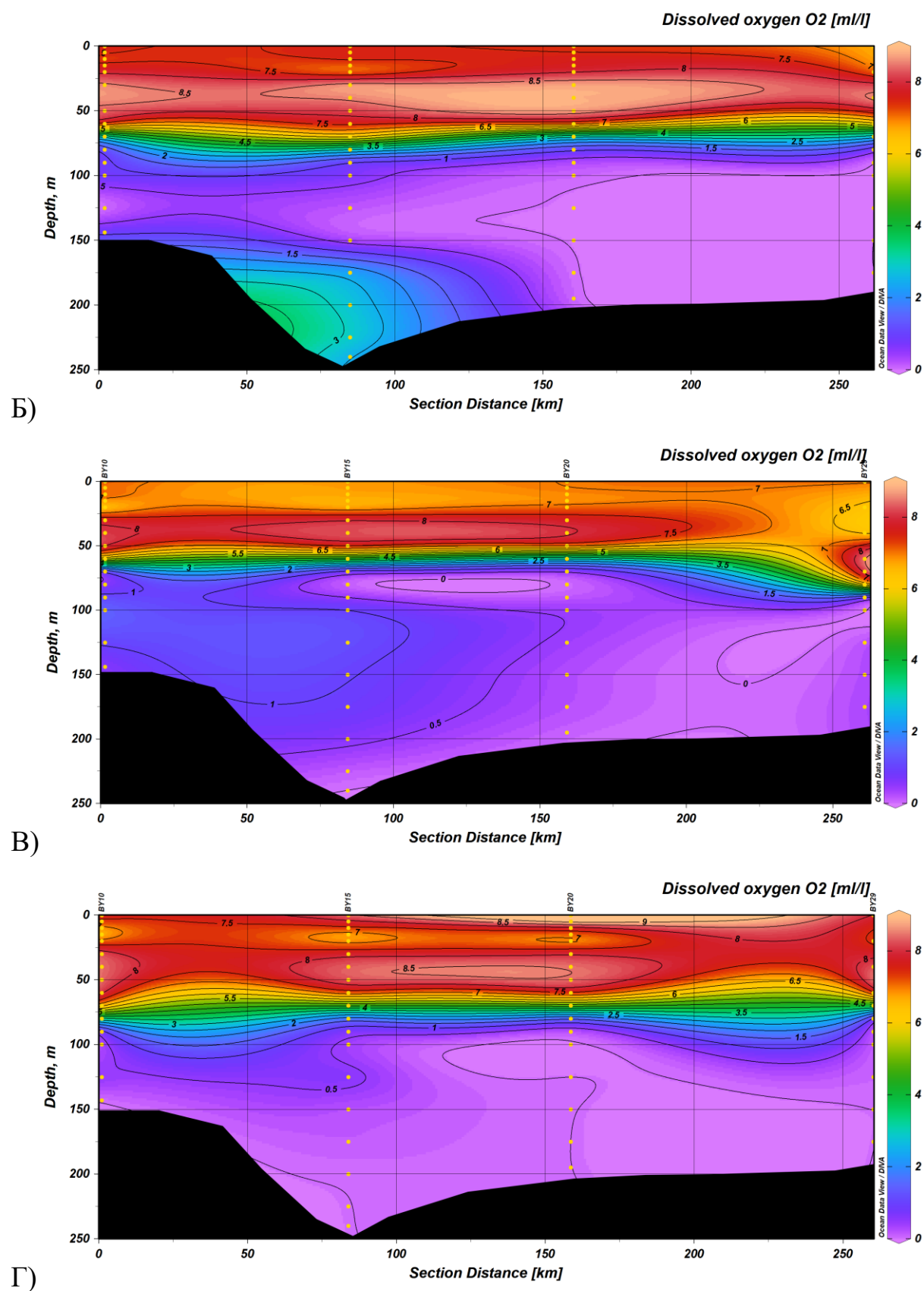


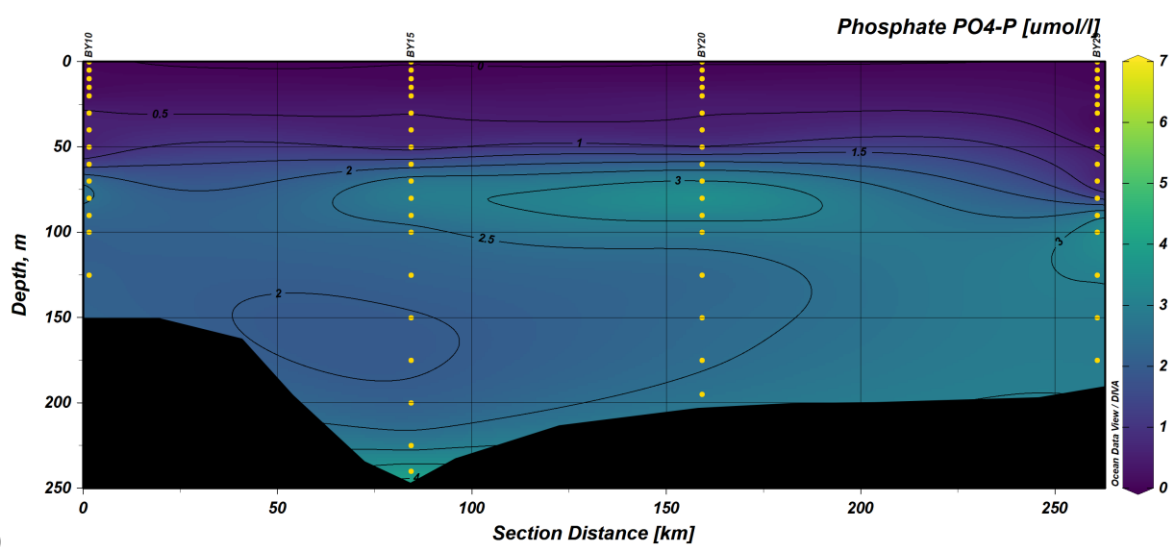
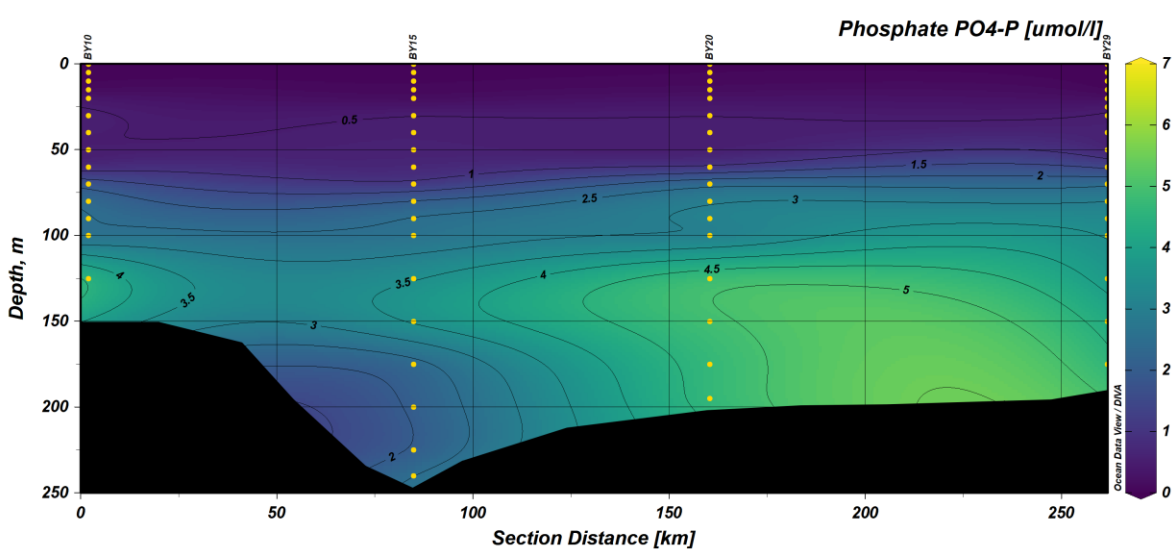
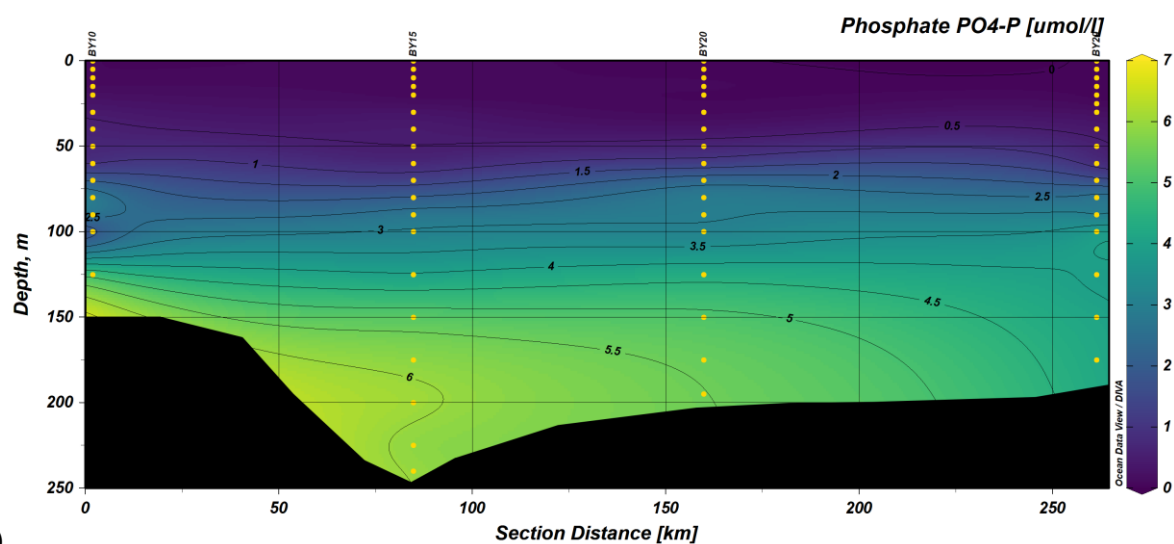
Рисунок 29. Концентрации растворенного кислорода на разрезе ВУ10-ВУ29 в: а) июле 2002 г., б) июле 2003 г., в) июле 2004 г., г) июле 2005 г.

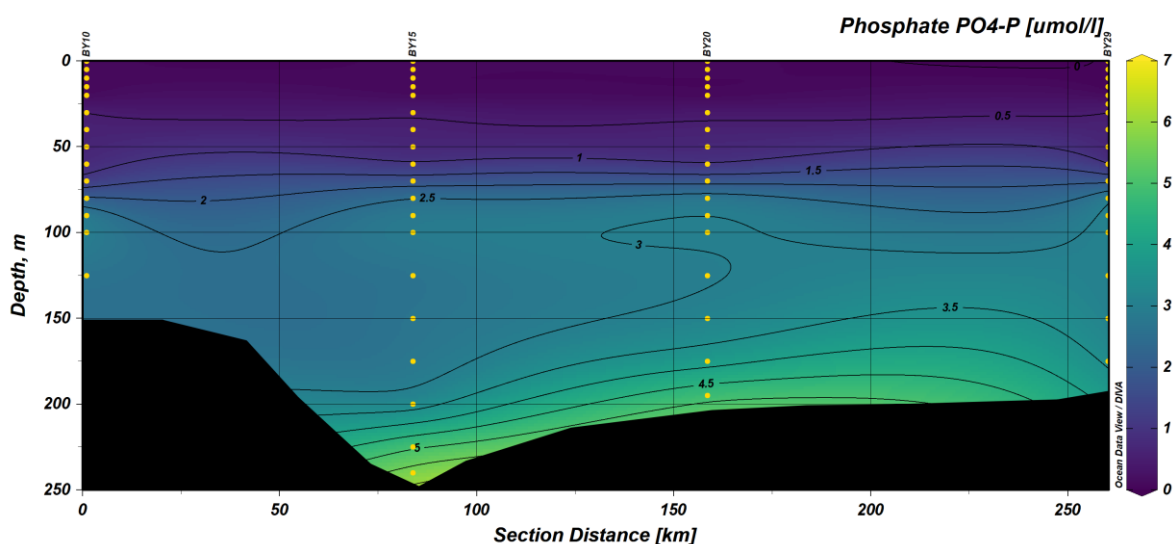
На рисунке 29 представлены продольные разрезы по линии станций ВУ10–ВУ29, отражающие распределение концентраций растворённого кислорода (O_2) по глубине в июле с 2002 по 2005 годы. В 2002 году в верхнем 50-метровом слое концентрации кислорода сохраняются на относительно высоком уровне, что обусловлено интенсивным ветровым перемешиванием. До глубины 100 метров ещё сохраняются некоторые концентрации кислорода, пригодные для жизнедеятельности организмов, однако ниже, примерно с глубины 125 метров в Готландской котловине наблюдается гипоксическая зона, которая занимает значительную часть глубинной области между станциями ВУ10 и ВУ29.

В 2003 году картина немного изменяется: На станциях ВУ10 и ВУ15 наблюдается значительное повышение содержания кислорода в придонных слоях, при этом между поверхностным слоем, обогащённым кислородом, и придонным, в котором возросли концентрации, наблюдается промежуточный слой гипоксии. На рисунке хорошо видно, как по дну «течёт» водная масса, содержащая высокие, для придонных вод Балтийского моря, концентрации кислорода. В данном году отчётливо видно влияние залива.

В 2004 году отмечается небольшое повышение концентраций на станциях ВУ20 и ВУ29, где аноксическая зона стала гипоксической. Скорее всего, это указывает на слабый, по сравнению с 2003 годом, залив североморских вод, который, однако, оказал влияние на придонный слой. При этом на станциях ВУ10 и ВУ15 концентрации растворённого кислорода выше, что связано с их сравнительной географической близостью к Датским проливам.

В 2005 году заливов не наблюдается и уже прошёл эффект от аэрации придонных слоев прошлого года. Структура слоев возвращается в норму для данной области, наблюдается гипоксия и аноксия, которые наблюдались в 2002 году.





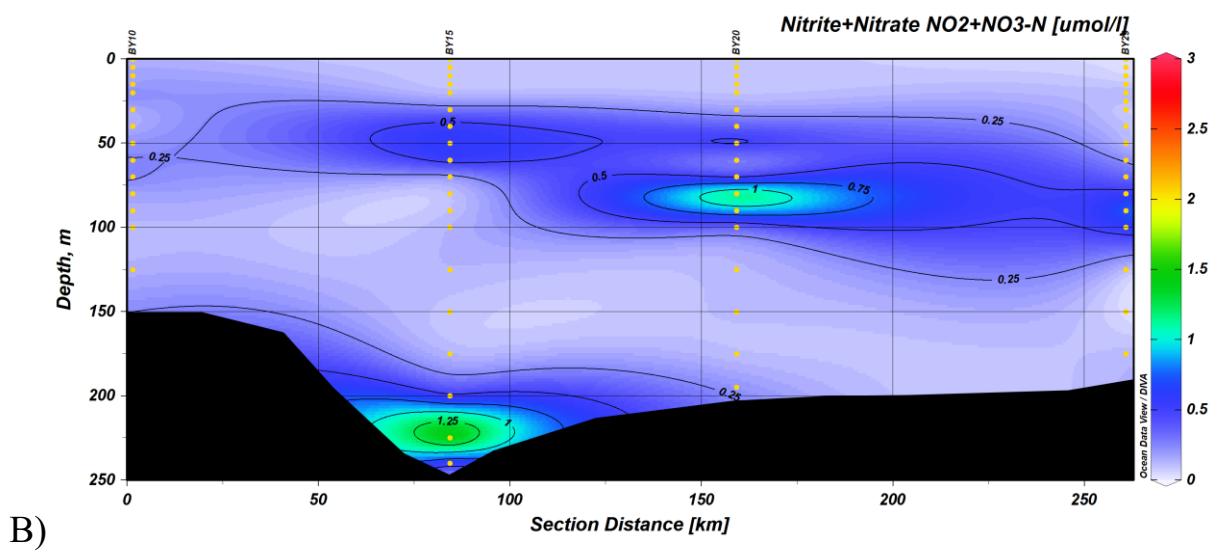
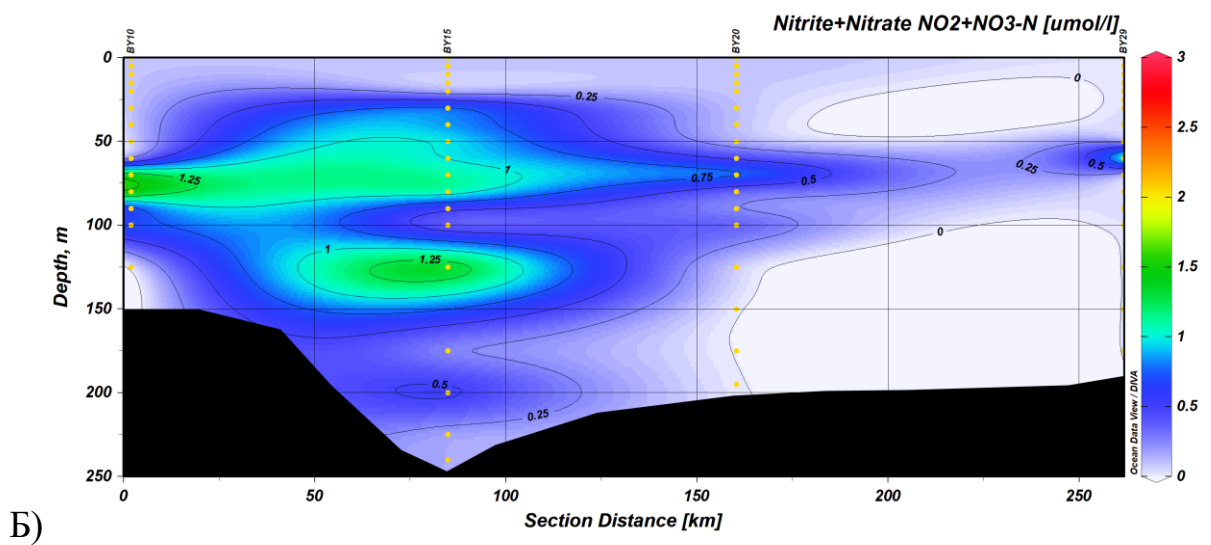
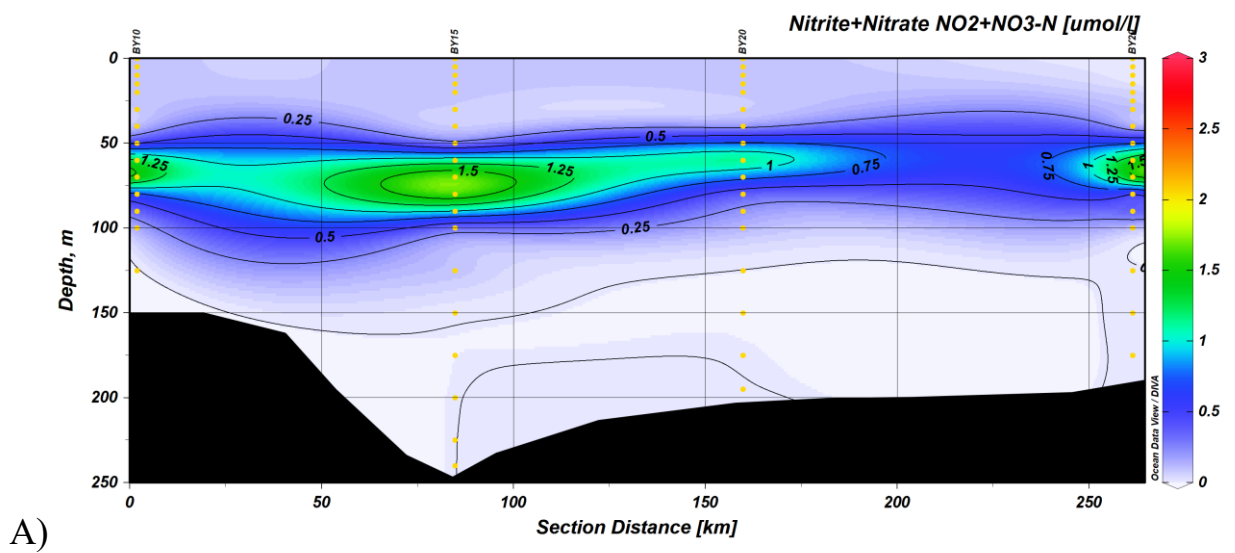
Г)

Рисунок 30. Концентрации фосфора фосфатного на разрезе ВУ10-ВУ29
в: а) июле 2002 г., б) июле 2003 г., в) июле 2004 г., г) июле 2005 г.

Разрезы концентраций фосфор фосфатов ($\text{PO}_4\text{-P}$) демонстрируют обратную динамику по отношению к кислороду. В 2002 в придонных слоях наблюдается устойчивая и достаточно высокая концентрация фосфорного фосфата на всех станциях и наблюдаются они уже с горизонта 125 метров. Такое накопление связано с отсутствием значительных затоков в течении некоторого времени, гипоксическими и аноксическими условиями, в свою очередь влияющих на высвобождение фосфора из донных осадков.

В 2003 году, после крупного затока, концентрации фосфатов в придонных слоях существенно снижаются до 2–4 мкмоль/л на станциях ВУ10 и ВУ15, что отражает вынос фосфора водными массами, а также его связывание в осадках, уменьшение его высвобождения благодаря улучшенной аэрации. Горизонтально концентрации фосфатов уменьшаются от станций, удалённых от проливов, к станциям ближе к ним, что указывает на влияние притока свежих вод на связывание и удаление фосфора из придонных слоёв.

В 2004 году, при слабом, но повторном затоке, наблюдаются самые низкие концентрации фосфорного фосфата, а в 2005 вновь начинает наблюдаться их накопление.



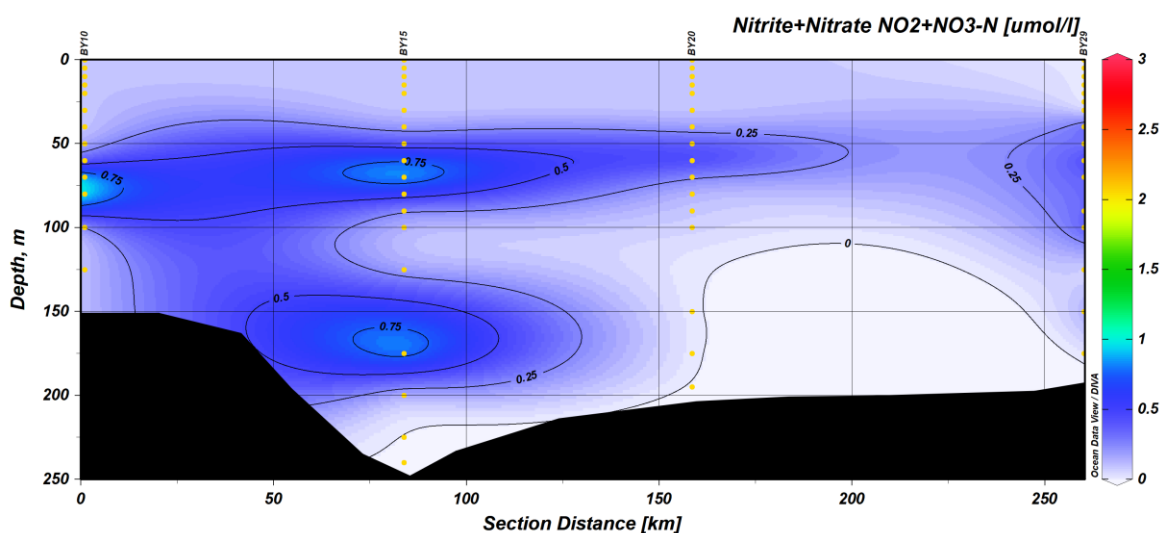


Рисунок 31. Концентрации Нитритов + Нитратов на разрезе ВУ10-ВУ29
в: а) июле 2002 г., б) июле 2003 г., в) июле 2004 г., г) июле 2005 г.

Концентрации нитритов и нитратов ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$) тесно связаны с уровнем кислорода: при низких концентрациях кислорода (гипоксия и аноксия) в придонных слоях их содержание также близко к нулю, поскольку восстановительные процессы азота приводят к снижению нитратов и нитритов. В 2002 году достаточно высокие концентрации нитритов локализуются преимущественно в оксиклине (50–100 м), где при наличии кислорода происходит активное окисление аммония, появившегося в результате разложения органики микроорганизмами, до нитритов и нитратов. В 2003 году, после крупного затoka и повышения кислорода, концентрации нитритов и нитратов в придонных слоях увеличиваются, что свидетельствует о восстановлении аэробных нитрифицирующих процессов. В 2004 году, при слабом затоке, концентрации нитритов и нитратов занимают промежуточные значения, отражая частичное улучшение кислородного режима, при этом заметен значительный рост концентраций на станции ВУ15. В 2005 небольшие концентрации нитритов и нитратов наблюдаются почти по всему разрезу, что является остаточным эффектом от заток в 2003 и 2004 году.

Сопоставление гидрохимических разрезов по концентрациям растворённого кислорода, фосфатов и соединений нитритов и нитратов в Готландской котловине за период 2002–2005 годов подчёркивает ключевую

роль затоков североморских вод в формировании гидрохимической структуры придонных слоев Балтийского моря. Крупный заток в 2003 году вызвал значительное повышение концентраций кислорода и нитритов и нитратов в придонных слоях и, соответственно, снижение концентраций фосфатов. В годы без затоков (2002, 2005) и при слабом затоке (2004) наблюдается гипоксия и аноксия, сопровождающиеся накоплением фосфатов и низкими концентрациями нитритов и нитратов. Пространственное распределение параметров отражает распространение североморских вод от Датских проливов к северным районам котловины, где интенсивность аэрации снижается, в сравнении с более южными станциями. Эти данные подтверждают, что периодические затоки североморских вод являются основным фактором, поддерживающим кислородный баланс и регулирующим биогеохимические циклы в глубоководных зонах Балтийского моря, что имеет важное значение для оценки экологического состояния и устойчивости экосистемы региона.

4. Последствия распространения гипоксических зон в Балтийском море.

Состояние пониженного содержания растворённого кислорода в воде оказывает глубокое и многоаспектное воздействие на экосистему Балтийского моря, приводя к снижению биоразнообразия, деградации биологических сообществ и нарушению пищевых цепей. В последние десятилетия масштабы гипоксических зон в Балтике значительно увеличились, что связано с комплексом факторов, включающих антропогенное загрязнение и климатические изменения.

Одним из наиболее заметных последствий гипоксии является резкое сокращение и даже исчезновение бентосных организмов — животных, обитающих на морском дне и в донных отложениях. Исследования показывают, что в зонах с концентрацией кислорода ниже 2 мл/л наблюдается массовая гибель многих видов моллюсков, ракообразных и червей, что приводит к упрощению структуры донных сообществ и снижению их функциональной роли в экосистеме. Деградация бентоса нарушает процессы разложения органического вещества и переработки питательных веществ, что усугубляет накопление органики и, в последствии, усиливает гипоксию. Кроме того, исчезновение донных организмов снижает кормовую базу для рыб и других морских животных, вызывая каскадные эффекты в пищевых цепях. Например, в российской зоне Балтийского моря наблюдается сужение площади распространения зообентоса, что связано с усилением стратификации и расширением зоны гипоксии у дна. Следствием этого стало сокращение площади нагула бентосоядных рыб в 2008–2019 г [15].

Многочисленные исследования показывают, что гипоксия оказывает значительное негативное воздействие на условия нереста, выживаемость потомства, доступность бентосной пищи, основной обмен веществ и особенности жизненного цикла рыб, включая их рост и физиологическое состояние. В этом контексте также следует обратить внимание на влияние гипоксии и аноксии на сокращение ареала обитания рыбных популяций.

Уменьшение пространства, пригодного для жизни, приводит к скученности популяции, что может активировать процессы, зависящие от плотности, такие как увеличение внутривидовой и межвидовой конкуренции за пищу [16].

Отсутствие кислорода также способствует накоплению токсичных веществ, таких как сероводород, который дополнительно отравляет морскую среду и препятствует восстановлению жизни в придонных слоях.

Деградация экосистемы Балтийского моря вследствие гипоксии оказывает значительное влияние на прибрежные сообщества и экономику стран региона. Снижение численности и продуктивности водных ресурсов ведёт к уменьшению уловов и ухудшению условий для рыболовства и аквакультуры.

Низкий уровень кислорода и накопление питательных веществ создают благоприятные условия для массовых цветений токсичных водорослей, в частности, цианобактерий. Такие цветения приводят к ухудшению качества воды, выделению токсинов и снижению прозрачности, что негативно влияет на все уровни пищевой цепи и качество морских ресурсов, а также снижают рекреационную привлекательность побережья, что негативно влияет на туризм [17].



Рисунок 32. Цветение воды в Балтийском море.

Подводя итог, гипоксия в Балтийском море является одной из серьёзных угроз для экосистемы моря, приводящей к потере биоразнообразия, снижению продуктивности и устойчивости морских сообществ, а также ухудшению условий для промысла. Эти изменения оказывают значительное социально-экономическое воздействие на прибрежные регионы. Для смягчения последствий необходимы комплексные меры по сокращению поступления питательных веществ, мониторингу состояния экосистем и адаптации к климатическим изменениям.

Заключение

Выполненное исследование позволило комплексно рассмотреть проблему гипоксических зон в Балтийском море, выявить основные причины их формирования и оценить последствия для экосистемы и социально-экономической сферы региона.

Анализ многолетних гидрохимических данных показал, что в придонных слоях Балтики имеются устойчивые гипоксические и аноксические зоны. Одним из ключевых факторов их появления и сохранения является поступление биогенных веществ, прежде всего фосфора и соединений азота в результате антропогенного воздействия. Это приводит к эвтрофикации, массовому цветению фитопланктона и последующему разложению органики, что сопровождается интенсивным потреблением кислорода в придонных слоях.

Детальный анализ вертикальных и продольных разрезов гидрохимических параметров показал, что зона наиболее интенсивных биогеохимических преобразований азота располагается на глубинах 50–80 метров, где наблюдается максимальная активность нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов. В придонных слоях при отсутствии кислорода происходит накопление фосфатов, а концентрации нитритов и нитратов резко падают, что указывает на преобладание восстановительных процессов (т.е. появление аммония).

Важную роль в динамике кислородного режима играют крупномасштабные атмосферные процессы, отражённые в индексе NAO (Североатлантическое колебание). Периоды устойчиво положительных значений NAO способствуют формированию притока североморских вод через датские проливы. Эти заливы приносят обогащённые кислородом воды в глубоководные котловины, приводя к кратковременному повышению концентраций растворённого кислорода, и следующим за этим снижению уровня фосфатов, а также к окислению форм азота. Однако эффект от таких

событий носит временный характер: уже через год после затoka в придонных слоях вновь наступают гипоксические и аноксические условия.

Последствия распространения гипоксических зон для экосистемы Балтийского моря крайне негативны. Гибель бентосных организмов, сокращение кормовой базы для рыб, деградация промысловых запасов (в частности, трески), а также усиление токсичных цветений водорослей, общее снижение биоразнообразия и устойчивости экосистемы. Это оказывает непосредственное влияние на социально-экономическое развитие прибрежных регионов, снижая уловы, ухудшая качество воды и ограничивая рекреационный потенциал.

Таким образом, гипоксия в Балтийском море — это результат сложного взаимодействия природных и антропогенных факторов, где ключевую роль играют климатические колебания, стратификация вод, поступление биогенных веществ и редкие затoki североморских вод. Для смягчения последствий и восстановления экологического баланса необходимы комплексные меры по снижению антропогенной нагрузки, улучшению очистки сточных вод, и, конечно, мониторинг состояния моря. Только скоординированные усилия стран Балтийского бассейна и международное сотрудничество позволят сохранить уникальную экосистему Балтики.

Список использованных источников

1. ЕСИМО. Балтийское море [Электронный ресурс]. – Свободный режим доступа: http://esimo.oceanography.ru/esp1/index.php?sea_code=1# (Дата обращения: 14.09.2024)
2. ЕСИМО. Балтийское море [Электронный ресурс]. – Свободный режим доступа: http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/1/section_id/7/menu_id/4583 (Дата обращения: 14.09.2024)
3. Большая Российская энциклопедия. Балтийское море. – Свободный режим доступа: <https://bigenc.ru/c/baltiiskoe-more-669329> (Дата обращения: 14.09.2024)
4. Национальный атлас России. Балтийское море. – Свободный режим доступа: <https://nationalatlas.ru/tom2/245-248.html> (Дата обращения: 15.09.2024)
5. Литина Е.Н., Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Динамика гипоксических зон в Балтийском море на рубеже XX и XXI веков / Водные ресурсы. 2020. Том 47, № 3. С. 322-329.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Балтийское море. Гидрометеониздат, 1992 г. Т.3.
7. Bergström L., Haldin J. HELCOM. State of the Baltic Sea 2023. 2023 г.
8. Дубравин В.Ф. Гидрохимический режим. Нефть и окружающая среда Калининградской области. 2012. Т. 2. С.106-120.
9. Тихонова Н.А. Численное гидродинамическое моделирование большого балтийского залива / Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», 2020. С. 404-406.
10. Еремина Т.Р. Балтийское море в настоящем и будущем климатические изменения и антропогенное воздействие / РГГМУ, Санкт-Петербург, 2016 г. С. 20-28.
11. Весман А.В. Современные проблемы Балтийского моря // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 3 [Электронный

ресурс]. Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2012/03/10613> (дата обращения: 11.12.2024).

12. Bergström L., Ahtiainen H., Avellan L. et al. HELCOM State-of-the-Baltic-Sea Second-HELCOM-holistic-assessment 2011-2016. 2018 г.

13. В. Волощук, Т. Р. Ерёмина, Е. К. Ланге, А. С. Аверкиев. Влияние климатических изменений и антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим и состояние экосистемы Финского залива Балтийского моря/ Гидрометеорология и экология №72. Санкт-Петербург, 2023 г. С. 493-511.

14. Институт Лейбница по изучению Балтийского моря. Baltic Saline Barotropic Inflows (SBI) 1887 – 2024. – Свободный режим доступа: <https://www.io-warnemuende.de/major-baltic-inflow-statistics-7274.html> (Дата обращения: 5.06.2025)

15. Александров С.В. Гусев А.А. Семенова А.С. Океанологические исследования. Том 51. № 1, С. 91–113. 2023 г.

16. Амосова В.М. Зезера А.С. Голубкова Т.А. Влияние факторов среды на величины запасов рыб в Балтийском море. 2022 г.

17. База данных SHARK [Электронный ресурс] // Svenskt HavsARKivs webbplats. Режим доступа: <https://shark.smhi.se/hamta-data/> (дата обращения: 30.05.2025).

18. База данных ODIN 2 [Электронный ресурс] // Институт исследования Балтийского моря имени Лейбница. Режим доступа: <https://odin2.io-warnemuende.de/> (дата обращения: 30.05.2025).

19. Программа NEST [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nest.su.se/> (дата обращения: 31.05.2025).

20. База данных North Atlantic Oscillation (NAO) [Электронный ресурс] // National Centers for Environmental Information. Режим доступа: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao/> (дата обращения: 31.05.2025).