



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

«Оперативный спутниковый мониторинг «цветения» вод Балтийского
моря»

Исполнитель: Смолякова Дарья Максимовна

Научный руководитель: Фролова Наталия Сергеевна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

_____ кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

_____ Лукьянов Сергей Васильевич

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

г. Санкт-Петербург
2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Физико-географическое описание Балтийского моря.....	6
1.1. Географическое положение.....	6
1.2. Метеорологические и гидрологические условия.....	7
1.3. Циклы цветения фитопланктона в Балтийском море.....	13
1.4. Концентрация хлорофилла «а» как основного показателя цветения.....	14
2. Материалы и методы исследования.....	16
2.1. Исходные данные.....	16
2.2. Методы исследования.....	17
3. «Цветение» вод Балтийского моря по данным спектрорадиометра MODIS и сервиса Морской Службы Copernicus.....	20
3.1. Статистический анализ.....	20
3.1.1. Анализ первичных статистик.....	20
3.1.2. Анализ трендов временных рядов.....	22
3.1.3. Корреляционный анализ.....	30
3.2. Временной ход температуры и хлорофилла «а» за 2002-2022 годы.....	38
3.3. Анализ пространственного распределения полей температуры поверхности Балтийского моря и хлорофилла «а» с апреля по октябрь за 2020 и 2021 года.....	44
3.4. Диаграмма Хофмоллера.....	63
Заключение.....	66

Список литературы.....69

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных экологических проблем Балтийского моря является эвтрофикация [1, 2] - процесс повышения биологической продуктивности и ухудшения качества вод, вызванный избыточным поступлением биогенных элементов, прежде всего азота и фосфора, под воздействием антропогенных и естественных факторов [3, 4]. Избыток питательных веществ приводит к резкому увеличению биомассы фитопланктона и первичной продукции (цветению). В результате прозрачность воды уменьшается, происходит накопление органического вещества, на окисление которого расходуется кислород, что при возникновении стагнации может привести к дефициту кислорода или анаэробным условиям. Изменение газового и светового режимов неизбежно сопровождается структурными изменениями состава сообществ гидробионтов [5].

Сложившаяся ситуация в различных районах Балтийского моря привела к необходимости мониторинга важнейших показателей экологического состояния морской среды [6]. Среди биологических/экосистемных параметров спутниковый мониторинг в результате косвенных измерений возможен только для фитопланктона [7]. Фитопланктон, к которому относятся одноклеточные водоросли (диатомовые, динофлагелляты, кокколитофорида и др.), а также цианобактерии, является первым звеном трофической цепи и основным продуцентом органического вещества в водоемах. Общеизвестным методом оценки биомассы и развития фитопланктона, а также продуктивности водоемов, является определение концентрации хлорофилла «а», основного пигмента фитопланктона, играющего важнейшую роль в процессе фотосинтеза [8].

Цель выпускной квалификационной работы заключается в исследовании особенностей цветения вод Балтийского моря по данным спутникового мониторинга.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Провести статистический анализ климатической изменчивости биохимических параметров вод Балтийского моря.
2. Построить и проанализировать временные ряды температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а».
3. Построить и проанализировать пространственные карты температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а».
4. Построить и проанализировать диаграммы Хофмоллера для температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а».

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

1.1 Географическое положение

Балтийское море расположено в северной части Европейского континента между координатами $65^{\circ}56'$ и $54^{\circ}46'$ с. ш. и $9^{\circ}57'$ и $30^{\circ}00'$ в. д. Площадь его 419 тыс. км²; объем 21,5 км³; средняя глубина моря 51 м, а наибольшая глубина – 470 м (Ландсортская котловина). Имеет только 1 выход к Атлантическому морю через проливы Зунд, Большой и Малый Бельты и далее через Каттегат и Скагеррак в Северное море. Со всех остальных сторон окружен различными по типу и происхождению берегами (Рис.1.1). Балтийское море относится к внутренним морям [9]. Омывает берега таких государств как: Россия, Эстония, Литва, Германия, Латвия, Польша, Дания, Финляндия и Швеция. Также в этом море находятся крупные заливы, такие как: Ботнический, Финский, Рижский, Куршский (отделен косой). Крупнейшие острова, находящиеся в этом море: Эланд, Волин, Аландия, Готланд, Альс, Сааремаа, Муху, Мен, Узедом, Форе и другие. И крупнейшие реки, впадающие в Балтийское море: Западная Двина, Нева, Висла, Вента, Нарва, Преголя [12].

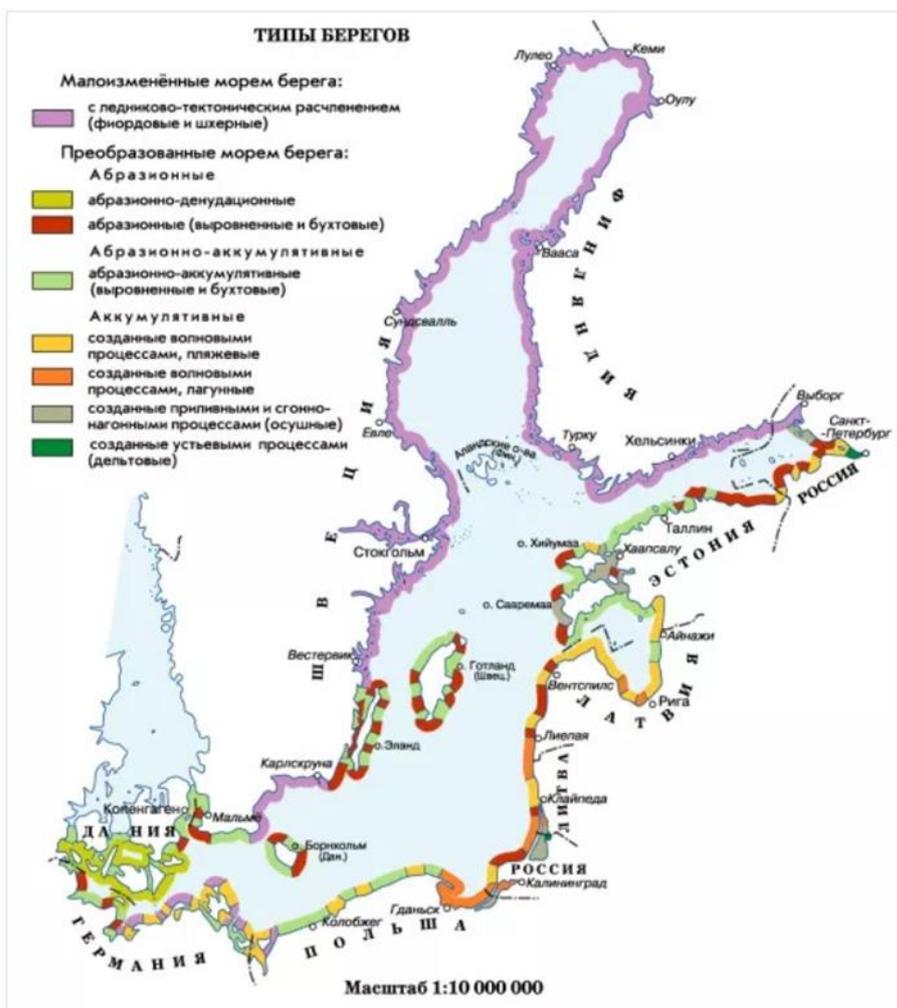


Рисунок 1.1. Типы берегов и рельеф дна Балтийского моря

Особенности рельефа дна

Рельеф дна в Балтийском море достаточно неровный. А то, что в этом море довольно небольшие глубины показывает то, что оно полностью находится в районе материкового шельфа. [9]

1.2 Метеорологические и гидрологические условия

Балтийскому морю, который находится в умеренном поясе, присущ морской климат умеренных широт, но так же для него типичны черты континентального климата. Сезонные особенности обуславливаются взаимодействием барических центров, таких как: Исландский минимум и Азорский и Сибирский максимум. Активность циклонов достигает своего пика в осенне-зимние месяцы, из-за интенсивного взаимодействия

Исландского минимума и Сибирского максимума, эти циклоны приносят пасмурную погоду с западными и юго-западными сильными ветрами. В центре моря среднемесячные значения температуры в январе и феврале равна примерно -3° , а на севере и востоке $-5 - (-8)^{\circ}$. Но бывают редкие случаи, когда над морем проходит холодный арктический воздух (связанный с усилением Полярного максимума) и в таких моментах температура может достигать $-30 - (-35)^{\circ}$. В весенне-летний период на море оказывает влияние Азорский и, частично, Полярный максимумы. Из-за ветров северных направлений, для весеннего периода характерны невысокие температуры. Летом же оказывают влияние преимущественно западные, северо-западные и юго-западные слабые и умеренные ветра. Из-за них для моря характерна прохладная и влажная погода. В июле среднемесячная температура в Ботническом заливе равна $14-15^{\circ}$, а в других районах $16-18^{\circ}$. Из-за кратковременных затоков прогретого средиземноморского воздуха температура может достигать и более высоких значений [9].

Речной сток

Около 250 рек впадает в Балтийское море. Благодаря им, в море вливается примерно 433 км^3 воды (2,1% от общего объема моря). Самое большое количество воды за год приносят Нева ($83,5 \text{ км}^3$), Висла ($30,4 \text{ км}^3$), Неман ($20,8 \text{ км}^3$), Даугава ($19,7 \text{ км}^3$) и еще некоторые другие реки. Из-за неравномерного расположения устьев рек речной сток разный в районах моря. К примеру, в Ботническом заливе $185 \text{ км}^3/\text{год}$, а в Рижском заливе $36,7 \text{ км}^3/\text{год}$; в Финском заливе $109,8 \text{ км}^3/\text{год}$, а в центральной части Балтийского моря $111,6 \text{ км}^3/\text{год}$. По вышеизложенным данным видно, что больше половины речного стока приходится в восточные районы моря [9].

Особенности вертикальной структуры

Благодаря неравномерному радиационному прогреву в течение года и в разных местах, наблюдаются сезонные различия температуры поверхности моря (ТПМ) и их пространственного распределения (Рис. 1.2).

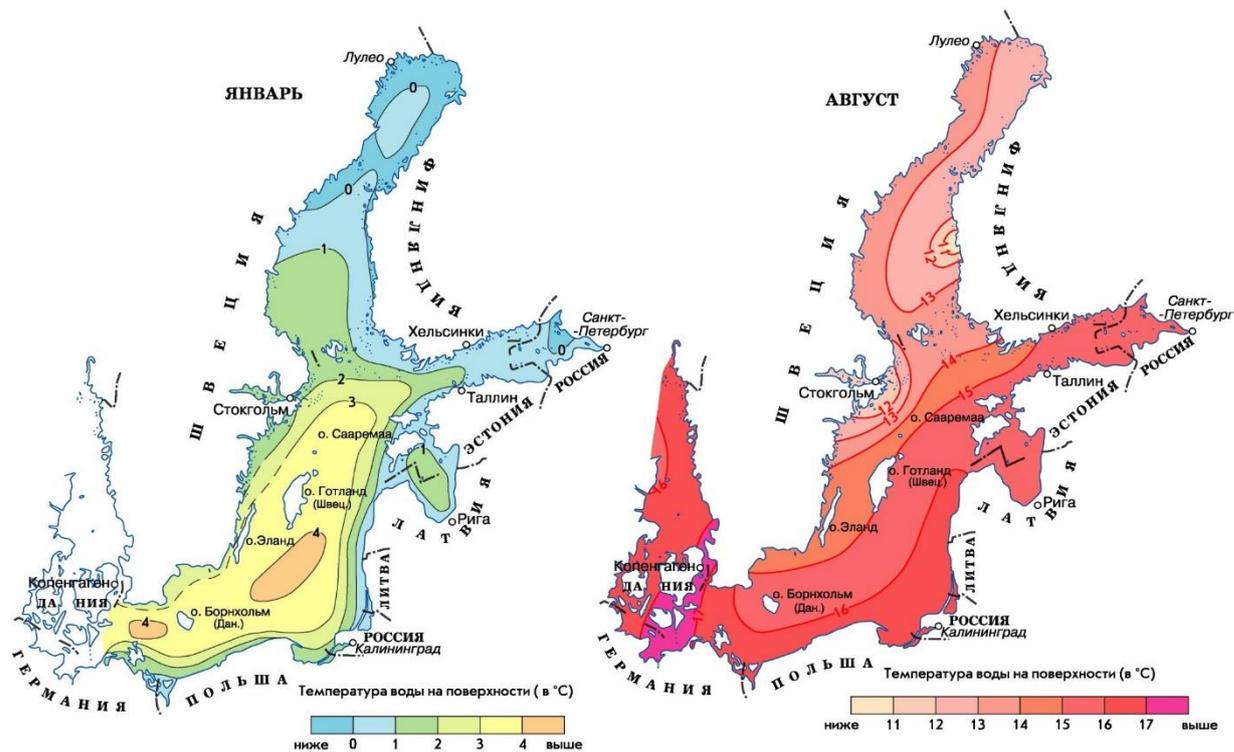


Рисунок 1.2. Распределение температуры на поверхности Балтийского моря

На картах распределения температуры видно, что зимой ТПМ ниже у берегов, нежели в центральной части моря. Также можно выделить то, что у западного берега температура несколько выше, чем у восточного, что может быть обусловлено охлаждающим влиянием Европейского материка. Летом же поверхность моря нагрета сильнее, но по-разному в различных районах Балтийского моря.

Такие четко выраженные сезонные различия в ТПМ наблюдаются только на глубине 50-60 м. Глубже температура воды почти не меняется. Зимой значения температуры воды близки по значениям 0-60 м. В теплый сезон на глубине 0-30 м температура повышается за счет радиационного прогрева. С глубины 30 м и ниже она скачкообразно понижается до глубины 60-70 м, а после опять немного повышается ко дну [9].

Из-за ограниченного водообмена с Северным морем, а также значительным речным стоком наблюдается низкая соленость и ее черты распределения в море. На рисунке 1.3 видно, что величина солености уменьшается с запада на восток, что может быть обусловлено существенным влиянием речных вод на восточную часть Балтийского моря. В северной и центральной районах соленость немного уменьшается с востока на запад. Обуславливается это циклонической циркуляцией вод, которая приносит соленые воды с юга на северо-восток по восточным берегам. В общем, уменьшение солености на поверхности наблюдается с юга на север [9].

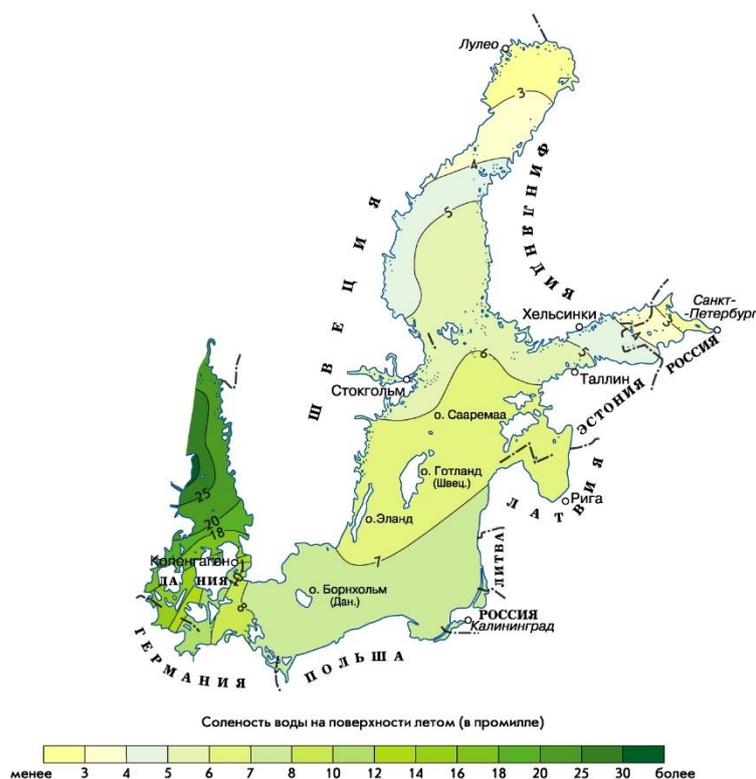


Рисунок 1.3. Распределение солености на поверхности Балтийского моря

Почти для всего моря характерны увеличения солености с глубиной, и это происходит примерно одинаково, кроме Ботнического залива [9].

Изменение солености в Балтийском море – это один из важнейших факторов, влияющий на физические, химические и биологические процессы.

Течения

Как и во многих других морях северных широт, циркуляция вод в поверхностном слое имеет циклонический характер. На рисунке 1.4 представлена карта направлений течений на поверхности Балтийского моря. Благодаря слиянию вод из Ботнического и Финского заливов в северной части моря формируется постоянное течение и движется на юго-запад вдоль берегов Швеции. Далее, через датские проливы, направляется в Северное море. У южных берегов течение движется на восток. Далее, у Гданьского залива, движение направлено на север вдоль восточных берегов. Около острова Хиума течение делится на 3 направления: первое – через Ирбенский пролив в Рижский залив, где создает почти кольцевое течение (против часовой стрелки). Второе направление входит в Финский залив и вдоль южных берегов распространяется до устья Невы, затем направляется на северо-запад и выходит из залива. Третье направление идет на север и входит в Ботнический залив, полностью огибая его по берегам, и спускается на юг. В центральной части наблюдаются замкнутые круговые течения циклонического типа [9].

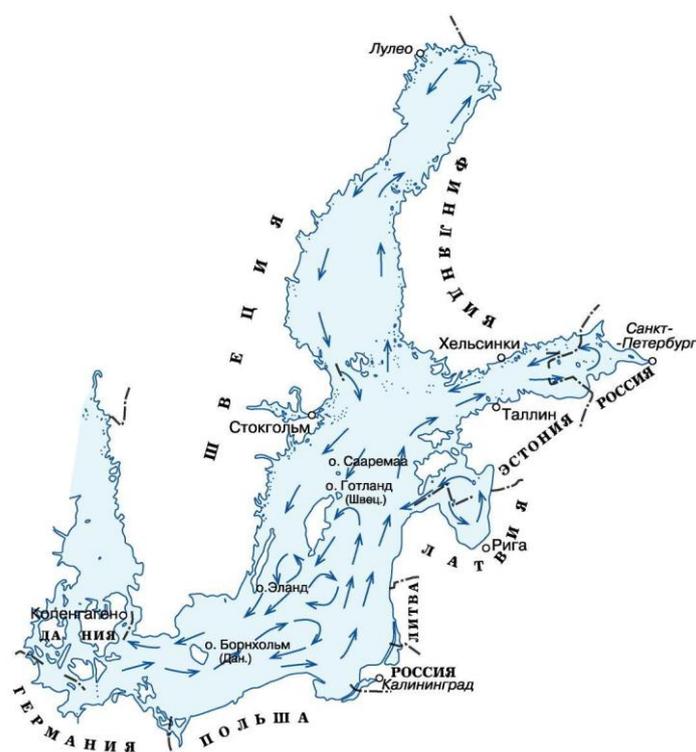


Рисунок 1.4. Направления течений на поверхности Балтийского моря

Гидрохимические параметры

Такие факторы как слабый водообмен Балтийского моря с океаном и довольно значительный сток рек с Евразийского материка обуславливают гидрохимические характеристики этого моря. У берегов наблюдается повышенное содержание ионов кальция и немного пониженная концентрация ионов натрия. Концентрация растворенного кислорода (РК) разная в зависимости от сезона: осенью и зимой количество РК в поверхностном слое повышается за счет понижения температуры и из-за влияния штормов; весной также большое значение РК до глубины 20 м благодаря деятельности фитопланктона в условиях невысоких температур; летом же наоборот, растворимость кислорода понижается из-за повышения температуры и понижения воздействия фитопланктона. Для вертикального распределения кислорода характерны высокие значения от поверхности до глубин 60-70 м и резкое уменьшение и низкие значения на глубинах 80-100 м и до дна. Во время мощных затоплений вод через проливы происходит обновление глубинных вод Балтийского моря. А во время затишья (застоя) в глубоких районах наблюдается исчезновение кислорода и появление сероводорода. Это происходит из-за разницы в концентрации соли, вследствие этого в глубоких и менее плотных слоях образуется стратификация водных слоев и не происходит смешивания двух типов воды, необходимого для перемещения кислорода ко дну. Но при этом, в Ландсортской впадине гипоксия не наблюдалась благодаря слабой вертикальной стратификации и конвективному перемешиванию. Отсутствие кислорода очень пагубно влияет на всю морскую экосистему, создавая территории мертвых зон. Этому способствует резкая стратификация водной толщи, слабый водообмен моря с океаном, отсутствие перемешивания и поступление органического вещества в сочетании с высокой продуктивностью. А благодаря таким соединениям, как фосфаты железа,

происходит размножение различных видов бактерий, из-за которых создаются подходящие условия для отсутствия кислорода [10]. Также, в Балтийском море наблюдается высокое содержание силикатов, которые приносят реки с материков [11].

1.3. Циклы цветения фитопланктона в Балтийском море

Цветение фитопланктона в Балтийском море можно разделить на 3 периода:

1. весеннее цветение, состоит из диатомовых (диатомеи) и динофитовых (динофлагелляты) водорослей [14; 15];
2. летнее цветение, в котором развиваются сине-зеленые водоросли (цианобактерии) [15; 16];
3. осеннее цветение, в котором доминируют диатомовые водоросли [14].

Рассмотрим циклы цветения фитопланктона в 3-х регионах Балтийского моря: Финский залив, центральный и юго-восточный районы (Рис.1.5).

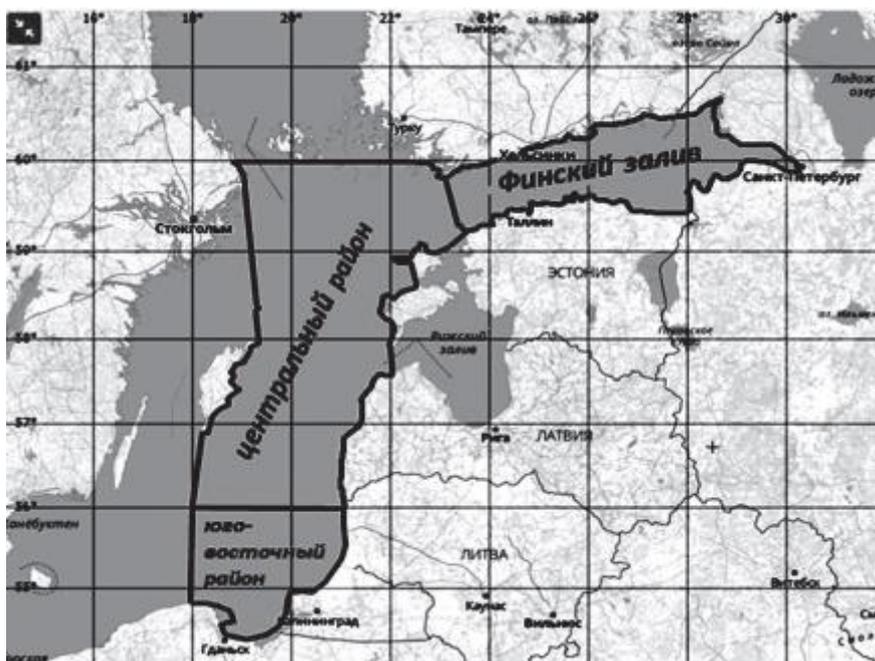


Рисунок 1.5. Карта Балтийского моря с границами районов [13]

1. Центральный район: для него присуще такое сезонное распределение: весной наибольшее значение наблюдается в самом начале и 20-х числах апреля; летом максимум выпадает на первую декаду июля; осенью наибольшие значения присущи для последней декады сентября и середины октября [13].

Но иногда наблюдаются нетипичные для этого региона максимумы значений концентрации хлорофилла: к примеру, в 2008 году высокие показатели также наблюдались до середины последней декады июля, а максимум приходился на конец апреля - начало мая [13].

2. Юго-восточный район: сезонный ход концентрации хлорофилла очень похож на тот, который происходит в центральном районе. Весной максимум наблюдается в первой и последней декаде апреля; летом – в начале июля и до начала августа; осенью максимум приходится на вторую и третью декаду сентября и на конец октября [13].

Такая же нетипичная ситуация, как в центральном районе, наблюдается и в юго-восточном регионе: в 2008 году высокие показатели были присущи для начала апреля – середины последней декады июня и с конца июня по август [13].

3. Финский залив: для данного региона наиболее характерны два максимума: весной с конца апреля по начало мая; летом – в первой декаде июля [13].

1.4. Концентрация хлорофилла «а» как основного показателя цветения

На данный момент существует несколько параметров, по которым можно определить цветность воды с помощью спутников. Главным из них является фитопланктон. Хлорофилл – это зеленый пигмент растений, содержащийся в хлоропластах и, соответственно, он содержится в фитопланктоне. Определение цвета воды в море с помощью искусственных спутников Земли происходит благодаря изображениям, которые были

получены для синего и зеленого спектральных каналов, отношение которых определяет значение концентрации хлорофилла.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Исходные данные

В данной выпускной квалификационной работе анализ цветения вод Балтийского моря выполнялся с помощью данных дистанционного зондирования Земли оптического диапазона спектрорадиометра MODIS-Aqua. Исследовалась пространственно-временная изменчивость температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а». Пространственный анализ проводился по изображениям среднемесячных распределения характеристик в период с апреля по октябрь 2020 и 2021 годов, а временной – по графикам в период с 2002 г. по 2022 г. Изображения и графики были построены с помощью сервиса Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>; свободный доступ). Также, в работе используются среднемесячные данные о температуре поверхности воды, биомассе фитопланктона, содержании хлорофилла «а» и концентрации биогенных элементов (азот, фосфор) за период с января 1993 по декабрь 2018 годов, полученные с помощью сервиса Морской Службы Copernicus. Выбраны три точки в Ботническом (64.70°N 23.00°E), Финском (60°00'N 27.50°E) и Рижском (57.70°N 23.50°E) заливах Балтийского моря.

Спектрорадиометр MODIS

Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) – это один из нескольких съемочных систем, установленных на борту спутников Terra и Aqua (серия EOS). Эти искусственные спутники Земли находятся на солнечно-синхронной орбите. Угол наклона 98,2 градуса. Датчики радиометров MODIS имеют 36 спектральных каналов в видимой и инфракрасной (ближней, средней и тепловой) области [18].

Благодаря непрекращающейся съемке (с шириной сцены – 2330 км) ежедневно и не менее одного раза может сниматься любая территория,

которая попадает в область видимости станции, а вся поверхность Земли – за два дня [18].

Таблица 2.1. Характеристика спектрорадиометра MODIS

Тип данных	Оптические
Режим съемки	Моно съемка
Спектральные каналы	36 спектральных каналов в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах
Пространственное разрешение в надире, м	250 (каналы 1-2); 500 (каналы 3-7); 1000 (каналы 8-36)
Динамический диапазон, бит/пиксель	12
Ширина полосы съемки в надире, км	2330
Период повторной съемки	1-2 раза в сутки, в зависимости от широты места съемки

2.2 Методы исследования

Данная работа осуществлялась с помощью различных методов: дистанционные оптические измерения (спутниковый мониторинг); картографический, описательный и сравнительно-географический методы; статистические методы анализа характеристик (анализ первичных статистик, анализ трендов временных рядов, корреляционный анализ).

Спутниковый мониторинг

На сегодняшний день, благодаря спутникам, можно успешно отслеживать температуру поверхности моря и концентрацию хлорофилла «а».

Температура поверхности моря в основном измеряется с помощью инфракрасных радиометров температуры. Съёмка происходит в средней и дальней частях областей спектра ИК радиометров (1,5 – 3,0 мкм и более). Эту съёмку называют «тепловой инфракрасной» (ТИ), так как в данных частях спектра распространяется собственное тепловое излучение поверхности земли и океана/моря [19].

Тепловой инфракрасный диапазон имеет два «окна прозрачности» (это 3-5 мкм и 8-13 мкм соответственно), благодаря которым проводятся исследования Мирового океана с помощью спутников. В одном из них измерения ТПО должны проводиться только на стороне орбиты, где отсутствует солнечный свет (теневая сторона). Это из-за того, что в этом «окне» собственное тепловое излучение океана сопоставимо по силе с отраженным солнечным. В другом «окне» измерения могут производиться при любой освещенности, т.к. там практически отсутствует солнечная радиация [20].

Цвет воды – важная характеристика для многих исследований (изучение аномального цветения вод, оценка типа океанских вод и т.д.). Свет, который попадает на границу раздела воздух-вода, преломляется и проникает на некоторую глубину, а после поглощения и рассеяния на неоднородностях (в случае фитопланктона это пигменты живых организмов) частично возвращается в атмосферу, при этом несет в себе информацию о взвешенных и растворенных веществах, которые находятся в воде. Датчики цвета океана, находящиеся на спутниках, фиксируют значения яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы. Благодаря концентрации фитопланктона определяют содержание пигментов фитопланктона и взвешенных частиц, которые обуславливают поглощение и рассеяние света водой. Эти процессы определяют спектральную яркость излучения, которое выходит из воды. Благодаря анализу наблюдаемых изменений можно определить связь между динамикой экосистем и физикой верхнего слоя. К

примеру, изменение биомассы, которое меняет прозрачность поверхностного слоя воды, также будет влиять и на поглощение солнечной радиации и нагревание верхнего слоя [17].

Интерактивная система GIOVANNY

Данная система создана для визуализации и анализа данных, полученных разными приборами со спутников в оптическом диапазоне. В том числе, она позволяет получить данные многоспектральных сканирующих систем SeaWiFS и Terra, Aqua/MODIS с пространственным разрешением 4 и 9 км. Такие данные получены благодаря преобразованию результатов ежесуточной съемки поверхности Земли в файлы со среднемесячными значениями для каждого квадрата 4x4/9x9 км в океане.

Так как система Giovanni использует данные со спутниковых спектрорадиометров MODIS, то в дальнейшей работе надо учитывать алгоритмы, которые применяются для оценки концентрации хлорофилла «а».

Для оценки концентрации хлорофилла «а» применяют стандартные алгоритмы, которые изначально были созданы для вод 1 типа по оптическим свойствам (открытые океанические). В таких водах единственным активным компонентом является хлорофилл «а», а все остальные параметры не учитываются. Но Балтийское море относят ко 2 типу вод (мутные прибрежные, высокопродуктивные, внутренние воды), в котором кроме хлорофилла «а» есть и другие параметры (высокое содержание взвешенного неорганического и растворенного органического вещества) которые сильно влияют на спектральную яркость излучения во всем видимом диапазоне спектра (от синей до красной области) [21; 22].

Из-за этого, стандартные алгоритмы в Балтийском море показывают сильно завышенные значения по сравнению с данными, которые были взяты судовыми и лабораторными методами [23].

3. «ЦВЕТЕНИЕ» ВОД БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА MODIS И СЕРВИСА МОРСКОЙ СЛУЖБЫ COPERNICUS

3.1 Статистический анализ

3.1.1 Анализ первичных статистик

Прежде всего, с помощью пакета анализа Excel были рассчитаны первичные статистики для рядов температуры поверхности моря, концентрации фитопланктона, хлорофилла «а», нитратов и фосфатов (Табл. 3.1).

Таблица 3.1. Первичные статистики для рядов температуры в Ботническом, Финском и Рижском заливах

	Температура воды, °C		
	Ботнический	Финский	Рижский
Среднее, °C	5.536	7.536	8.452
Стандартная ошибка, °C	0.310	0.372	0.375
Медиана, °C	3.948	6.397	7.075
Стандартное отклонение, °C	5.484	6.577	6.629
Дисперсия выборки, °C ²	30.073	43.260	43.938
Эксцесс	-0.976	-1.293	-1.336
Асимметричность	0.647	0.377	0.321
Интервал, °C	17.732	20.481	21.153
Минимум, °C	-0.152	-0.234	-0.248
Максимум, °C	17.580	20.247	20.905

Видно, что температура в Финском и Рижском заливах похожа по своему характеру (медиана равна 6.6°C, интервал – 20.5 и 21.2°C). В Ботническом заливе вода ожидаемо холоднее (медиана равна 3.9°C, интервал 17.7°C).

Таблица 3.2. Первичные статистики для рядов концентрации фитопланктона в Ботническом, Финском и Рижском заливах

	Фитопланктон, ммоль/м ³		
	Ботнический	Финский	Рижский
Среднее, ммоль/м ³	1.648	3.791	2.374
Стандартная ошибка, ммоль/м ³	0.060	0.114	0.073
Медиана, ммоль/м ³	1.258	3.259	1.914
Стандартное отклонение, ммоль/м ³	1.061	2.010	1.281
Дисперсия выборки, (ммоль/м ³) ²	1.126	4.040	1.642
Эксцесс	4.929	2.004	1.738
Асимметричность	2.171	1.170	1.608
Интервал, ммоль/м ³	6.191	12.328	5.966
Минимум, ммоль/м ³	0.320	0.422	1.160
Максимум, ммоль/м ³	6.511	12.750	7.126

По концентрации фитопланктона лидирует Финский залив (медиана равна 3.3 ммоль/м³), где максимальные значения достигают 12.8 ммоль/м³. В двух остальных заливах максимальные значения достигают 6.5-7.1 ммоль/м³.

Таблица 3.3. Первичные статистики для рядов содержания хлорофилла «а» в Ботническом, Финском и Рижском заливах

	Хлорофилл А, мг/м ³		
	Ботнический	Финский	Рижский
Среднее, мг/м ³	0.178	3.014	3.740
Стандартная ошибка, мг/м ³	0.010	0.209	0.298
Медиана, мг/м ³	0.103	1.438	0.807
Стандартное отклонение, мг/м ³	0.178	3.692	5.261
Дисперсия выборки, (мг/м ³) ²	0.032	13.628	27.676
Эксцесс	0.369	1.613	1.159
Асимметричность	1.148	1.478	1.512
Интервал, мг/м ³	0.735	16.928	21.381
Минимум, мг/м ³	0.010	0.022	0.031
Максимум, мг/м ³	0.745	16.950	21.412

Сразу заметно низкое содержание хлорофилла «а» в Ботническом заливе, где медиана равна 0.1 мг/м³ при интервале 0.735 мг/м³. В Финском и Рижском заливах интервал составляет 16.9 мг/м³ и 21.4 мг/м³ соответственно, однако медианы при этом не сильно превышают медианы Ботнического залива.

Таблица 3.4. Первичные статистики для рядов концентрации нитратов в Ботническом, Финском и Рижском заливах

	Нитраты, ммоль/м ³		
	Ботнический	Финский	Рижский
Среднее, ммоль/м ³	7.116	6.074	55.605
Стандартная ошибка, ммоль/м ³	0.036	0.282	0.645
Медиана, ммоль/м ³	7.117	6.286	56.596
Стандартное отклонение, ммоль/м ³	0.637	4.982	11.398
Дисперсия выборки, (ммоль/м ³) ²	0.406	24.818	129.906
Эксцесс	2.885	-1.088	-0.518
Асимметричность	0.640	0.298	-0.305
Интервал, ммоль/м ³	4.846	18.942	50.844
Минимум, ммоль/м ³	4.961	0.002	28.098
Максимум, ммоль/м ³	9.807	18.943	78.941

Сразу заметна колоссальная концентрация нитратов в Рижском заливе, где медиана составляет 56.6 ммоль/м³ и максимум 78.9 ммоль/м³, при этом в Ботническом и Финском заливах медианы равны 7.1 ммоль/м³ и 6.3 ммоль/м³ соответственно.

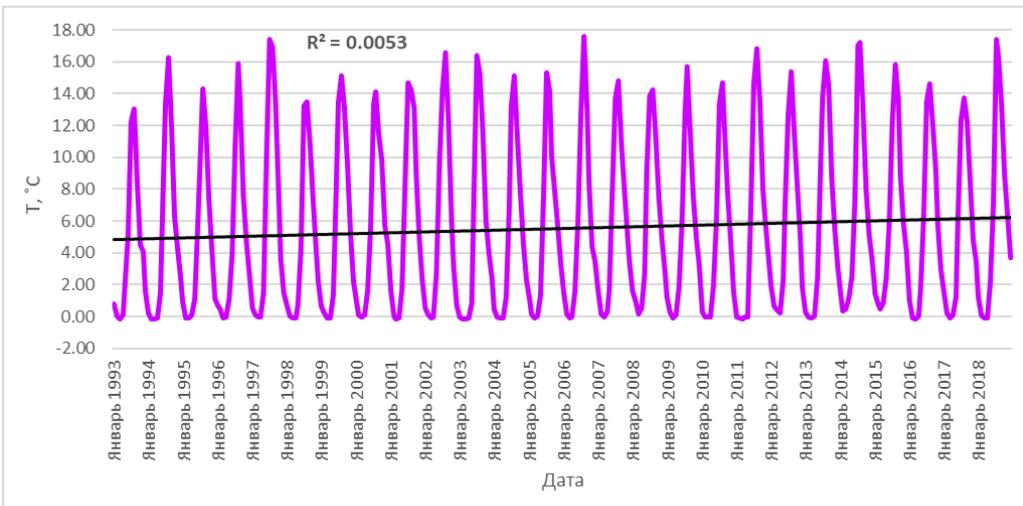
Таблица 3.5. Первичные статистики для рядов концентрации фосфатов в Ботническом, Финском и Рижском заливах

	Фосфаты, ммоль/м ³		
	Ботнический	Финский	Рижский
Среднее, ммоль/м ³	0.030	0.819	0.741
Стандартная ошибка, ммоль/м ³	0.001	0.024	0.030
Медиана, ммоль/м ³	0.032	0.830	0.893
Стандартное отклонение, ммоль/м ³	0.019	0.417	0.529
Дисперсия выборки, (ммоль/м ³) ²	0.000	0.174	0.280
Эксцесс	-1.244	-0.706	-1.562
Асимметричность	-0.086	0.119	-0.165
Интервал, ммоль/м ³	0.070	1.808	1.619
Минимум, ммоль/м ³	0.000	0.002	0.002
Максимум, ммоль/м ³	0.070	1.809	1.621

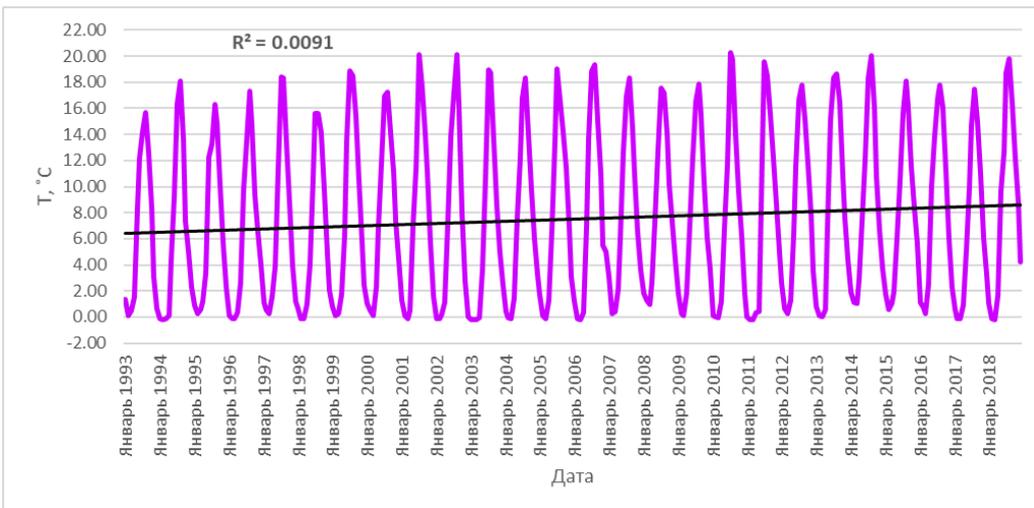
А вот в концентрации фосфатов все вполне однородно. Бросаются в глаза концентрации, близкие к 0 в Ботническом заливе. Значения в двух других заливах имеют медианы около 0.8 ммоль/м³.

3.1.2 Анализ трендов временных рядов

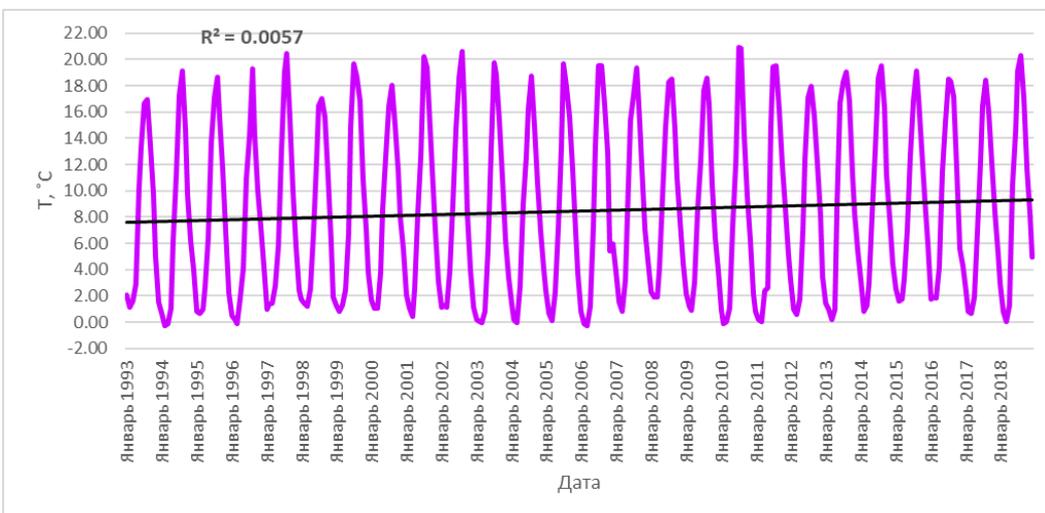
Так как данный анализ проводился для исследования именно климатической изменчивости биохимических характеристик, то следует начать с анализа трендов рядов температуры поверхности моря (Рис 3.1).



а) Ботнический залив



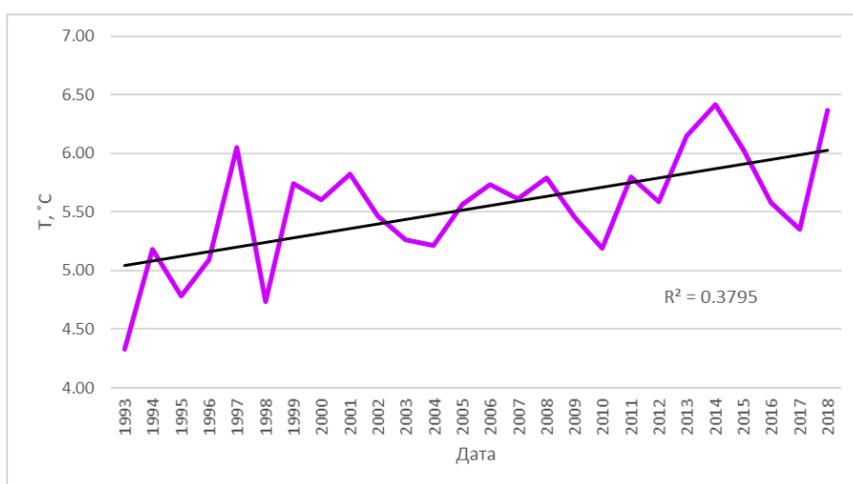
б) Финский залив



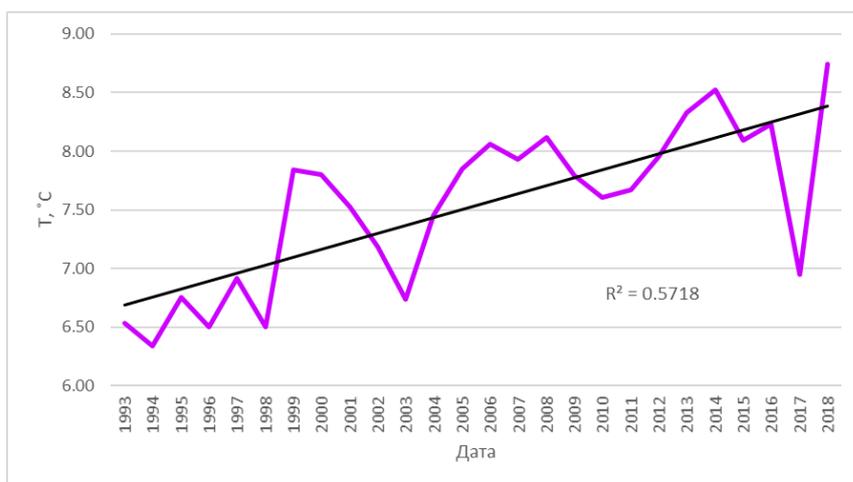
в) Рижский залив

Рисунок 3.1. Временной ход среднемесячных значений температуры поверхности моря в Ботническом, Финском и Рижском заливах с нанесенным трендом и коэффициентом детерминации R^2

Проверка корреляционного отношения на значимость проводилась путем сравнения t^* с $t_{кр}$. Так, все три тренда оказались незначимы, при этом они все являются положительными. Таким образом, следует проверить временной ход и тренды среднегодовых значений температуры (Рис. 3.2).



а) Ботнический залив



б) Финский залив

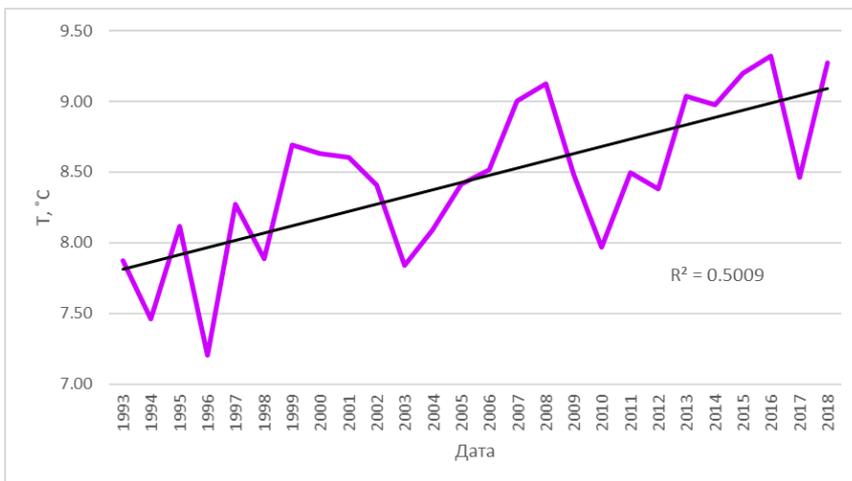
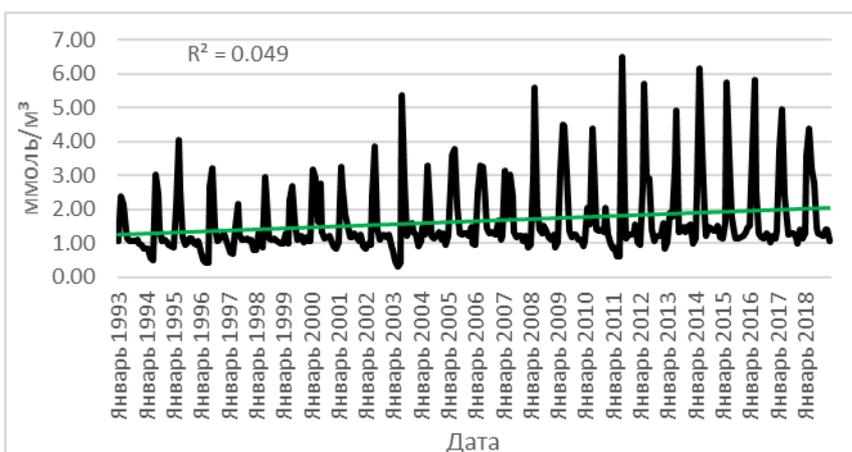


Рисунок 3.2. Временной ход среднегодовых значений температуры поверхности моря в Ботническом, Финском и Рижском заливах с нанесенным трендом и коэффициентом детерминации R^2

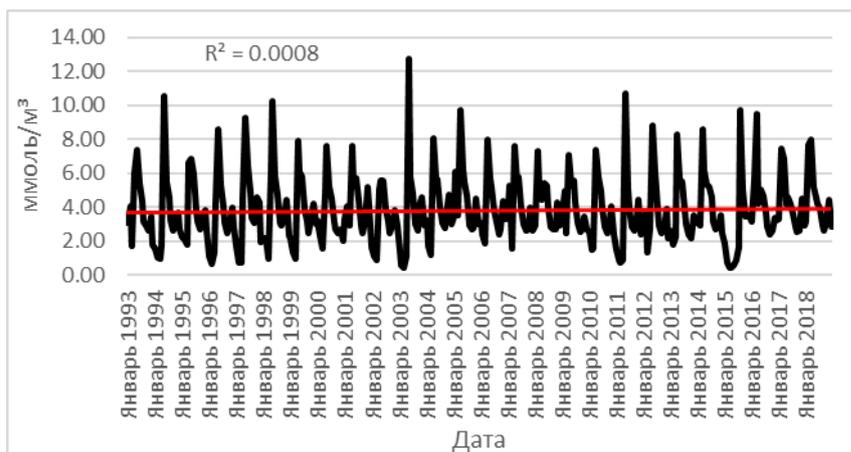
Здесь уже хорошо видны положительные тренды, которые после проверки все оказались значимые. Значит, мы с уверенностью можем сказать, что увеличение температуры поверхности Балтийского моря действительно имеет место быть как минимум за период с 1993 по 2018 гг.

Но при анализе других характеристик мы все равно будем использовать среднемесячные значения, так как количества среднегодовых значений недостаточно для качественного анализа.

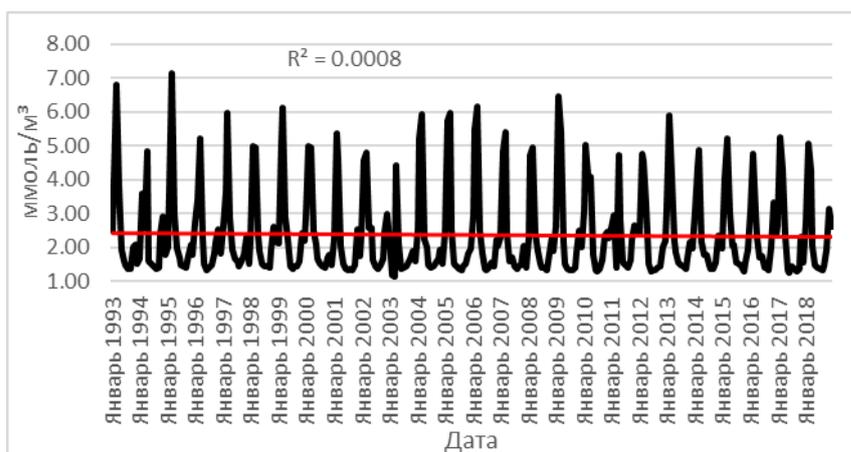
Проверим временной ход биохимических параметров на наличие значимых трендов (Рис. 3.3-3.6). Проверка корреляционного отношения на значимость проводилась также путем сравнения t^* с $t_{кр}$.



а) Ботнический залив



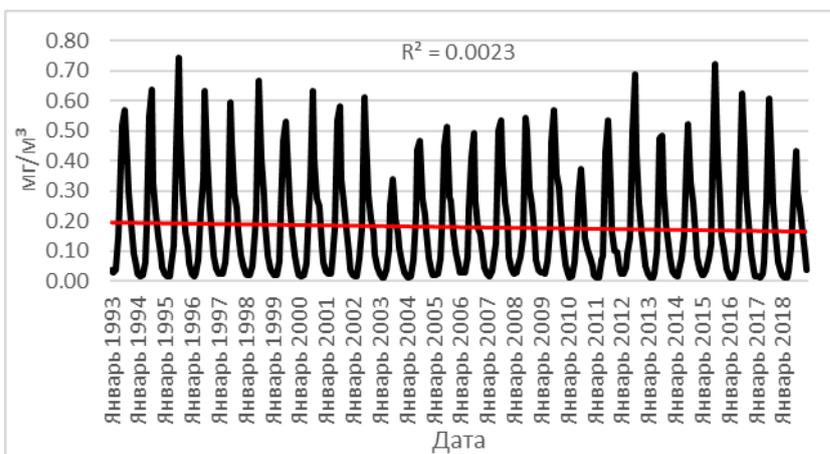
б) Финский залив



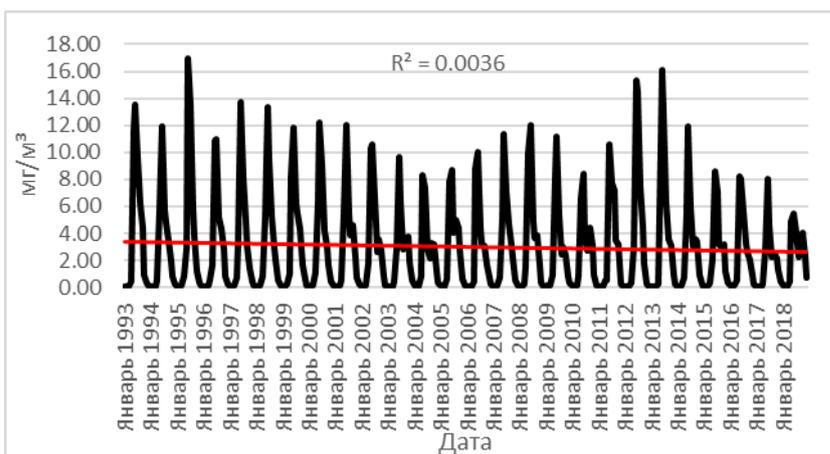
в) Рижский залив

Рисунок 3.3. Временной ход среднемесячных значений концентрации фитопланктона с нанесенным трендом (зеленый — значимый, красный — незначимый) и коэффициентом детерминации R^2

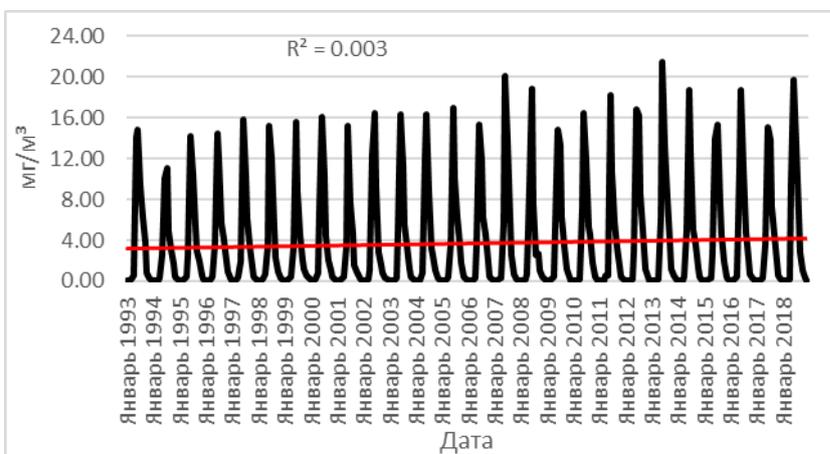
Единственный значимый тренд выявлен в Ботническом заливе, по графику видно, что тренд имеет малую величину.



а) Ботнический залив



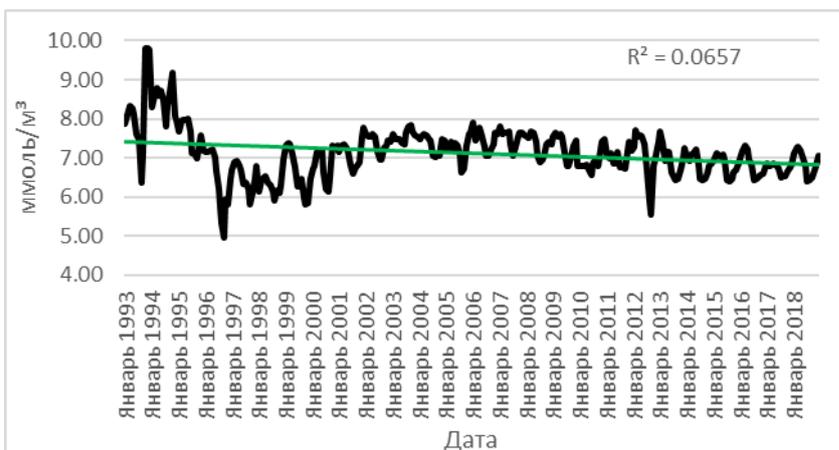
б) Финский залив



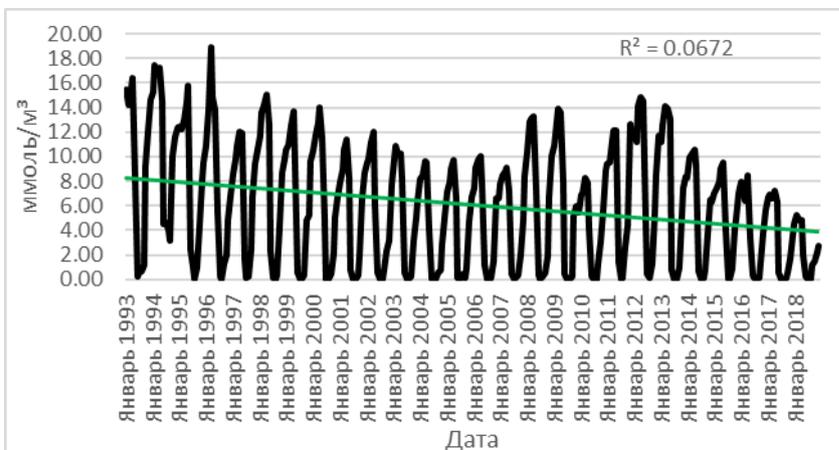
в) Рижский залив

Рисунок 3.4. Временной ход среднемесячных значений содержания хлорофилла «а» с нанесенным трендом (зеленый – значимый, красный – незначимый) и коэффициентом детерминации R^2

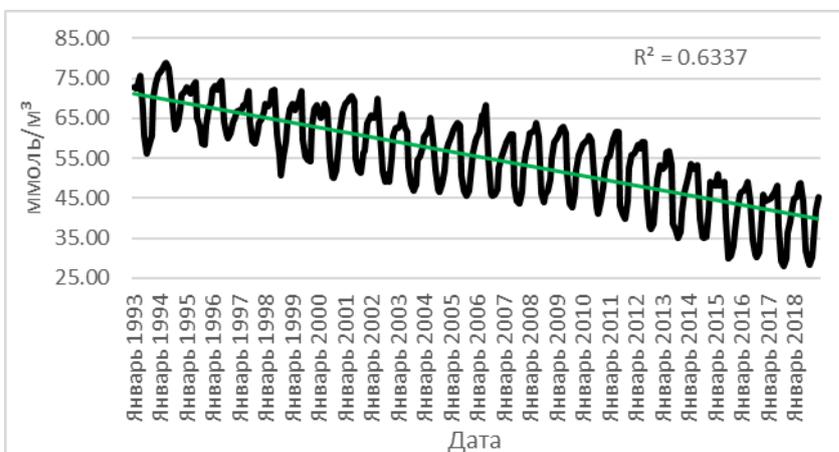
Во временных рядах содержания хлорофилла «а» не выявлено значимых трендов ни в одном из заливов.



а) Ботнический залив



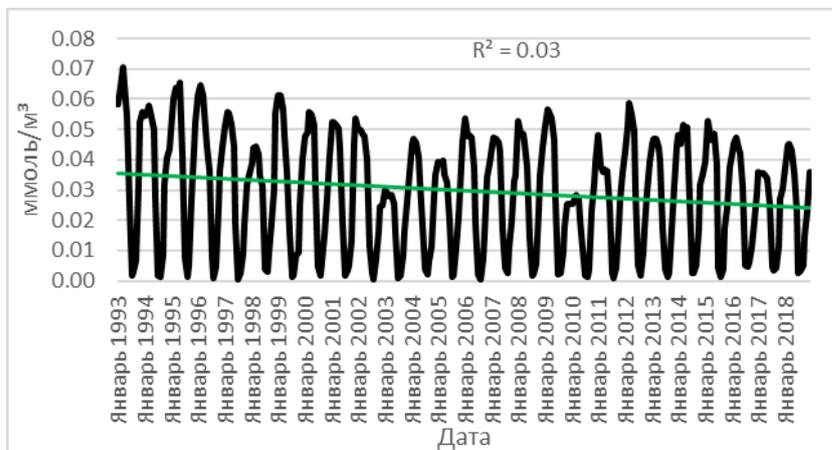
б) Финский залив



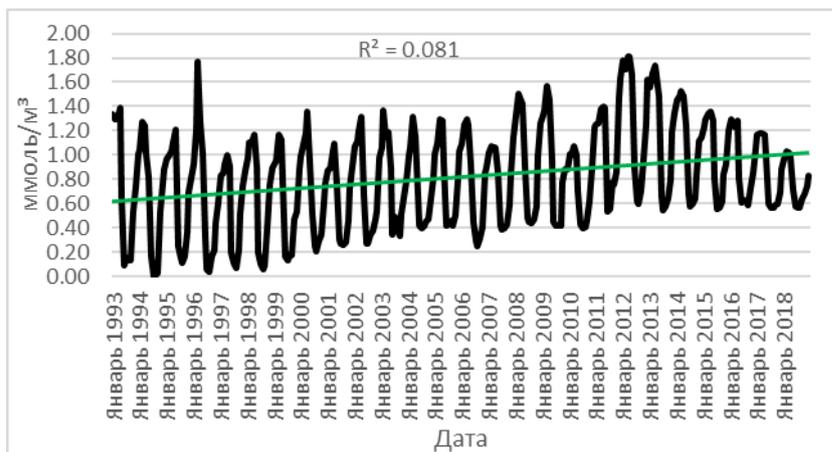
в) Рижский залив

Рисунок 3.5. Временной ход среднемесячных значений концентрации нитратов с нанесенным трендом (зеленый – значимый, красный – незначимый) и коэффициентом детерминации R^2

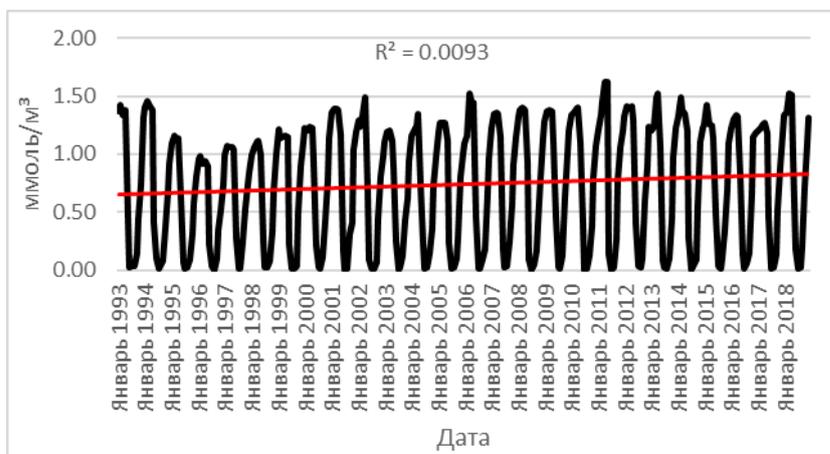
Мы видим наличие значимого отрицательного тренда во всех трех заливах, из которых наибольшую величину и R^2 имеет тренд концентрации в Рижском заливе.



а) Ботнический залив



б) Финский залив



в) Рижский залив

Рисунок 3.6. Временной ход среднемесячных значений концентрации фосфатов с нанесенным трендом (зеленый – значимый, красный – незначимый) и коэффициентом детерминации R^2

Самым интересным оказался ход концентрации фосфатов. Наблюдается значимый отрицательный тренд в Ботническом заливе, значимый положительный тренд в Финском заливе и незначимый тренд в Рижском заливе.

3.1.3 Корреляционный анализ

Далее необходимо провести корреляционный анализ, для этого были построены матрицы корреляционного отношения температуры и биохимических параметров (Табл. 3.6), а также графики облаков рассеяния значений биохимических характеристик при соответствующей температуре (Рис. 3.7 – 3.10).

Таблица 3.6. Корреляционная матрица температуры и биохимических параметров для Ботнического, Финского и Рижского заливов (Т – температура поверхности моря, Р – концентрация фитопланктона, C_{ch} – содержание хлорофилла «а», C_N – концентрация нитратов, C_P – концентрация фосфатов)

Ботнич	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>Cch</i>	<i>Cn</i>	<i>Cp</i>	<i>t_{кр}</i>
<i>T</i>	1					1.97
<i>P</i>	-0.34	1				
<i>Cch</i>	0.77	-0.21	1			значим
<i>Cn</i>	-0.42	0.10	-0.31	1		незначим
<i>Cp</i>	-0.91	0.29	-0.72	0.49	1	

а) Ботнический залив

Финский	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>Cch</i>	<i>Cn</i>	<i>Cp</i>	<i>t_{кр}</i>
<i>T</i>	1					1.97
<i>P</i>	0.03	1				
<i>Cch</i>	0.62	0.31	1			значим
<i>Cn</i>	-0.86	0.01	-0.56	1		незначим
<i>Cp</i>	-0.80	-0.02	-0.59	0.82	1	

б) Финский залив

Рижский	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>Cch</i>	<i>Cn</i>	<i>Cp</i>	<i>t_{кр}</i>
<i>T</i>	1					1.97
<i>P</i>	-0.68	1				
<i>Cch</i>	0.65	-0.45	1			значим
<i>Cn</i>	-0.60	0.36	-0.38	1		незначим
<i>Cp</i>	-0.94	0.64	-0.65	0.49	1	

в) Рижский залив

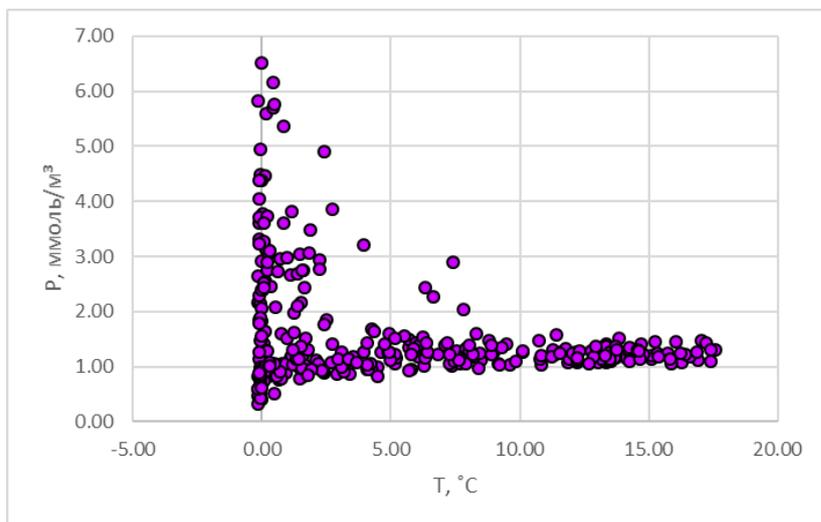
Проверка корреляционного отношения проводилась по критерию Стьюдента путем расчета выборочного значения t^* и сравнения его с $t_{кр}$

Стоит заметить внушительное количество значимых коэффициентов корреляции, например, в матрице для Рижского залива незначимых коэффициентов вовсе нет. Так как мы анализируем климатическую изменчивость, следует обратить внимание на корреляцию биохимических параметров с температурой. Лучше всего коррелирует с температурой концентрация фосфатов ($R=-0.94$ в Рижском заливе), причем наблюдается обратная связь, то есть при повышении температуры следует убывание концентрации фосфатов.

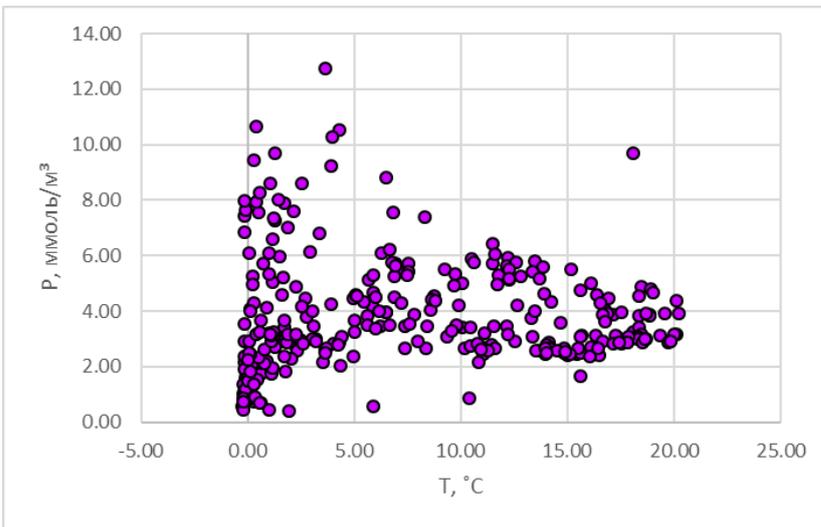
Примерно такая же картина прослеживается и с концентрацией нитратов. Здесь не такие высокие коэффициенты корреляции, но они значимые и также отрицательные.

Содержание хлорофилла «а» достаточно хорошо коррелирует с температурой, имея при этом прямую связь, то есть при повышении температуры наблюдается и рост содержания хлорофилла «а». Во всех трех заливах коэффициенты значимые.

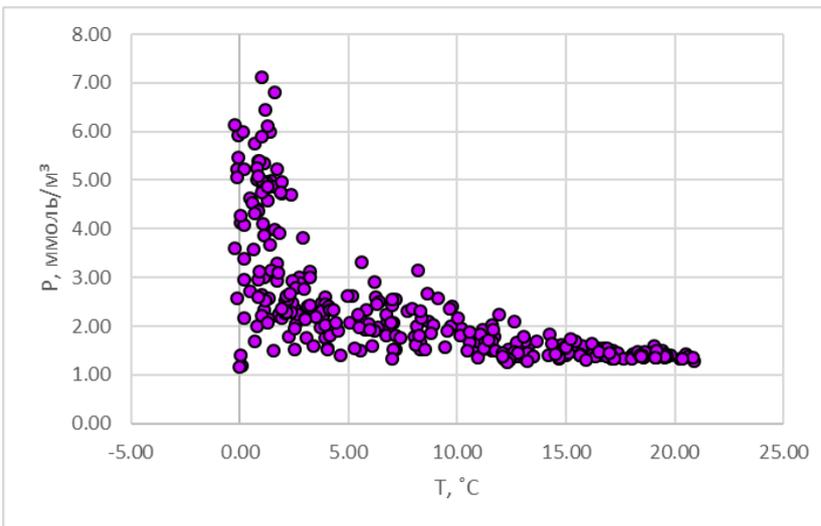
Концентрация фитопланктона имеет значимый коэффициент корреляции с температурой в Финском и Рижском заливах с обратной связью. В Ботническом заливе коэффициент незначимый. Можно предположить, что воды Финского и Рижского заливов слишком теплые для определенных видов фитопланктона, и с понижением температуры наблюдается рост концентрации.



а) Ботнический залив



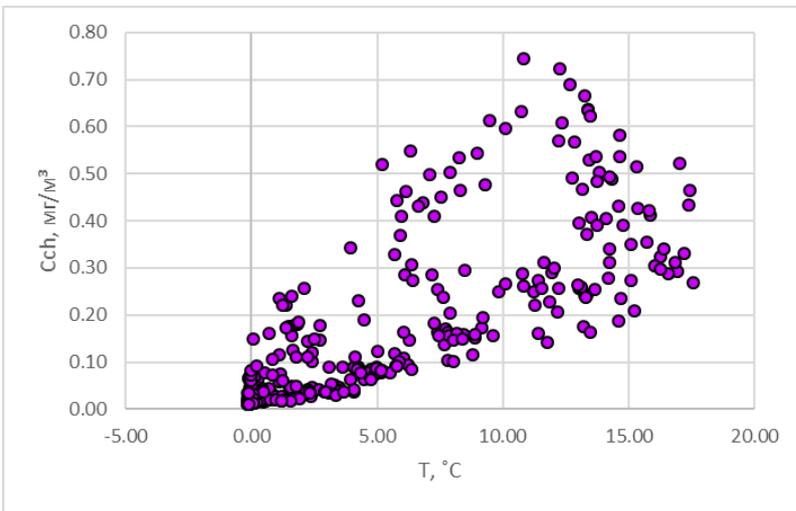
б) Финский залив



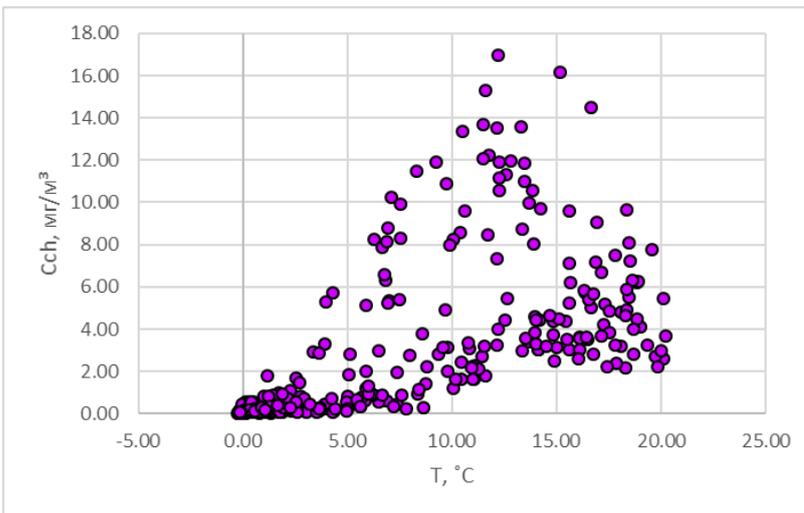
в) Рижский залив

Рисунок 3.7. График связи среднемесячных значений температуры поверхности моря и концентрации фитопланктона

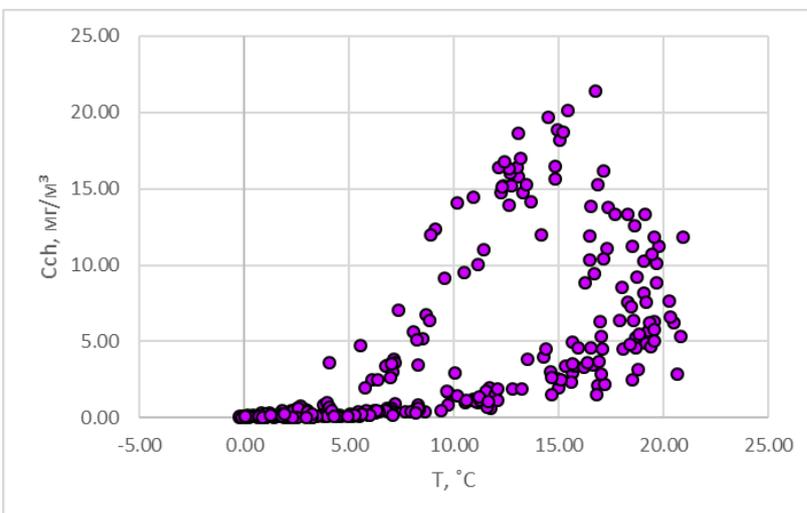
Мы можем наблюдать, что эллипсы рассеяния выражены слабо. Самый высокий коэффициент корреляции в Рижском заливе, но по графику трудно утверждать, что между температурой и концентрацией фитопланктона есть связь.



а) Ботнический залив



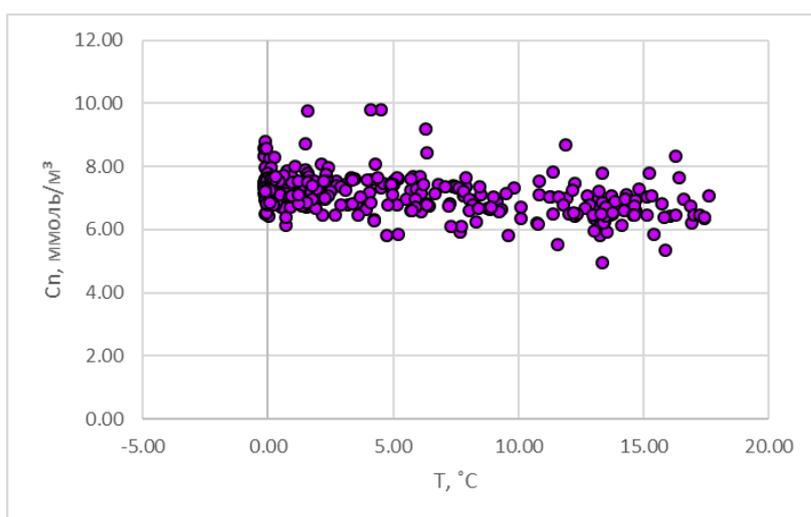
б) Финский залив



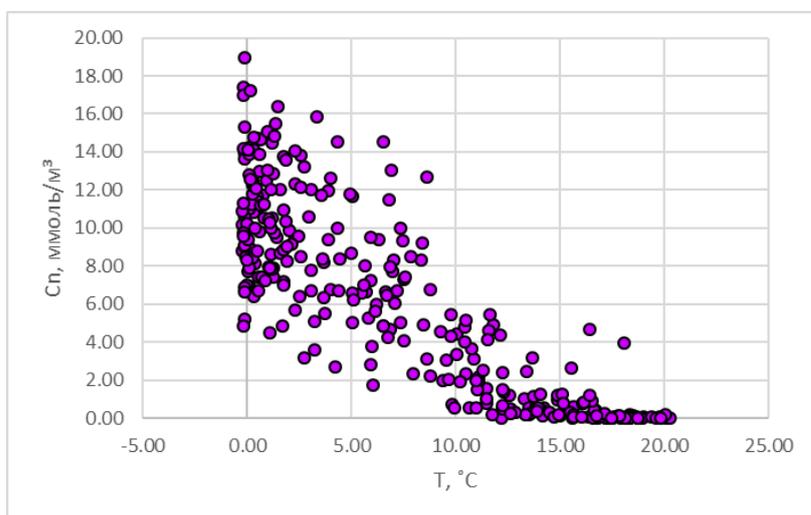
в) Рижский залив

Рисунок 3.8. График связи среднемесячных значений температуры поверхности моря и содержания хлорофилла «а»

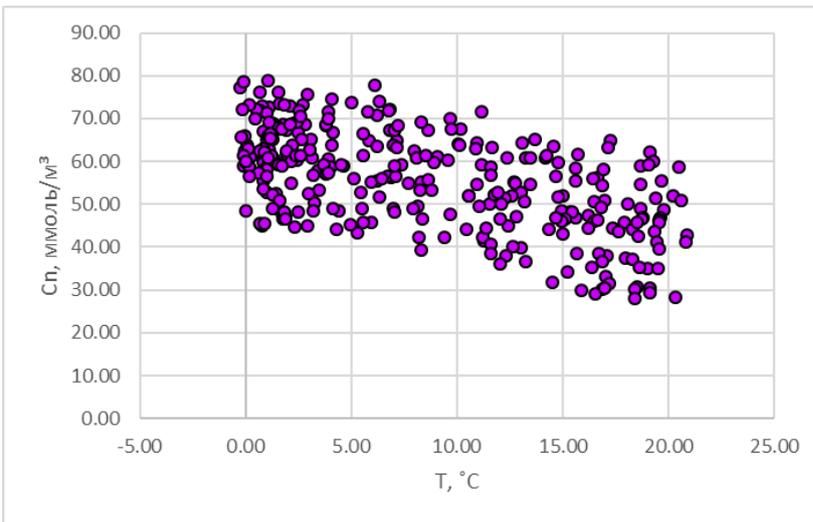
Может показаться, что на графиках присутствуют достаточно ярко выраженные эллипсы, особенно в Ботническом заливе, но если учесть, что основное скопление точек происходит при значениях близких к 0, что обусловлено низкой температурой, а не связью с ней, то оставшееся скопление больше похоже на окружность, значит можем сделать вывод, что и здесь связи, как таковой, нет.



а) Ботнический залив



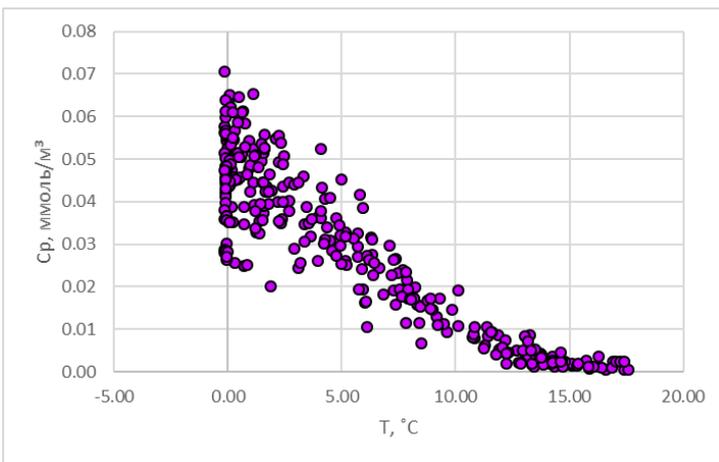
б) Финский залив



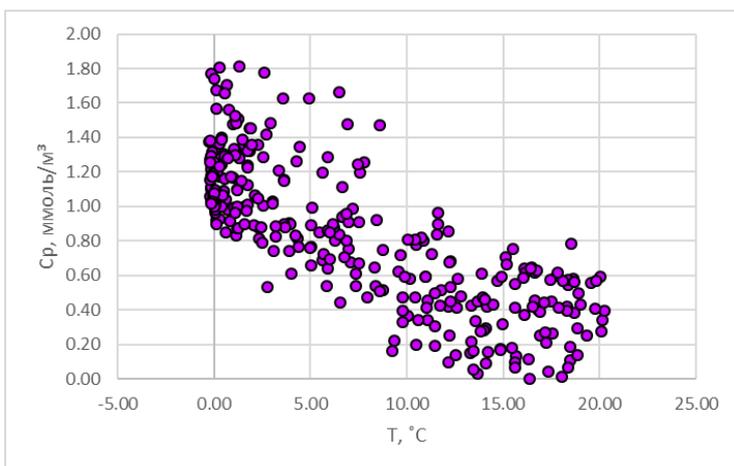
в) Рижский залив

Рисунок 3.9. График связи среднемесячных значений температуры поверхности моря и концентрации нитратов

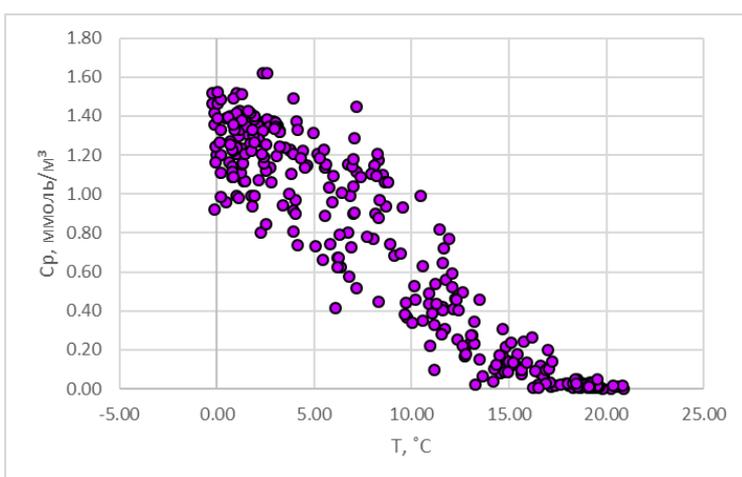
Здесь мы видим, что эллипсы ярко выражены, но их большая ось практически параллельна оси X, а значит мы не можем утверждать о связи температуры и концентрации нитратов.



а) Ботнический залив



б) Финский залив



в) Рижский залив

Рисунок 3.10. График связи среднемесячных значений температуры поверхности моря и концентрации фосфатов

Графики связи концентрации фосфатов и температуры представляют собой ярко выраженные эллипсы. На этот раз можно сказать, что температура и концентрация фосфатов могут иметь обратную связь.

Таким образом, удалось отследить связь температуры только с концентрацией фосфатов, а значит для анализа климатической изменчивости биохимических параметров Балтийского моря необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как освещенность, осадки, ледовую обстановку и др.

3.2 Временной ход температуры и хлорофилла «а» за 2002-2022 годы

Для начала, построим в сервисе Giovanni графики временного хода температуры и хлорофилла «а» за весь период (Рис. 3.11-3.12).

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-07-04 00:55:01Z - 2022-Feb, Region 9E, 53N, 30E, 66N

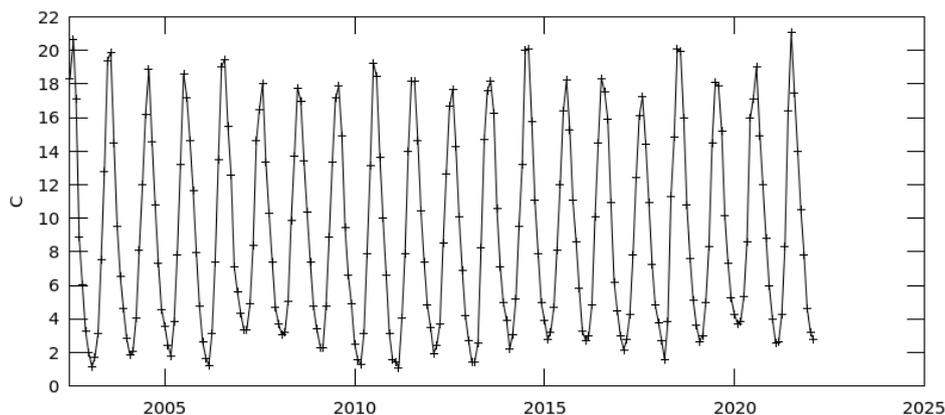


Рисунок 3.11. Временной ход температуры поверхности Балтийского моря за период 2002-2022 гг

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2002-07-04 00:40:05Z - 2022-Feb, Region 9E, 53N, 30E, 66N

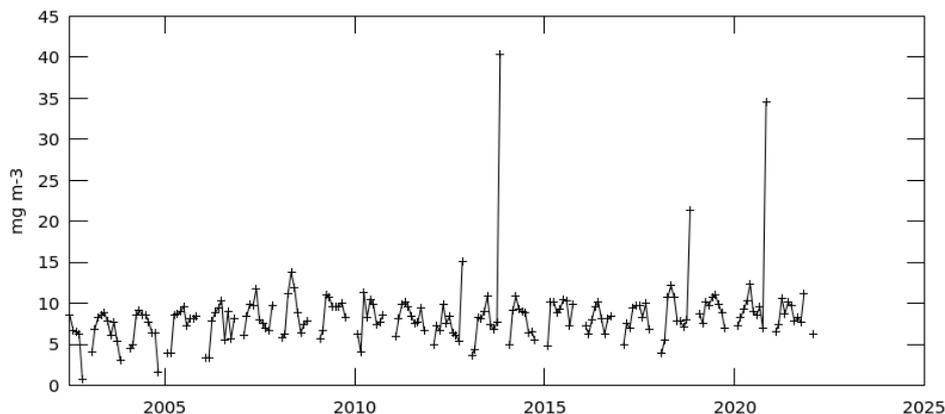


Рисунок 3.12. Временной ход концентрации хлорофилла «а» в Балтийском море за период 2002-2022 гг

На графике временного хода концентрации хлорофилла «а» можно выделить 3 года, где значения концентрации превышают остальные (2013 г, 2018 г, 2020 г).

Рассмотрим каждый год отдельно и сравним их с ближайшим годом, где концентрация хлорофилла «а» была «нормальной» (Рис.3.13-3.22).

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2013-01-01 00:10:01Z - 2014-01-01 02:44Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

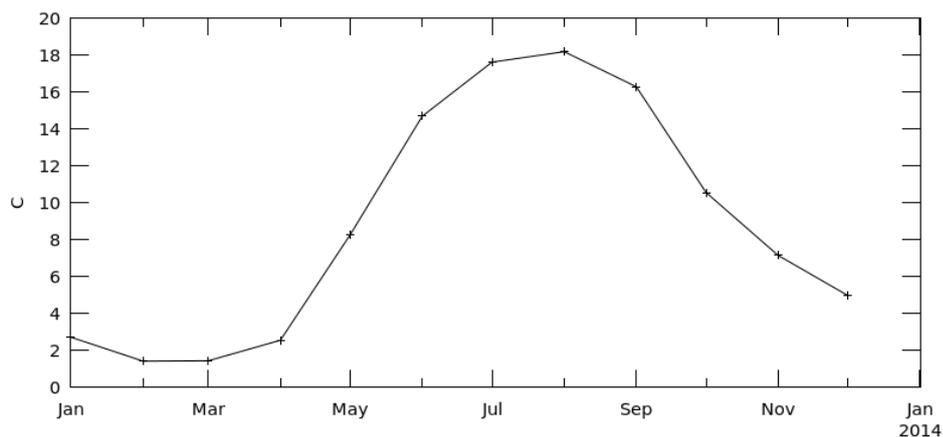


Рисунок 3.13. Временной ход ТПМ за 2013 год

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2013-01-01 00:10:01Z - 2014-01-01 02:44Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

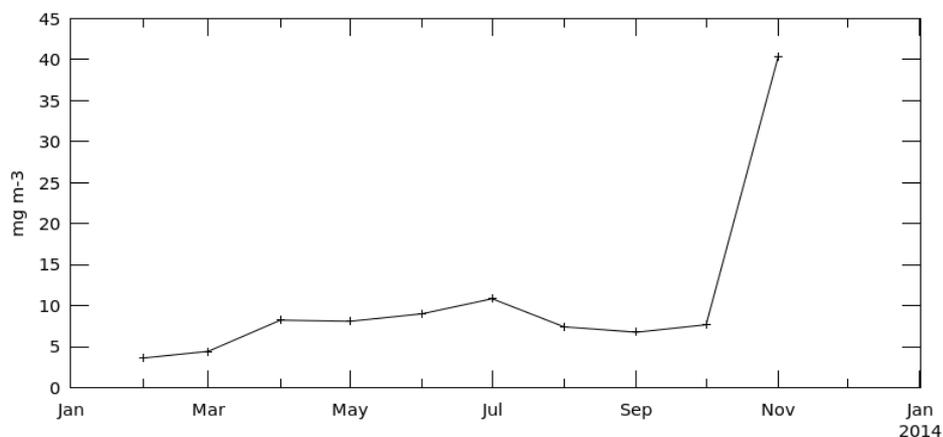


Рисунок 3.14. Временной ход концентрации хлорофилла «а» за 2013 год

На этом графике мы видим два пика цветения: летнее (в июле - 11 мг/м³) и осеннее (в ноябре - 40 мг/м³).

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2014-01-01 00:45:01Z - 2015-01-01 02:20:00Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

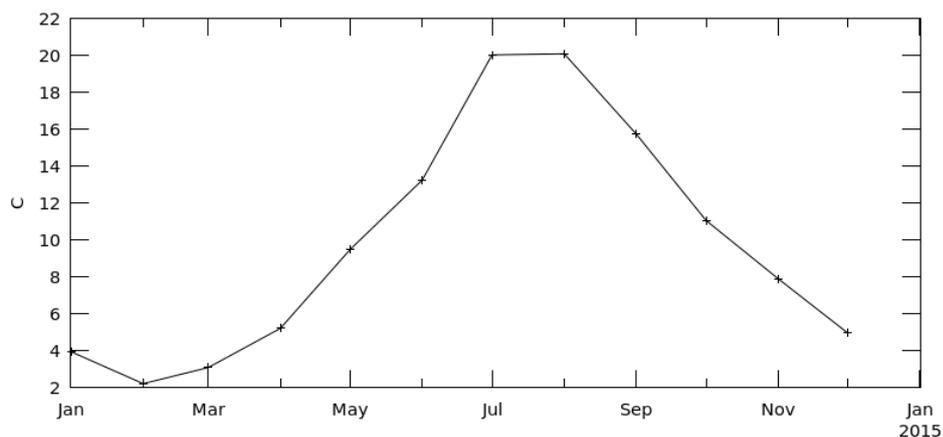


Рисунок 3.15. Временной ход ТПМ за 2014 год

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2014-01-01 00:45:01Z - 2015-01-01 02:20:00Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

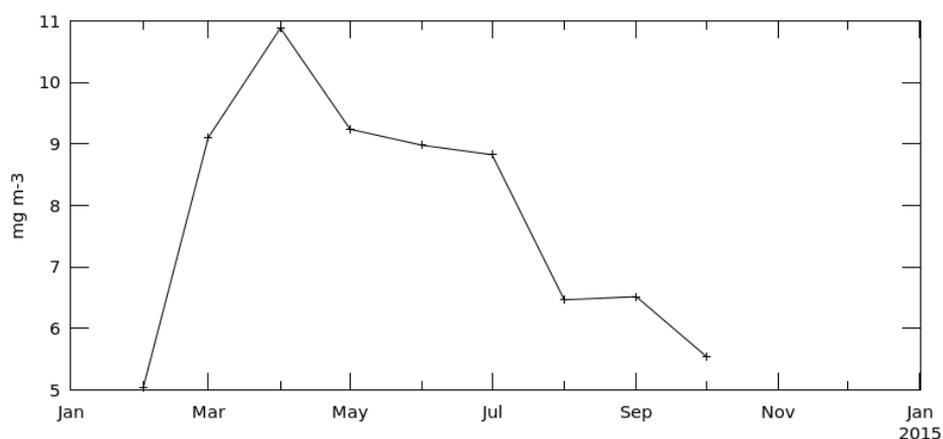


Рисунок 3.16. Временной ход концентрации хлорофилла «а» за 2014 год

Здесь можно наблюдать только один пик цветения осенью (в апреле - 11 мг/м³).

По графикам температуры поверхности моря видно, что в обоих случаях минимум приходится на февраль-март, а максимум – на июль-август.

При сравнении концентрации хлорофилла «а» 2013 и 2014 годов, на рисунке 3.14 видно, что в 2013 году значение концентрации хлорофилла «а», который значительно больше (40 мг/м³), приходится на ноябрь. Это аномальная ситуация, которую можно отнести к осеннему цветению, при котором доминируют диатомовые водоросли. Но нельзя забывать о том, что

из-за стандартного алгоритма MODIS, могут наблюдаться сильные завышения значений (см. Глава 2). Без сравнения спутниковых данных с судовыми и лабораторными наблюдениями можно лишь предположить, что повышение значений концентрации хлорофилла «а» в ноябре 2013 года по сравнению с 2014 годом является следствием перемешивания (в результате сильных ветров) и обильного речного стока, с которым приходят биогенные вещества.

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2018-01-01 00:00:01Z - 2019-01-01 02:34Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

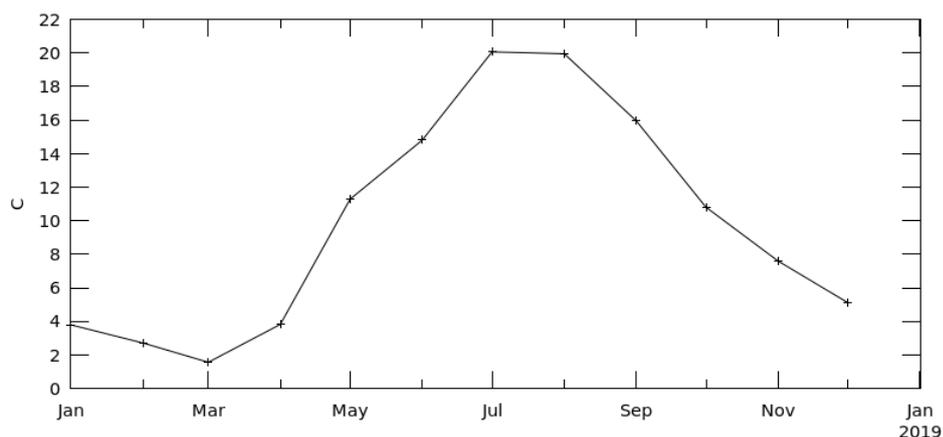


Рисунок 3.17. Временной ход ТПМ за 2018 год

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2018-01-01 00:00:01Z - 2019-01-01 02:34Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

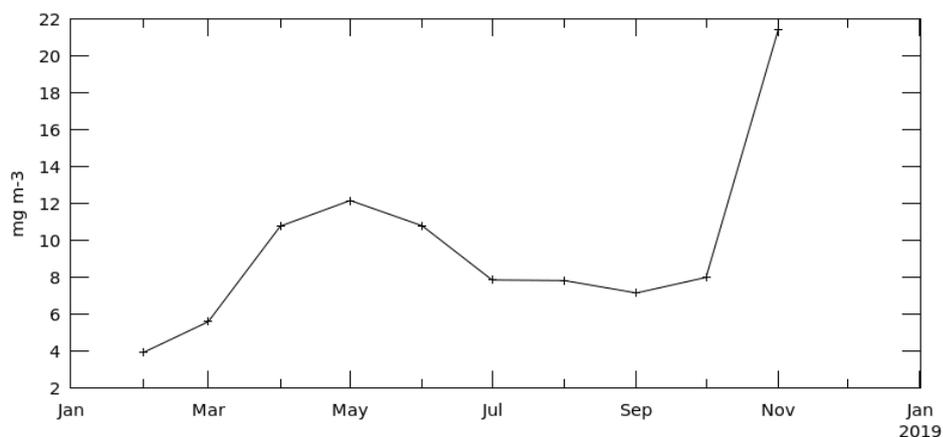


Рисунок 3.18. Временной ход концентрации хлорофилла «а» за 2018 год

На рисунке 3.18 можно выделить 2 пика цветения: весенний (май - 12 мг/м³) и осенний (ноябрь – 21 мг/м³).

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2019-01-01 00:30Z - 2020-01-01 02:10:00Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

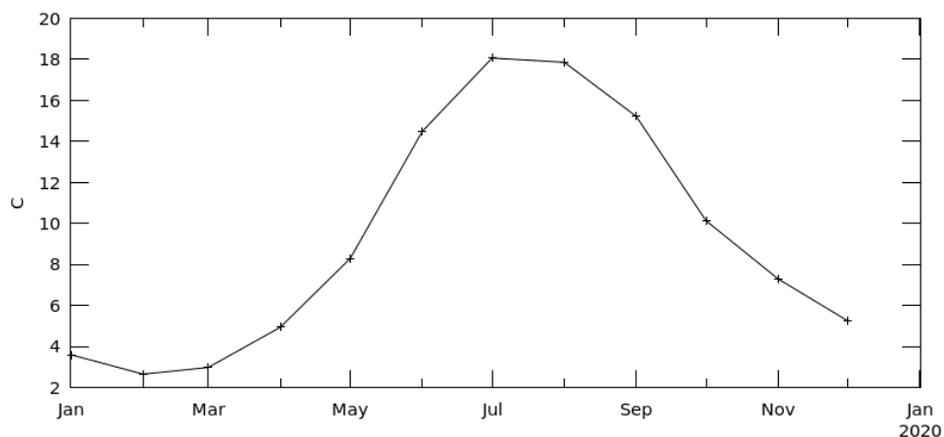


Рисунок 3.19. Временной ход ТПМ за 2019 год

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2019-01-01 00:30Z - 2020-01-01 02:10:00Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

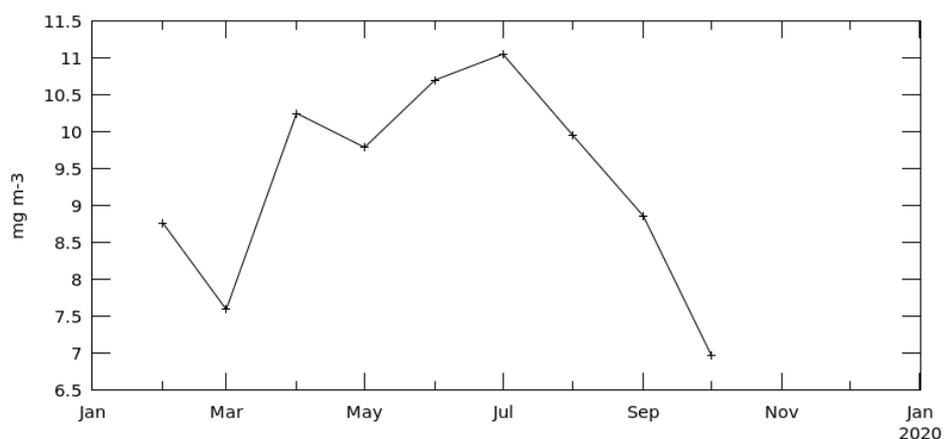


Рисунок 3.20. Временной ход концентрации хлорофилла «а» за 2019 год

В 2019 году также выделяются 2 пика: осенью (апрель – $10,3 \text{ мг/м}^3$) и летом (июль – 11 мг/м^3).

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2020-Jan - 2021-01-01 02:19Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

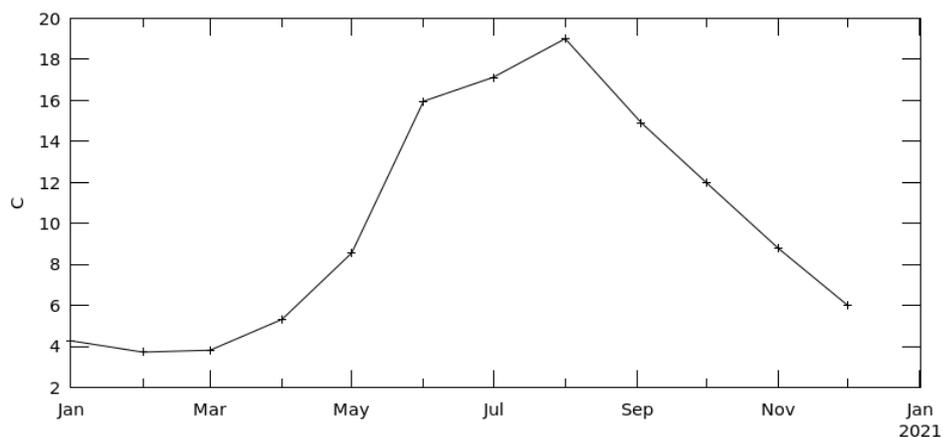


Рисунок 3.21. Временной ход ТПМ за 2020 год

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2020-Jan - 2021-01-01 02:19Z, Region 9E, 53N, 30E, 66N

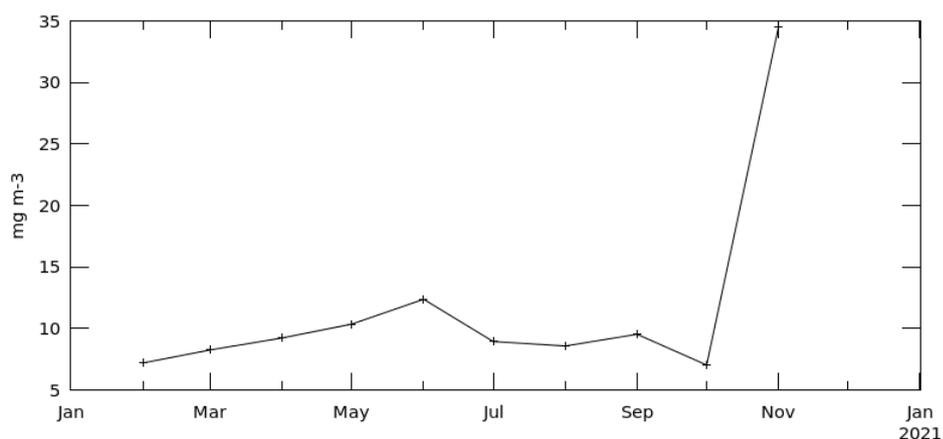


Рисунок 3.22. Временной ход концентрации хлорофилла «а» за 2020 год

В 2020 году мы видим 3 пика: летом (июнь – 13 мг/м^3) и осенью (сентябрь – 9 мг/м^3 и ноябрь – 35 мг/м^3).

В графиках временного хода температуры поверхности моря за 2018-2020 года мы видим, что максимум приходится на июль-август, а минимум – на февраль-март.

Также в 2018 году и 2020 году мы наблюдаем схожую ситуацию с 2013 годом: аномальные повышения значений концентрации хлорофилла «а» в ноябре. Здесь также это можно объяснить тем, что из-за стандартного алгоритма MODIS, могут наблюдаться сильные завышения значений (см.

Глава 2). Без сравнения спутниковых данных с судовыми и лабораторными наблюдениями можно лишь предположить, что повышение значений концентрации хлорофилла «а» в ноябре 2018 и 2020 годов по сравнению с 2019 годом является следствием перемешивания (в результате сильных ветров) и обильного речного стока, с которым приходят биогенные вещества.

3.3 Анализ пространственного распределения полей температуры поверхности Балтийского моря и хлорофилла «а»

В сервисе Giovanni построили среднемесячные пространственные карты распределения температуры поверхности Балтийского моря и хлорофилла «а» с апреля по октябрь за 2020 и 2021 года (Рис.3.23-3.50).

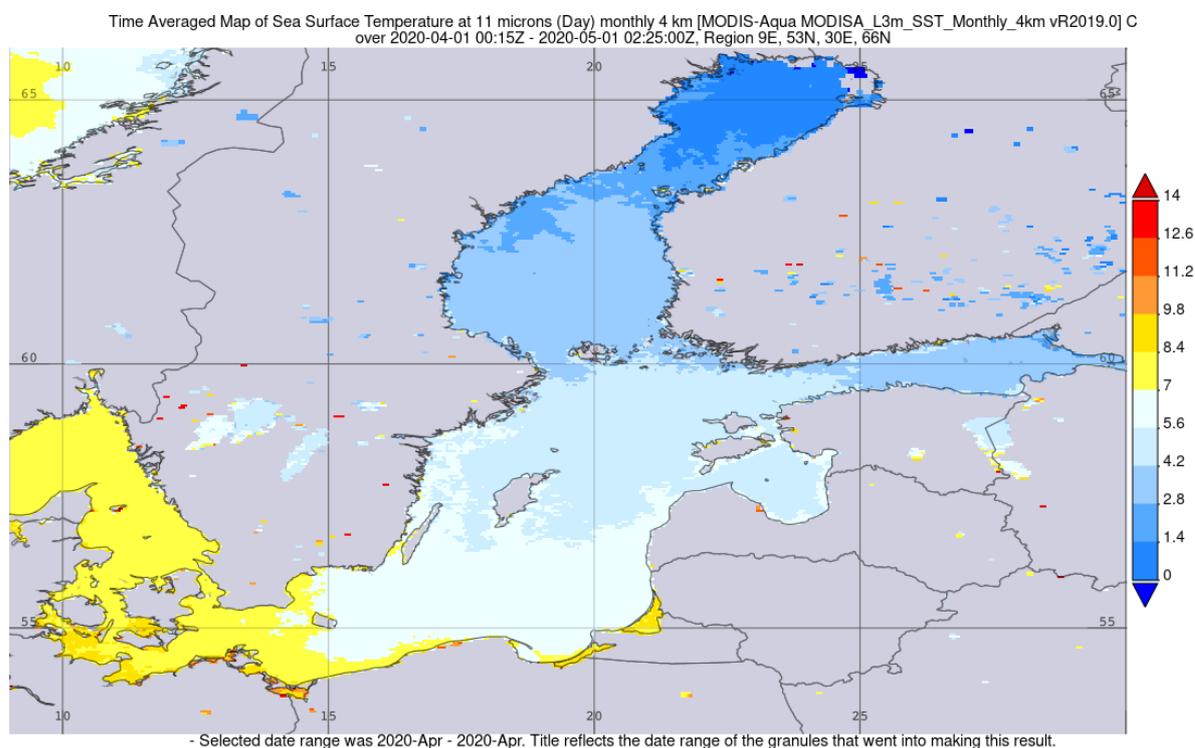


Рисунок 3.23. Карта пространственного распределения ТПМ за апрель 2020 года

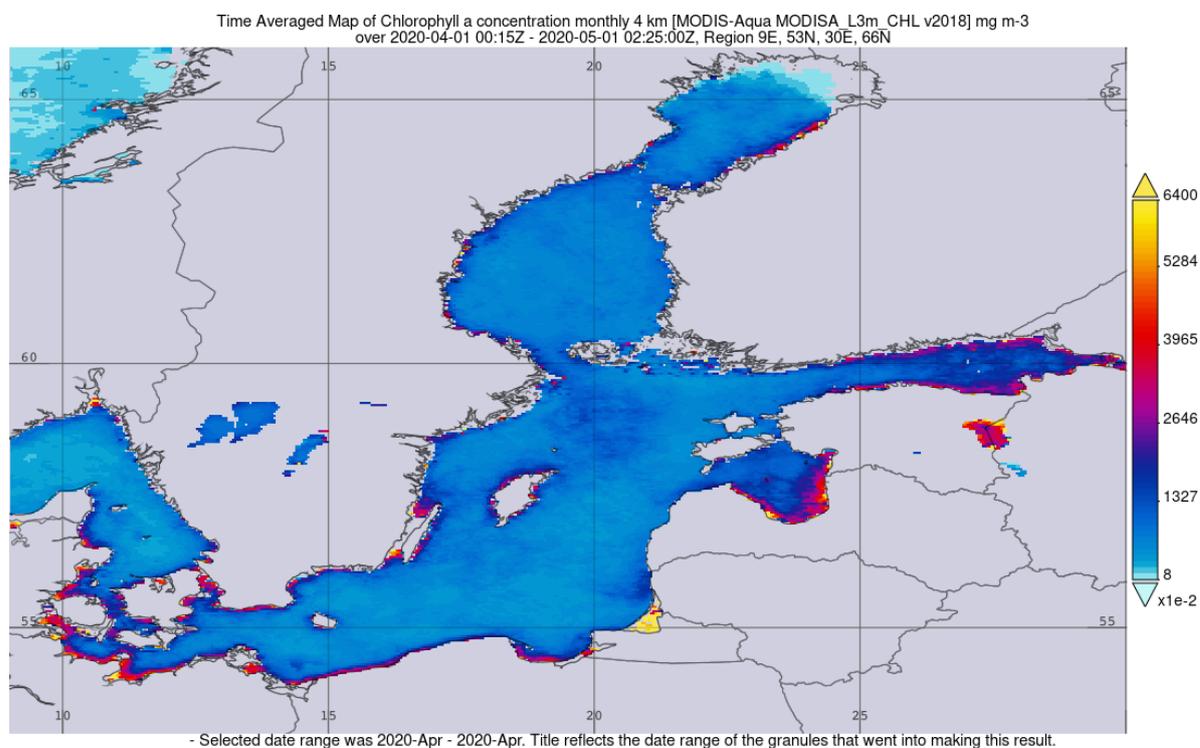


Рисунок 3.24. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за апрель 2020 года

На рисунке 3.24 можно выделить несколько районов, где значение хлорофилла «а» превышает значения в остальных: берега Финского (30-35 мг/м³), Рижского (50-64 мг/м³), Куршского (64 мг/м³ и более) и Гданьского (35-40 мг/м³) заливов; берега Германии и Дании (40-64 мг/м³); воды между Швецией и о. Эланд (50-60 мг/м³) и в северной части Ботнического залива у западного побережья Финляндии (50-60 мг/м³).

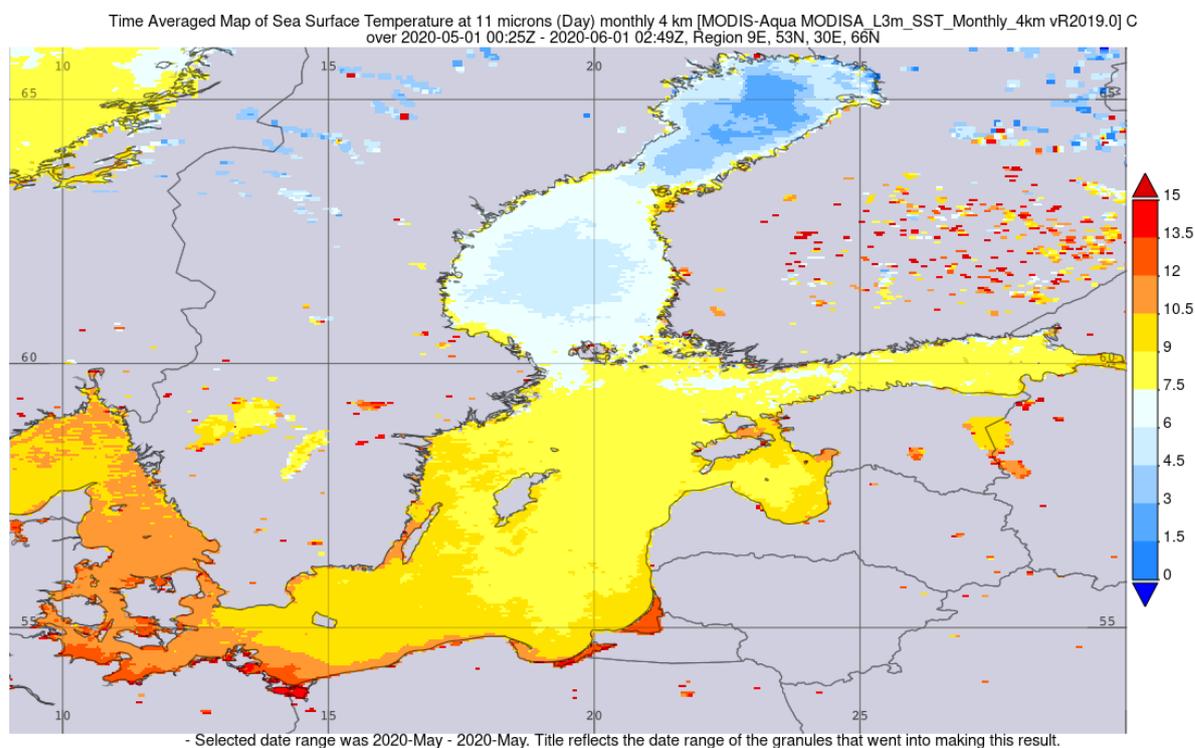


Рисунок 3.25. Карта пространственного распределения ТПМ за май 2020 года

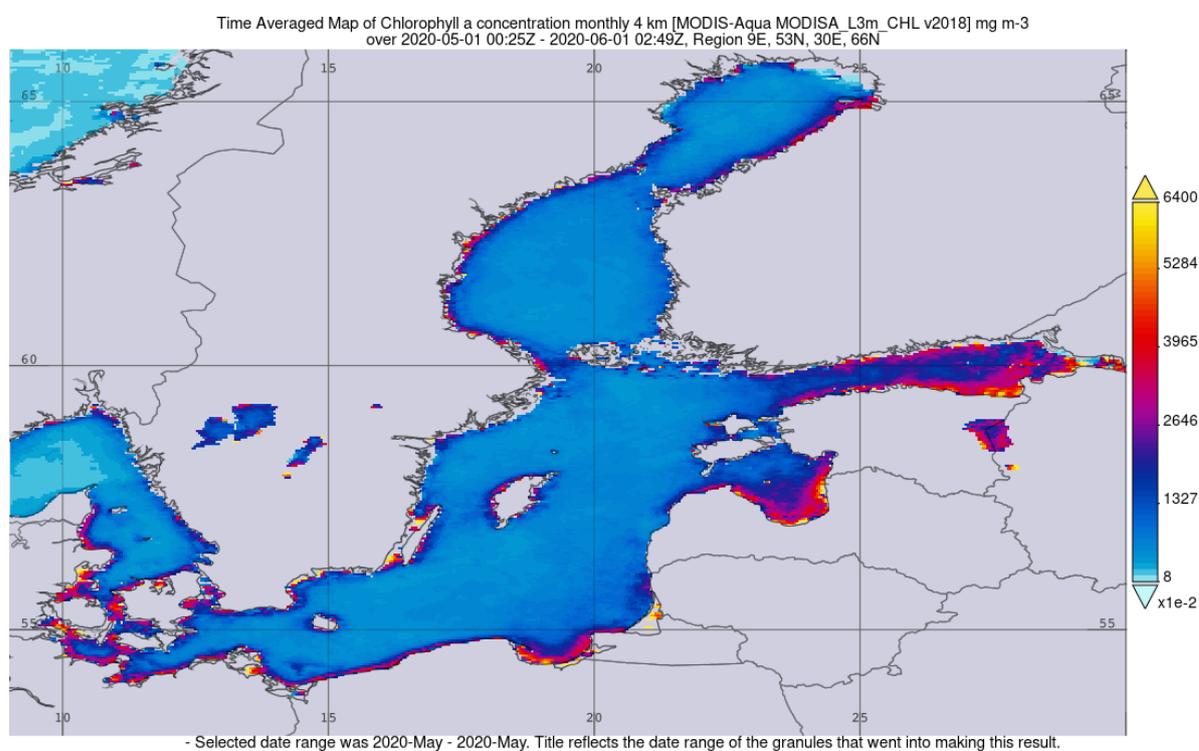


Рисунок 3.26. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за май 2020 года

В мае произошли небольшие изменения: в Финском заливе концентрация хлорофилла «а» увеличилась в центральной части. В Рижском

и Гданьском заливах цветение распространилось дальше от берегов. Такая же ситуация происходит у островов Дании. В северной части Ботнического залива концентрация увеличилась дальше на север по берегам Финляндии.

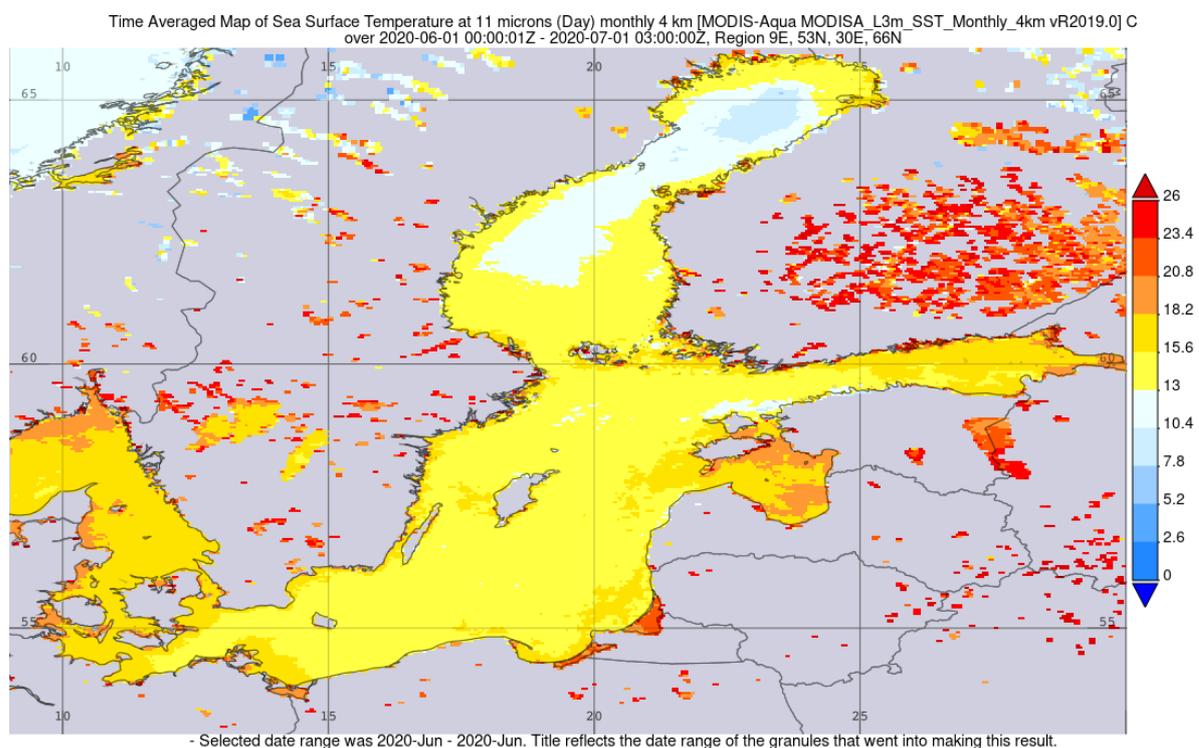


Рисунок 3.27. Карта пространственного распределения ТПМ за июнь 2020 года

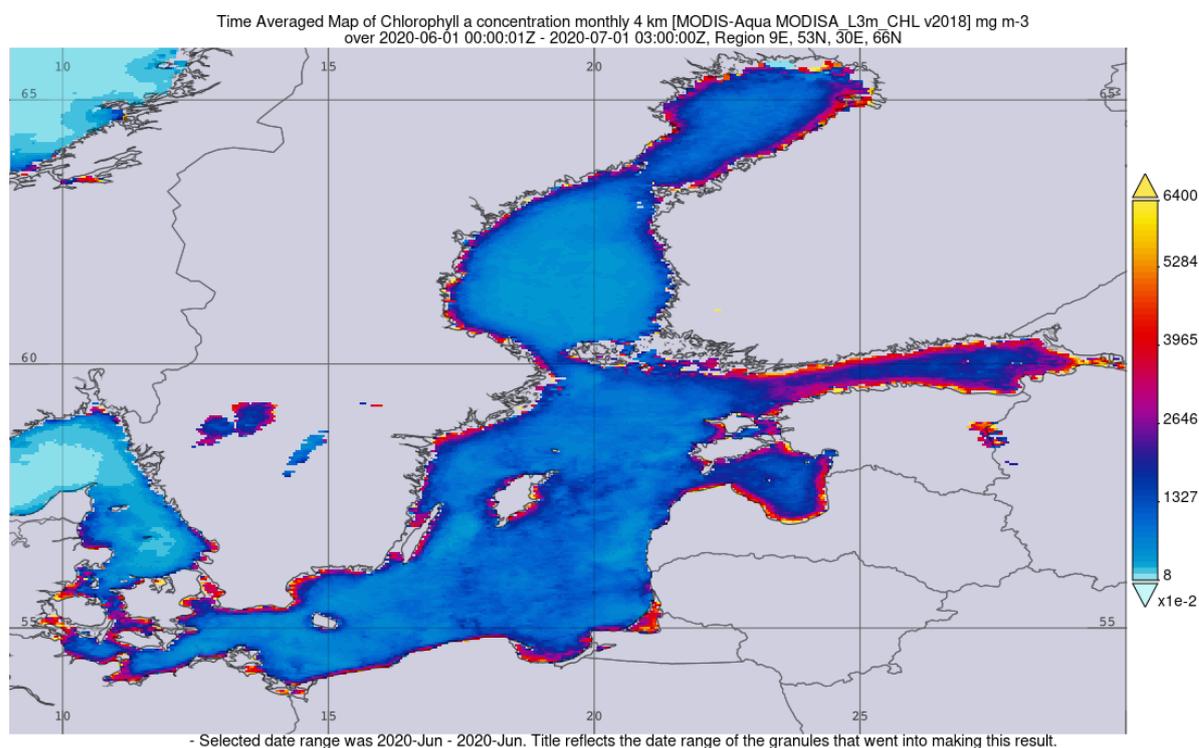


Рисунок 3.28. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за июнь 2020 года

В июне высокие значения концентрации хлорофилла «а» наблюдаются почти по всем берегам Балтийского моря. Но при этом, к примеру, в Куршском заливе показатель уменьшился (40-55 мг/м³) по сравнению с весенним периодом, когда концентрации достигали 64 мг/м³ и более.

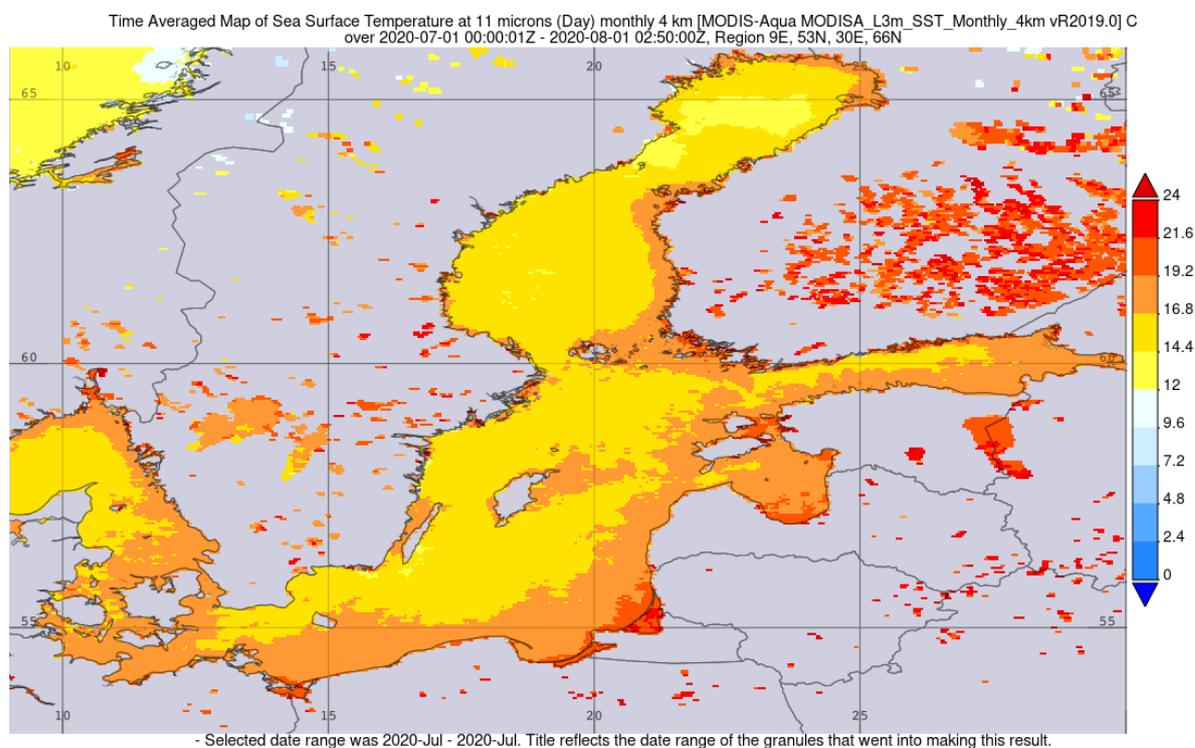


Рисунок 3.29. Карта пространственного распределения ТПМ за июль 2020 года

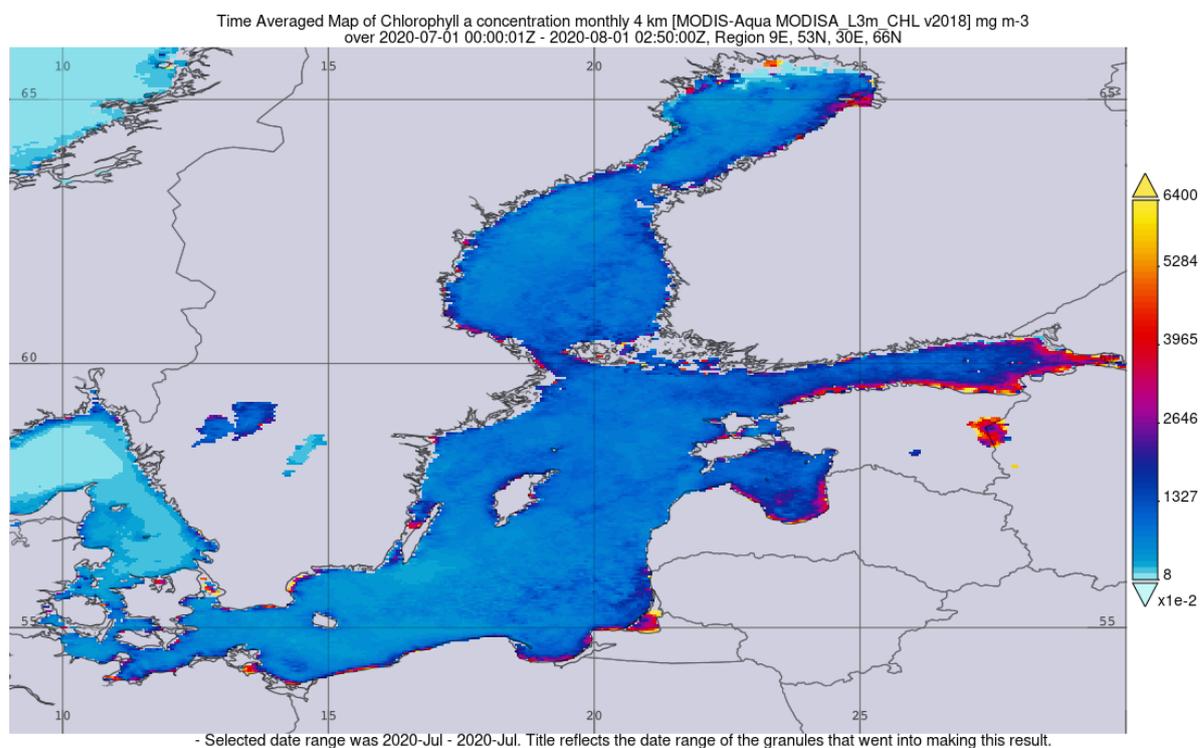


Рисунок 3.30. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за июль 2020 года

В июле значения концентрации хлорофилла «а» уменьшились до 10-20 мг/м³ почти везде, кроме: южного побережья Финского залива и Невской губы (40-60 мг/м³); берегов Рижского (40-45 мг/м³), Куршского (40-55 мг/м³) заливов.

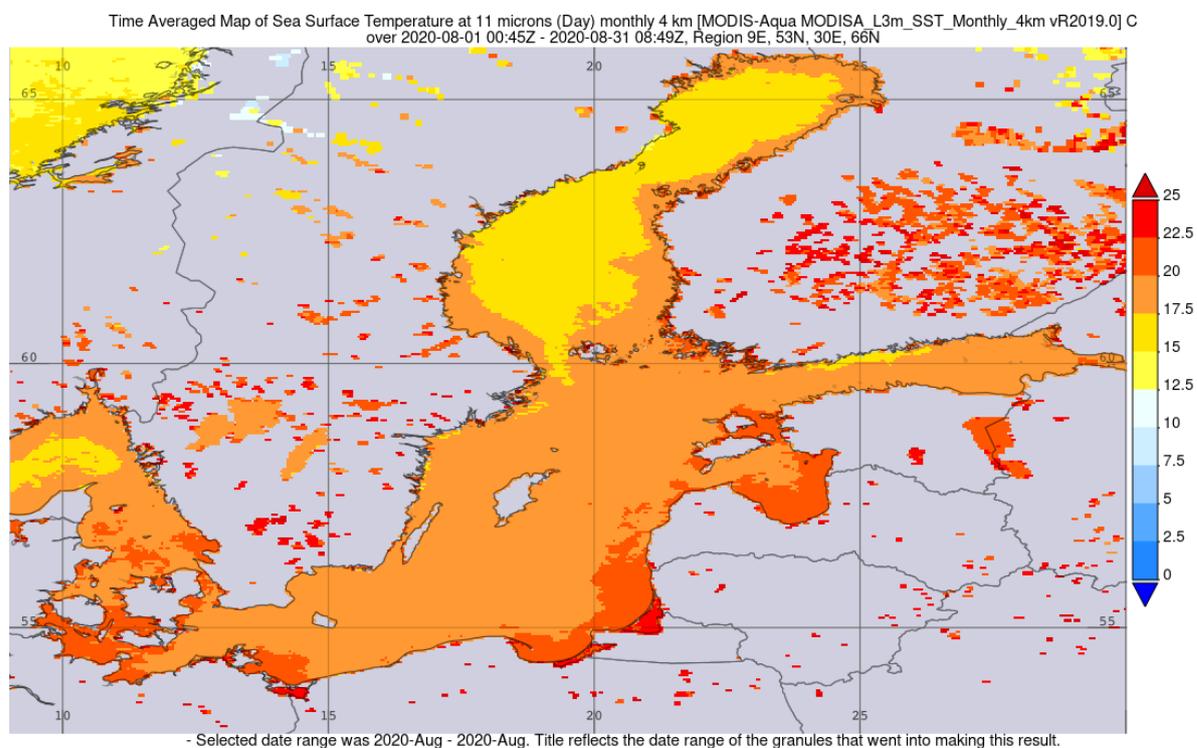


Рисунок 3.31. Карта пространственного распределения ТПМ за август 2020 года

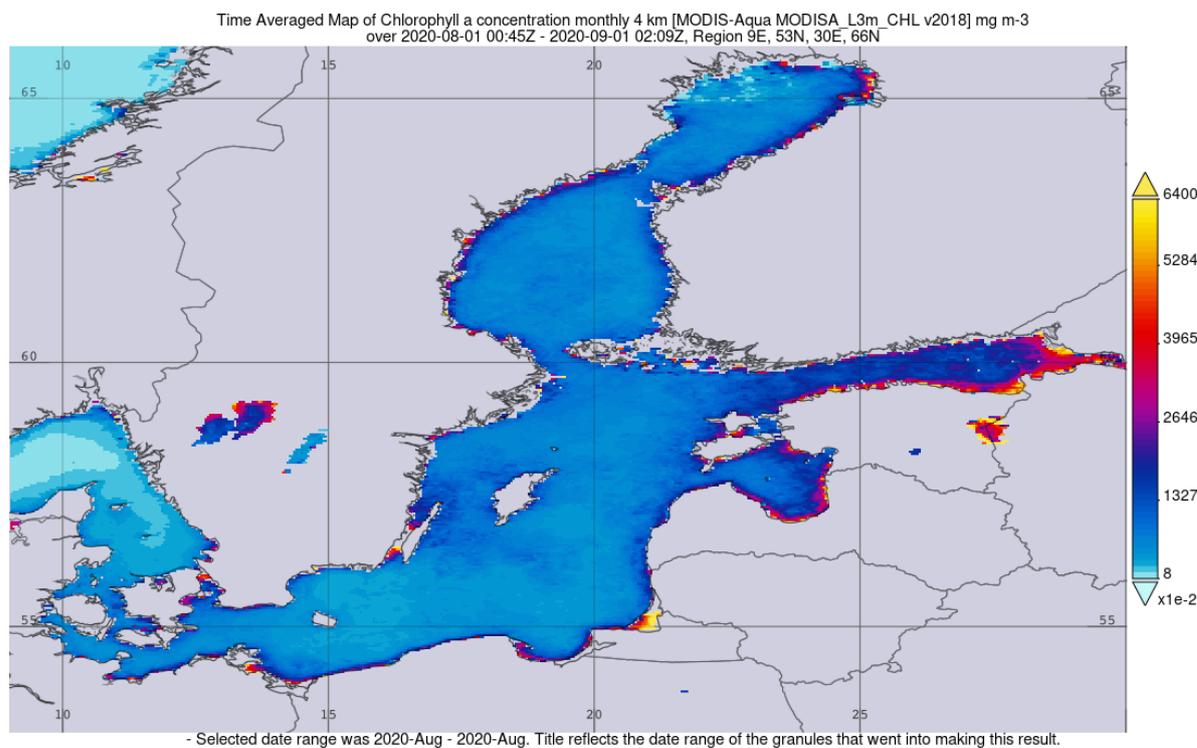


Рисунок 3.32. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за август 2020 года

В августе видны повышения концентрации хлорофилла «а» в Куршском заливе ($50\text{-}64 \text{ мг/м}^3$). Также в Финском заливе цветение распространилось ближе к центральной части со стороны Невской губы.

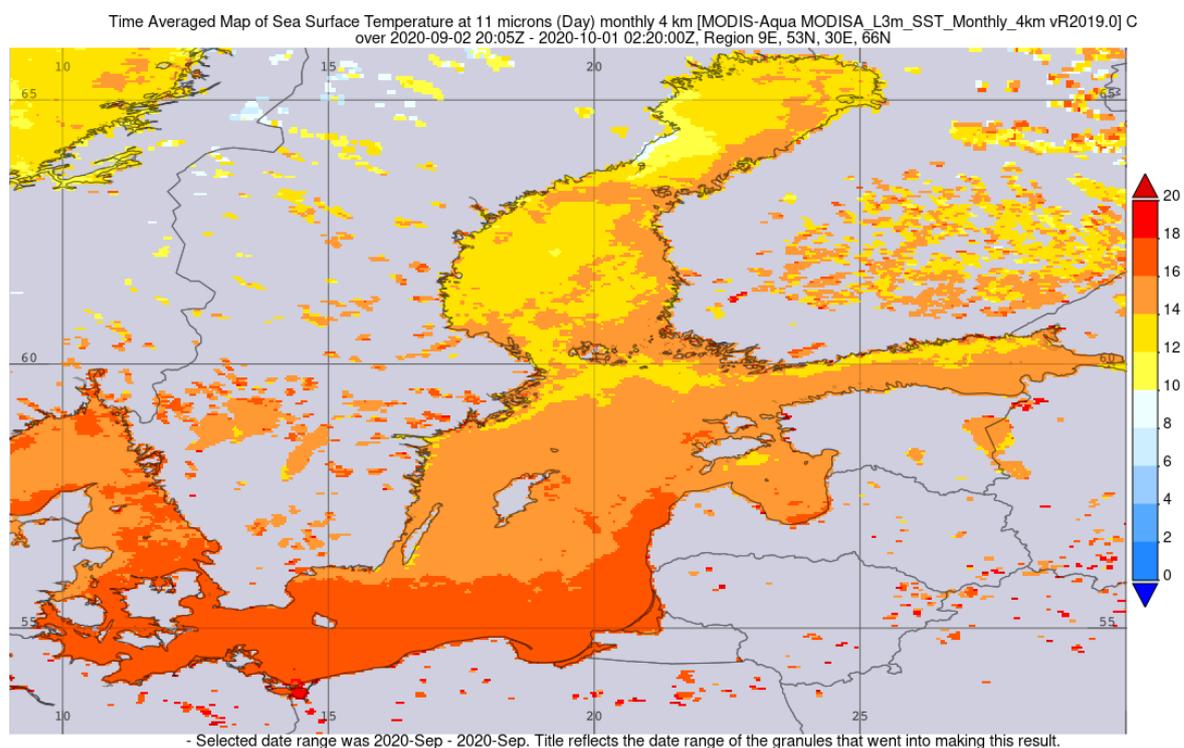


Рисунок 3.33. Карта пространственного распределения ТПМ за сентябрь 2020 года

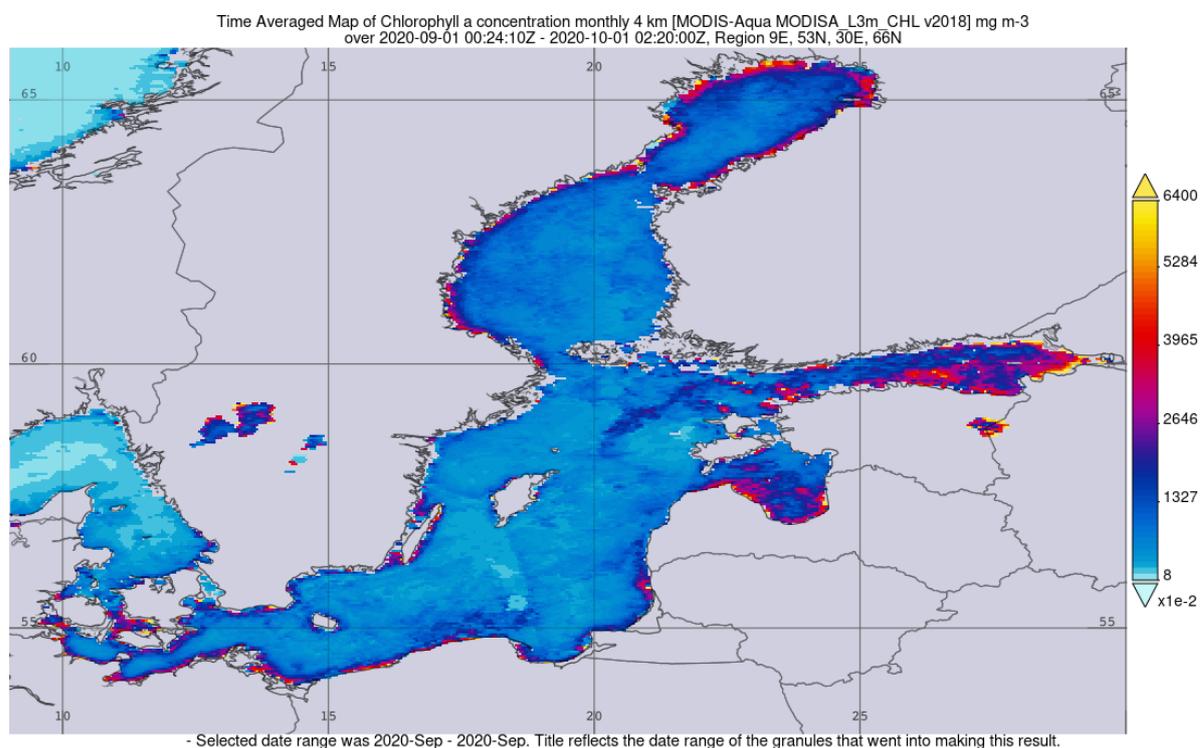


Рисунок 3.34. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за сентябрь 2020 года

С наступлением сентября по всем берегам северной части Ботнического залива наблюдается повышение значений концентрации хлорофилла «а». В Финском и Рижском заливах цветение продолжает распространяться дальше от берегов.

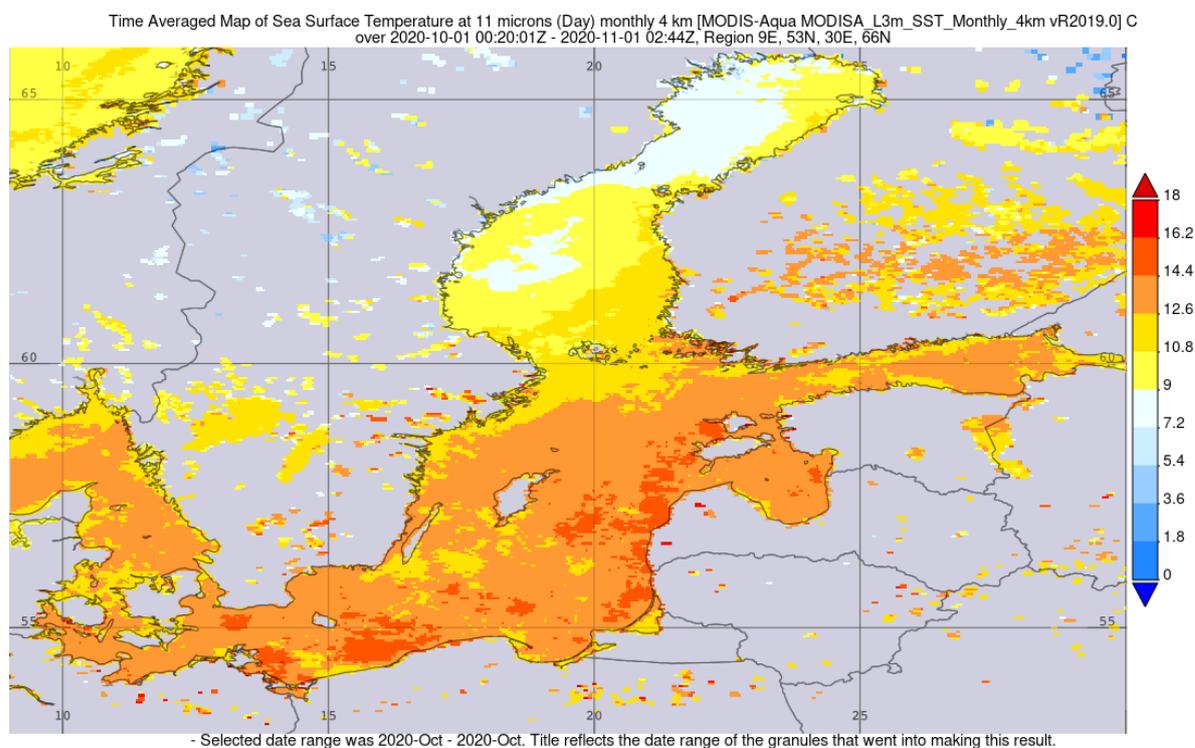


Рисунок 3.35. Карта пространственного распределения ТПМ за октябрь 2020 года

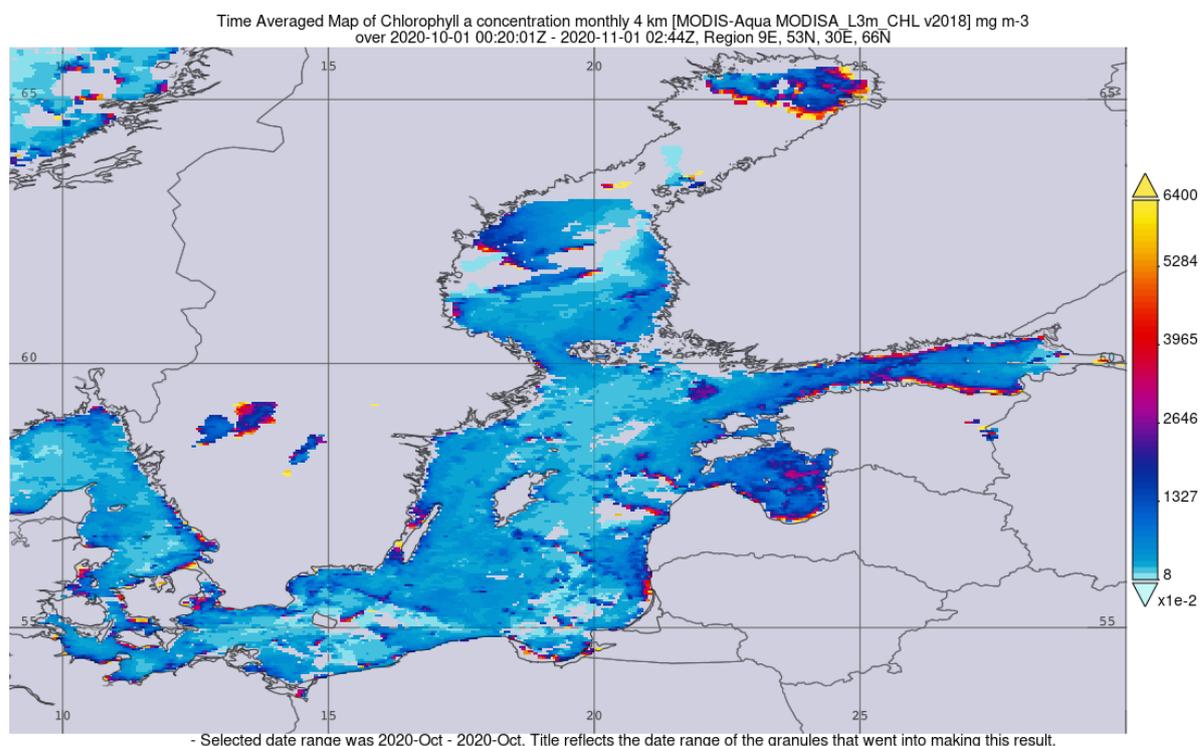


Рисунок 3.36. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за октябрь 2020 года

В октябре, из-за облачности, невозможно провести полноценный анализ концентрации хлорофилла «а» в Балтийском море. Можно только выделить высокие значения в северной части Ботнического залива ($50-64 \text{ мг/м}^3$) и у побережий Финского и Рижского заливов ($50-55 \text{ мг/м}^3$).

При общем анализе 2020 года можно выделить несколько месяцев, в которых наблюдалось наиболее активное цветение вод (май, июнь, сентябрь). Стоит заметить, что колебания концентраций хлорофилла «а» происходят преимущественно у берегов, нежели в открытых районах Балтийского моря. Возможно, это связано с завышением значений стандартными алгоритмами MODIS, вследствие наличия в прибрежных районах большого количества взвешенных веществ, которые приходят с речным стоком.

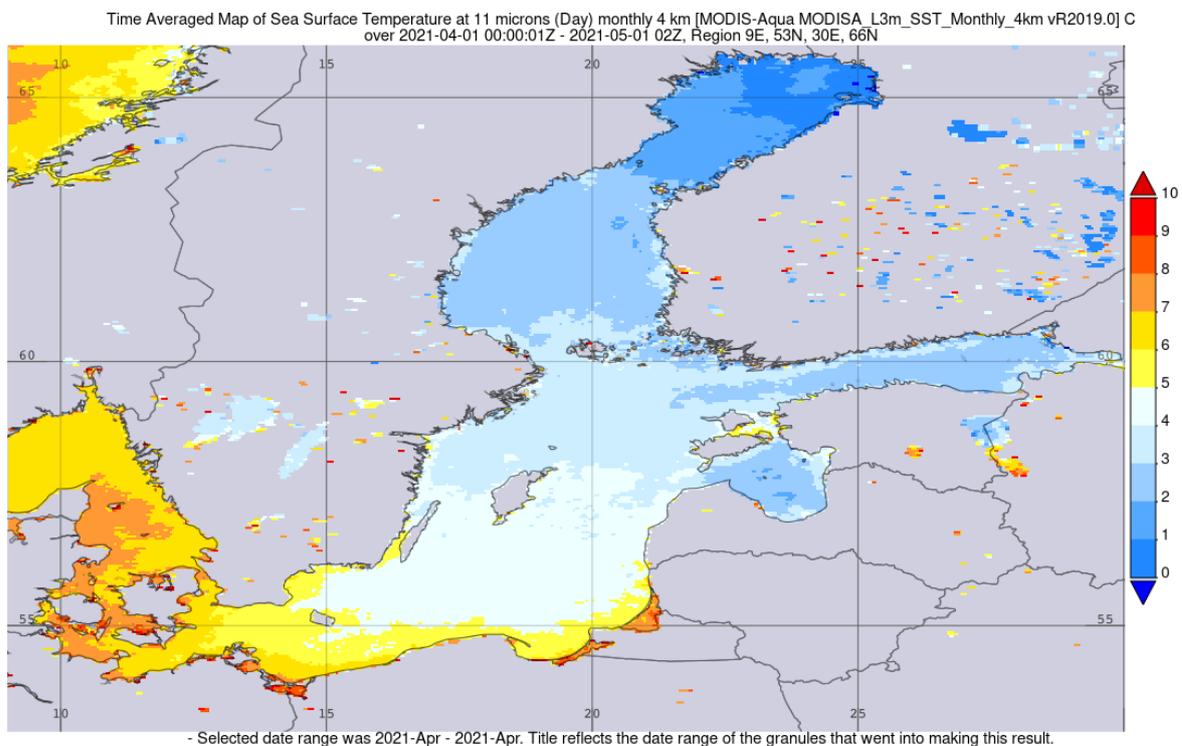


Рисунок 3.37. Карта пространственного распределения ТПМ за апрель 2021 года

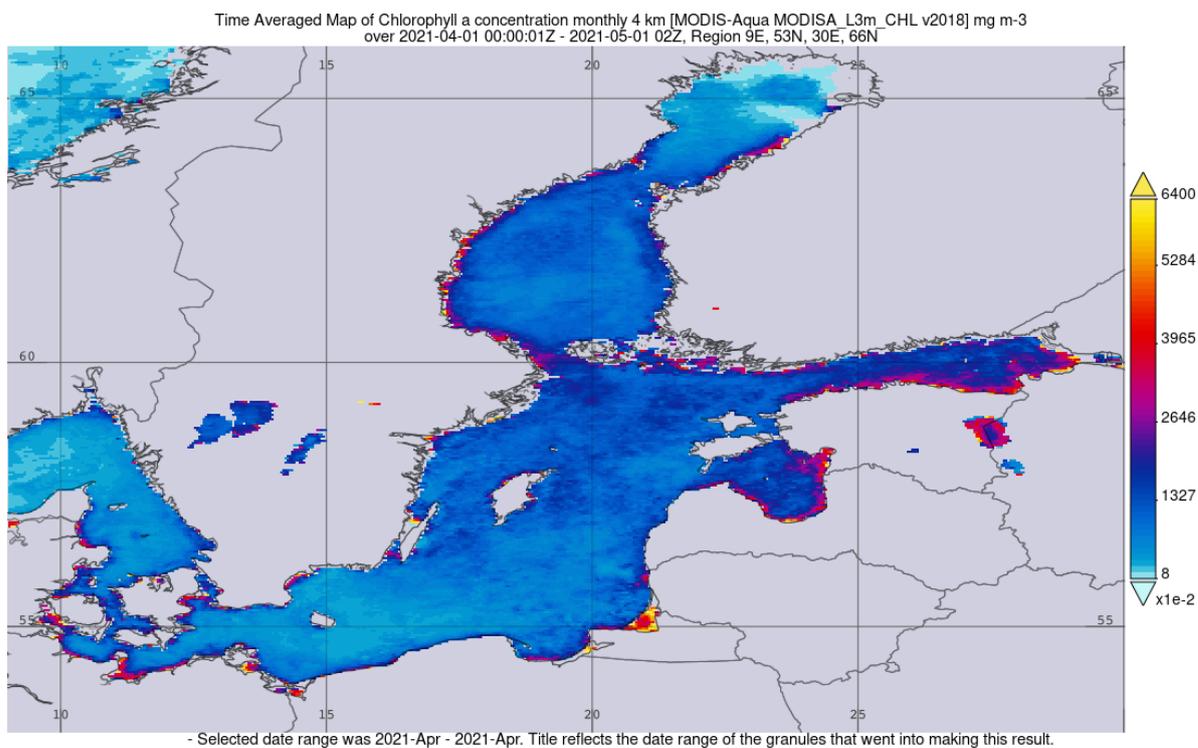


Рисунок 3.38. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за апрель 2021 года

В апреле 2021 года высокие значения концентрации хлорофилла «а» наблюдались: у берегов Финского (40-55 мг/м³), Рижского (40-50 мг/м³) и Куршского (50-64 мг/м³) заливов; у западных берегов южной части Ботнического залива (40-50 мг/м³) и берегов Германии и Дании (45-60 мг/м³).

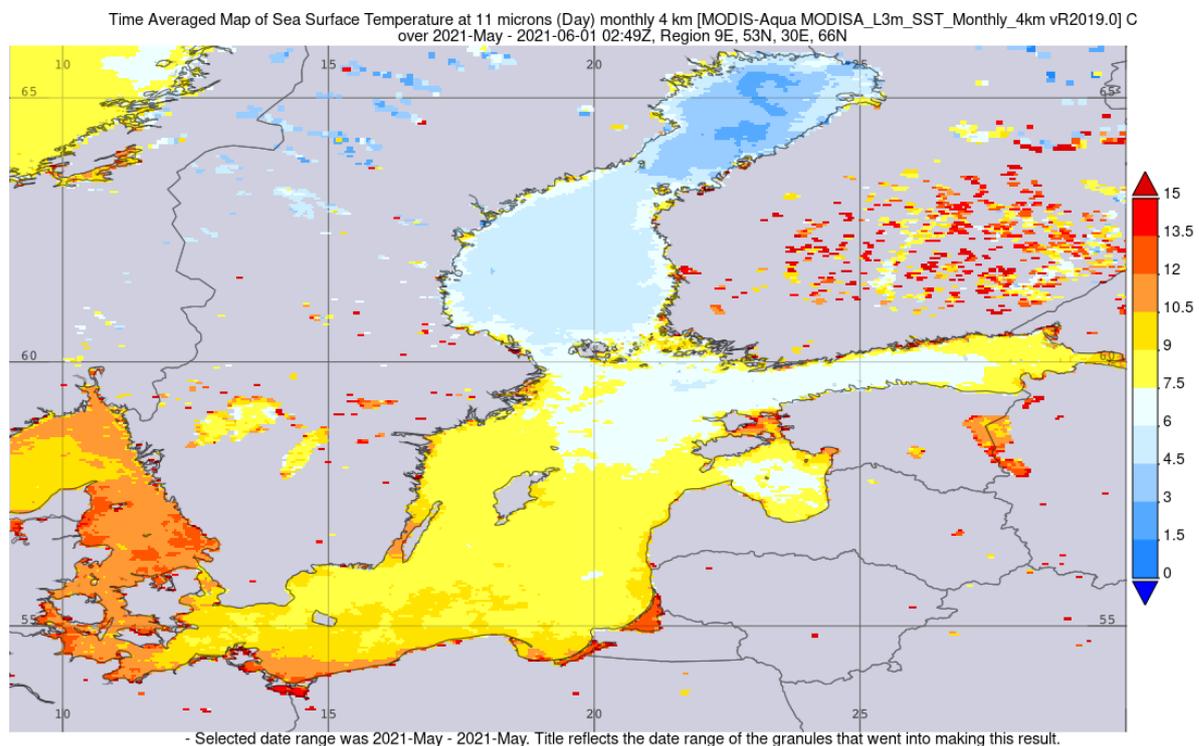


Рисунок 3.39. Карта пространственного распределения ТПМ за май 2021 года

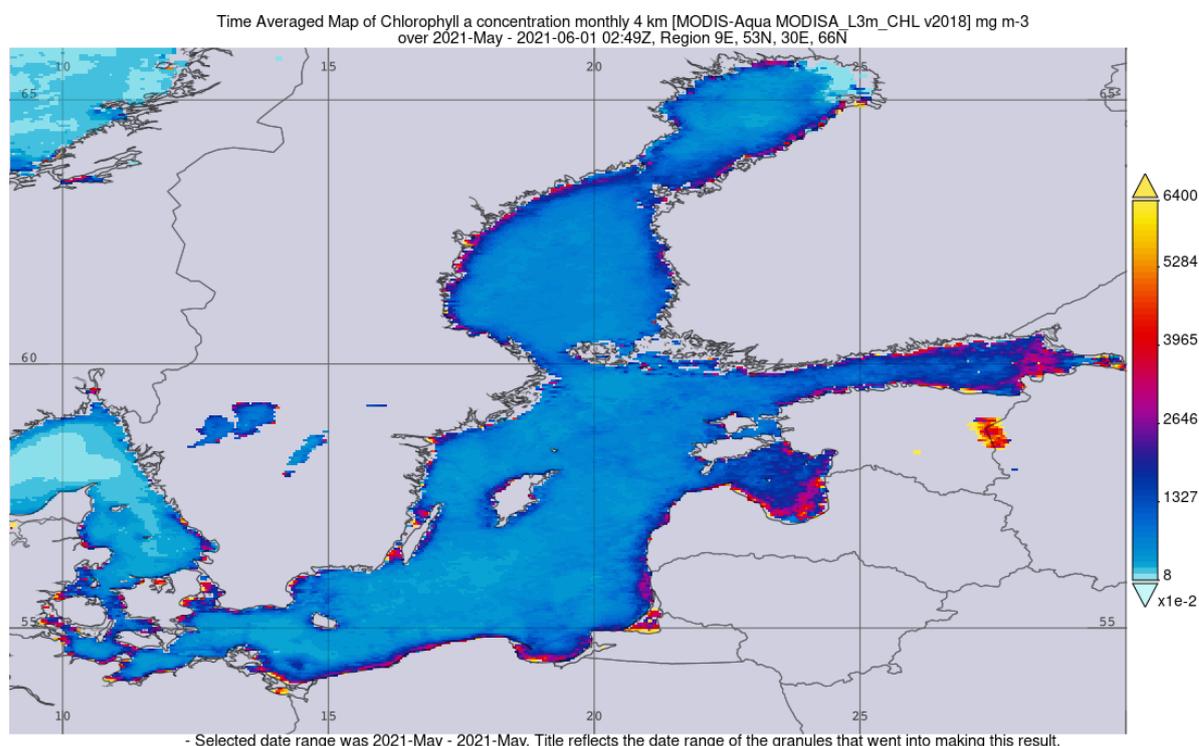


Рисунок 3.40. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за май 2021 года

В последнем месяце весны в Финском и Рижском заливах цветение отступило от берегов к центральным районам, при этом концентрации хлорофилла «а» у берегов уменьшились до 20-40 мг/м³. До таких же значений опустилась концентрация в Куршском, Ботническом заливах, а также в районе Датских проливов.

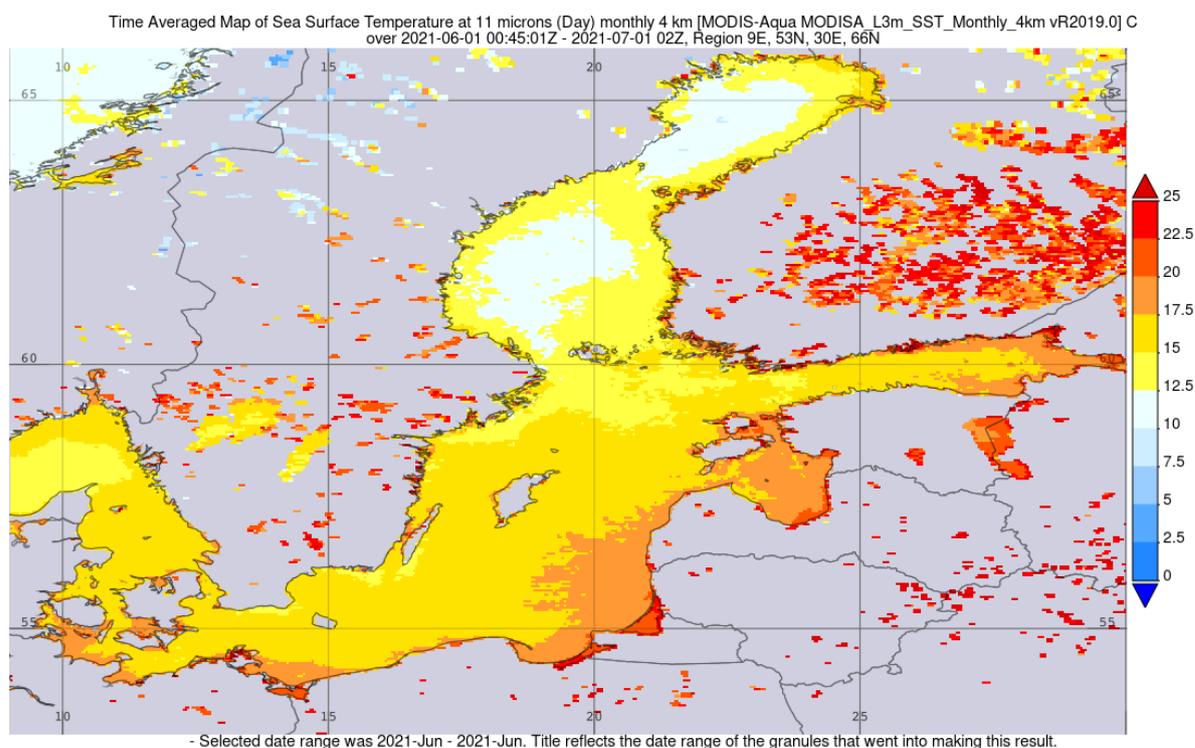


Рисунок 3.41. Карта пространственного распределения ТПМ за июнь 2021 года

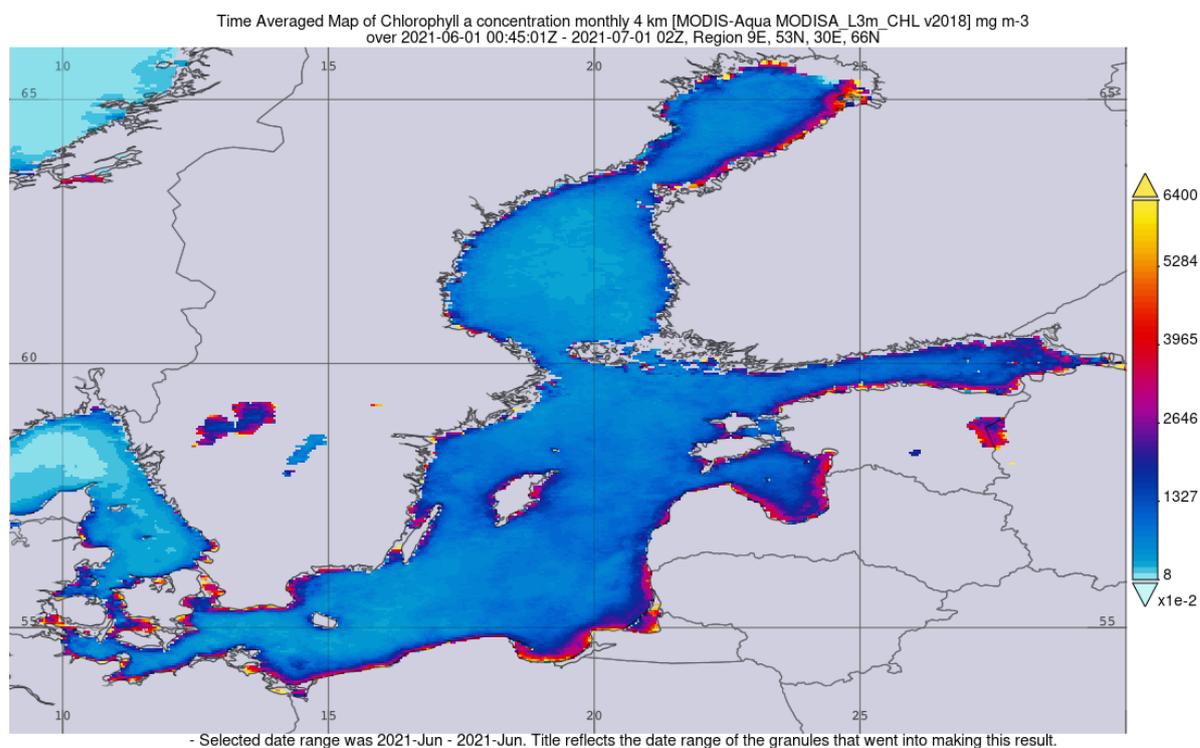


Рисунок 3.42. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за июнь 2021 года

С наступлением лета заметно повышение концентрации хлорофилла «а» у берегов северной части Ботнического залива, а также у берегов Рижского, Куршского и Гданьского заливов (40-64 мг/м³). Аналогичная ситуация наблюдается в районе Датских проливов.

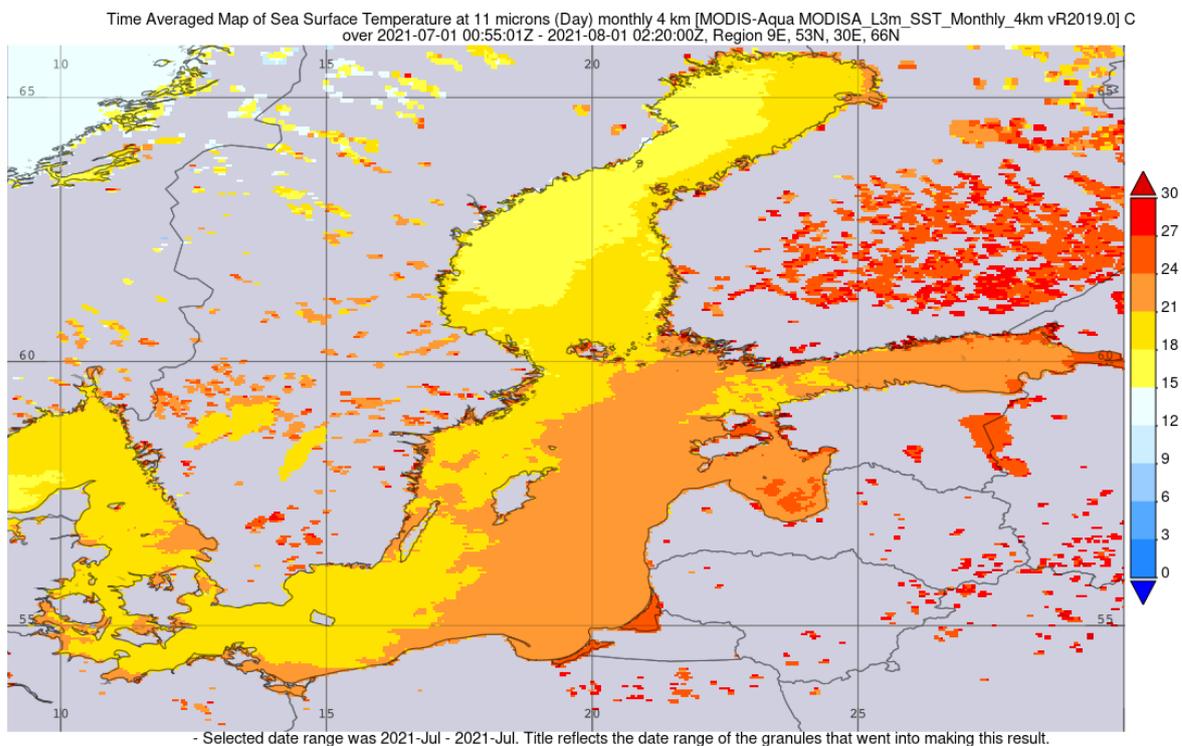


Рисунок 3.43. Карта пространственного распределения ТПМ за июль 2021 года

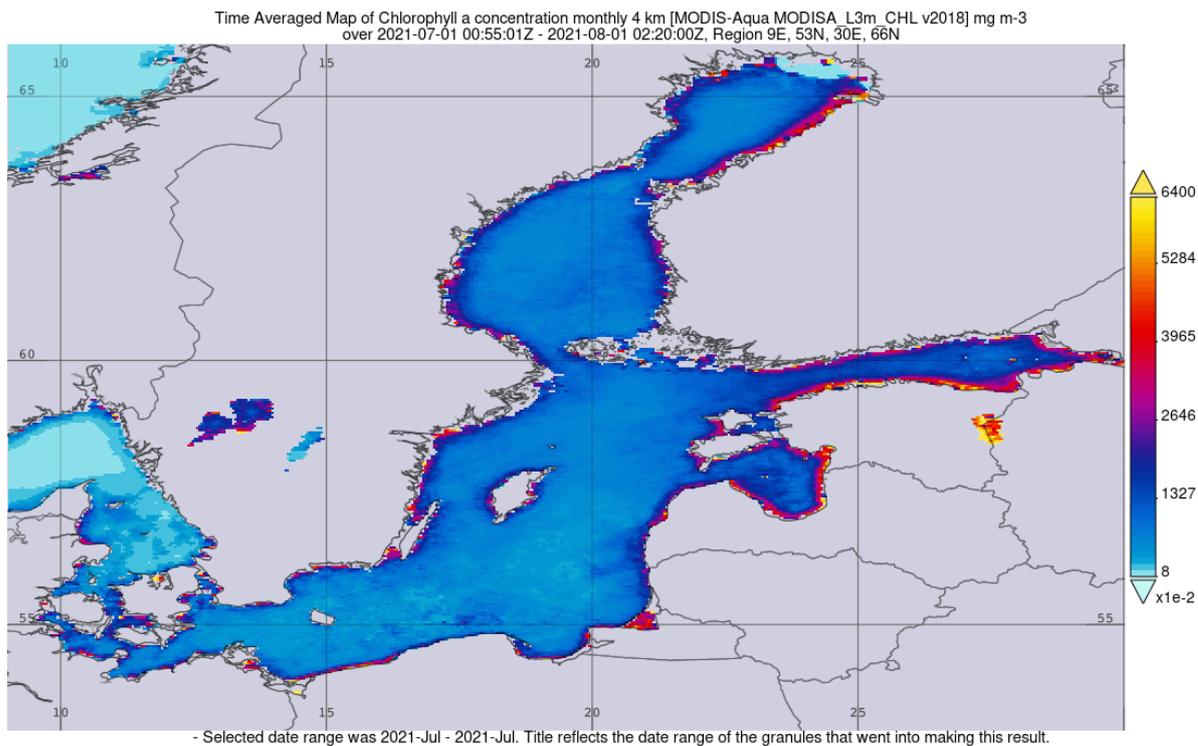


Рисунок 3.44. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за июль 2021 года

В июле распределение концентрации хлорофилла «а» схоже с июнем, за исключением Гданьского залива и Датских проливов, где значения опустились до 10-20 мг/м³.

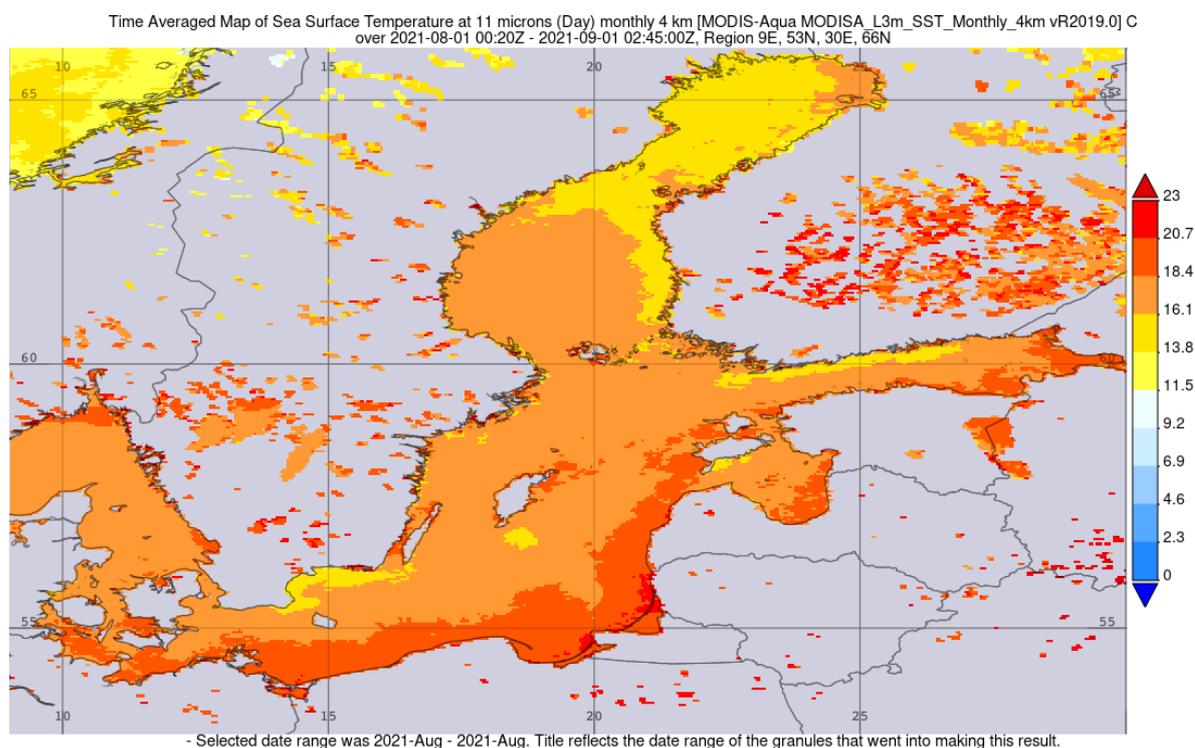


Рисунок 3.45. Карта пространственного распределения ТПМ за август 2021 года

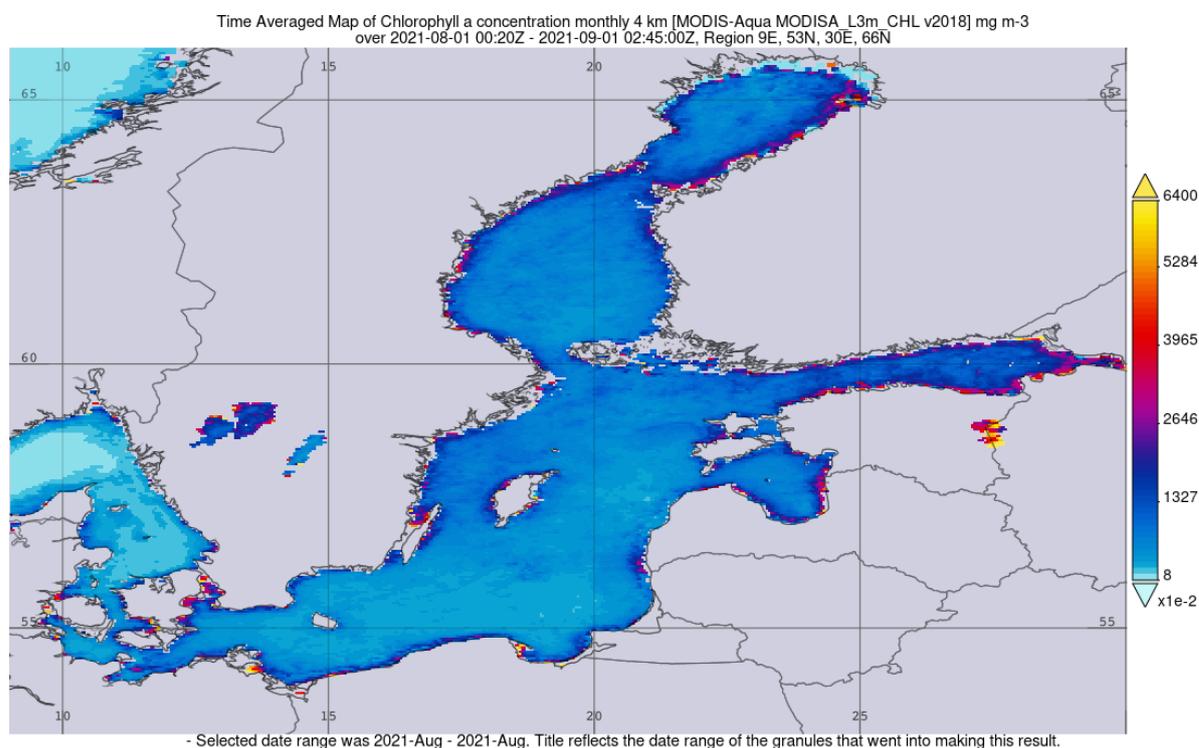


Рисунок 3.46. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за август 2021 года

К концу лета во всех районах Балтийского моря можно выделить уменьшение концентраций хлорофилла «а» до 10-20 мг/м³. Более высокие показатели можно увидеть в Финском заливе и северной части Ботнического залива (40-55 мг/м³).

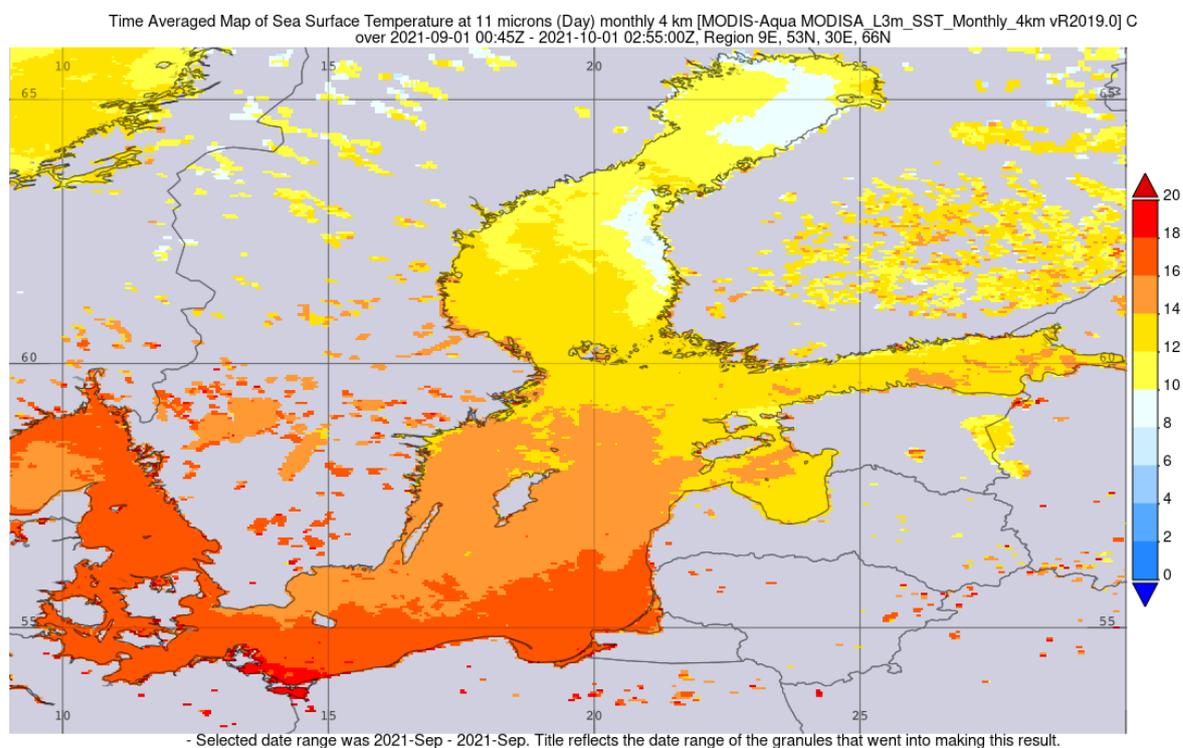


Рисунок 3.47. Карта пространственного распределения ТПМ за сентябрь 2021 года

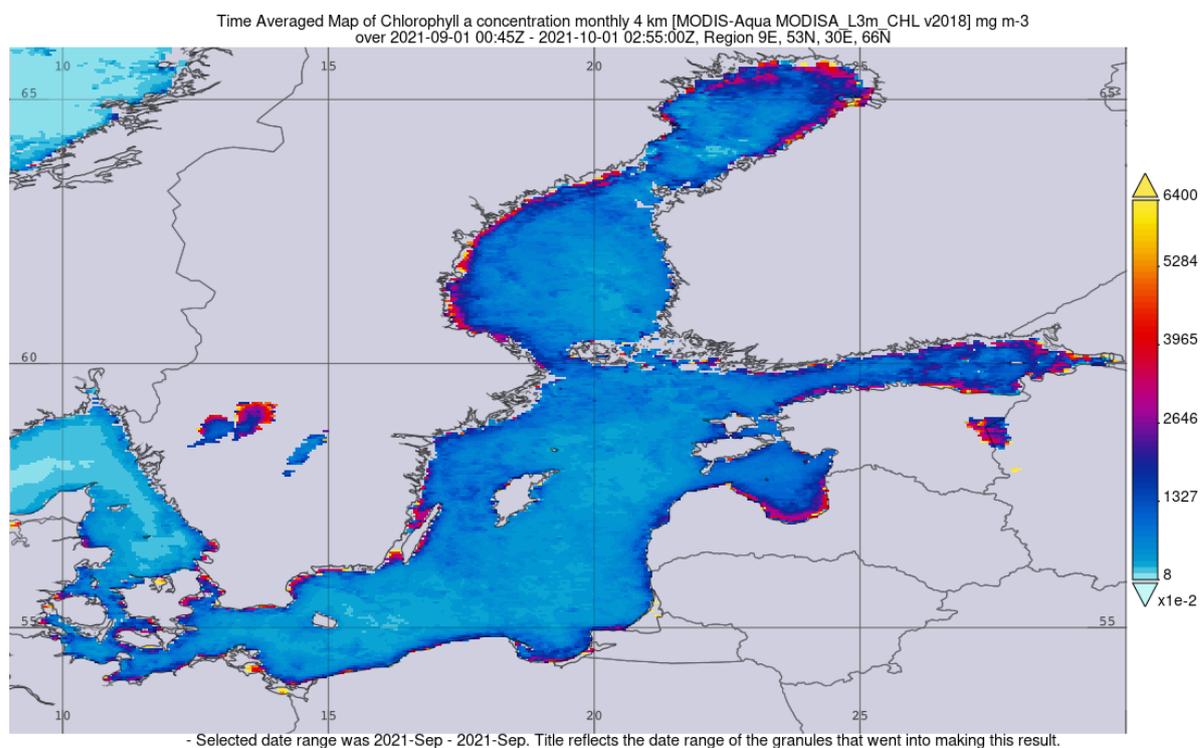


Рисунок 3.48. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за сентябрь 2021 года

В сентябре наблюдается повышение концентрации хлорофилла «а» у всех берегов северной части и у западных берегов южной части Ботнического залива (40-60 мг/м³). Такую же ситуацию мы видим в Рижском заливе.

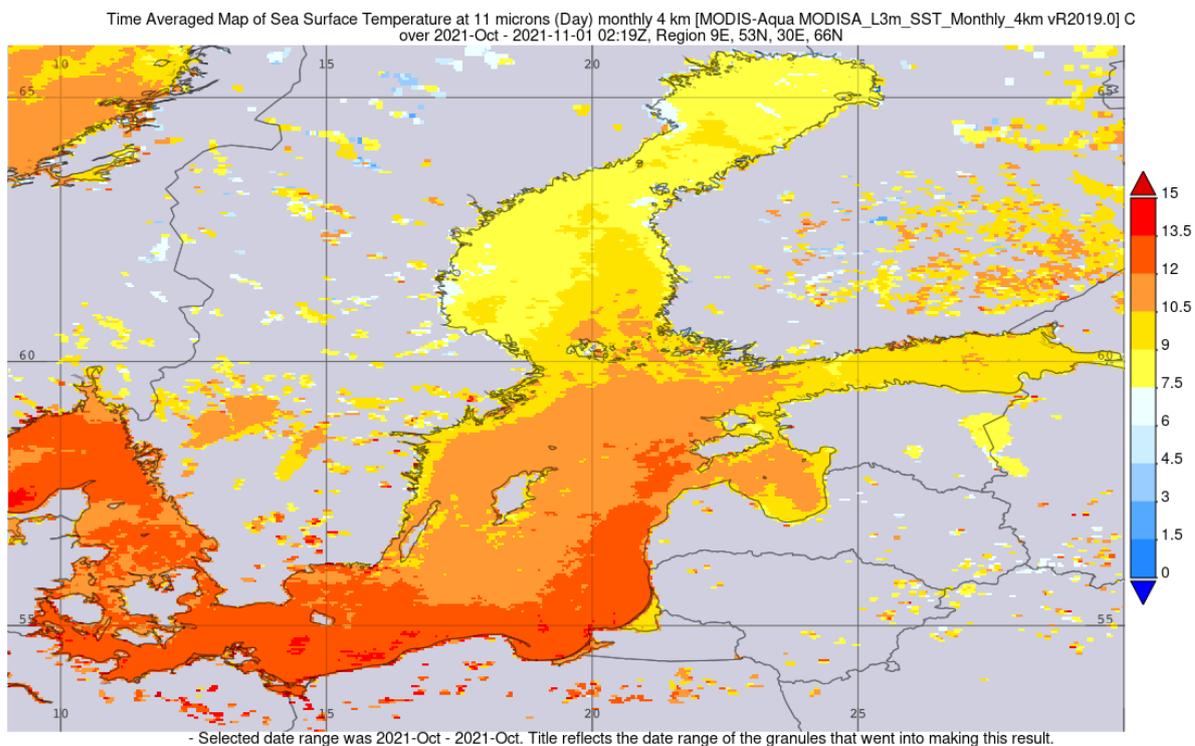


Рисунок 3.49. Карта пространственного распределения ТПМ за октябрь 2021 года

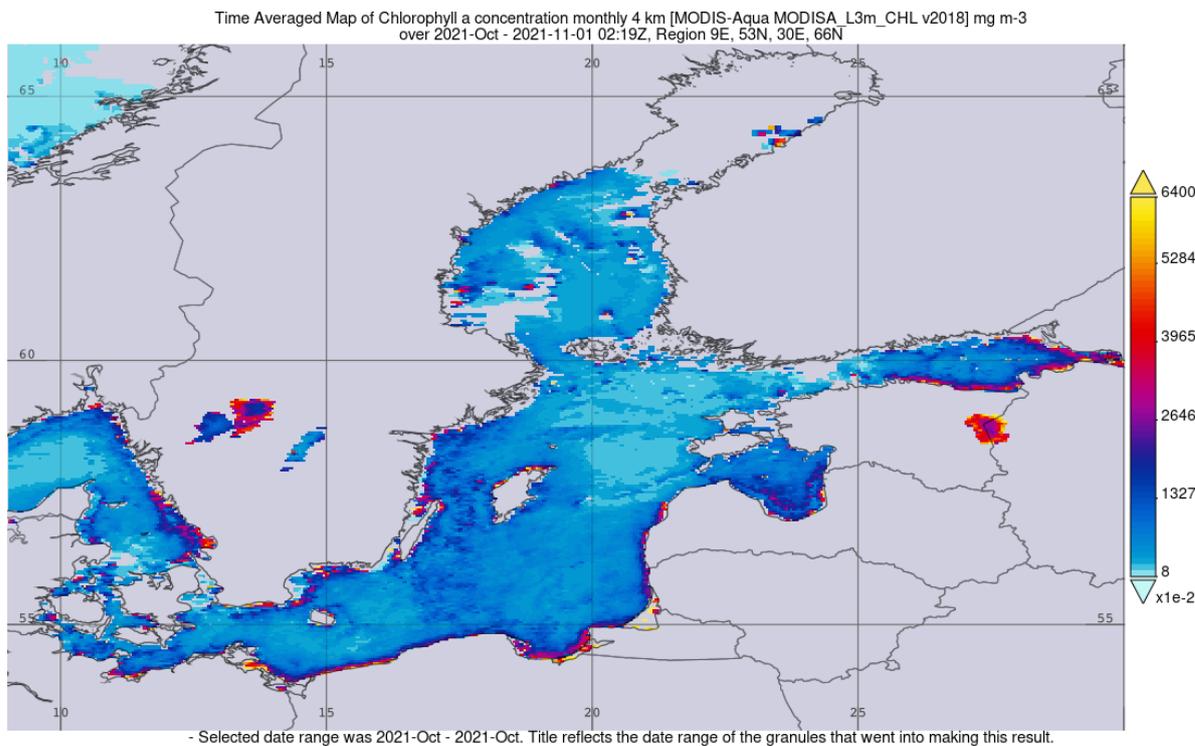


Рисунок 3.50. Карта пространственного распределения хлорофилла «а» за октябрь 2021 года

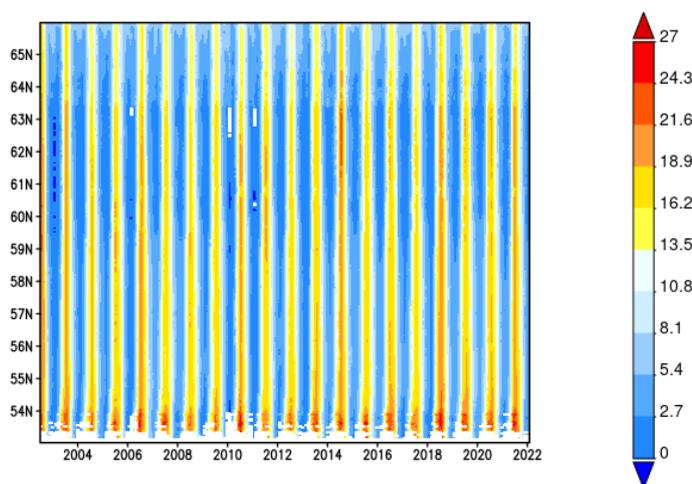
В октябре 2021 года произошла такая же ситуация, как и в октябре 2020 года: из-за облачности нельзя сделать полноценный пространственный анализ распределения концентрации хлорофилла «а». Но все же можно выделить некоторые районы, где происходит повышение значений по сравнению с сентябрем: в Невской губе и Гданьском заливе (40-50 мг/м³).

При анализе 2021 года также можно выделить несколько месяцев, в которых наблюдалось наиболее активное цветение вод (апрель, июнь, сентябрь). Стоит заметить, что колебания концентраций хлорофилла «а» происходят преимущественно у берегов, нежели в открытых районах Балтийского моря. Возможно, это связано с завышением значений стандартными алгоритмами MODIS, вследствие наличия в прибрежных районах большого количества взвешенных веществ, которые приходят с речным стоком.

3.4 Диаграмма Хофмоллера

С помощью сервиса Giovanni построили пространственно-временную диаграмму Хофмоллера по данным температуры поверхности моря и хлорофиллу «а» за 2002-2022 гг (Рис.3.51-3.52).

Hovmoller, Longitude-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-07-04 00:55:01Z - 2022-Feb, Region 9E, 53N, 30E, 66N



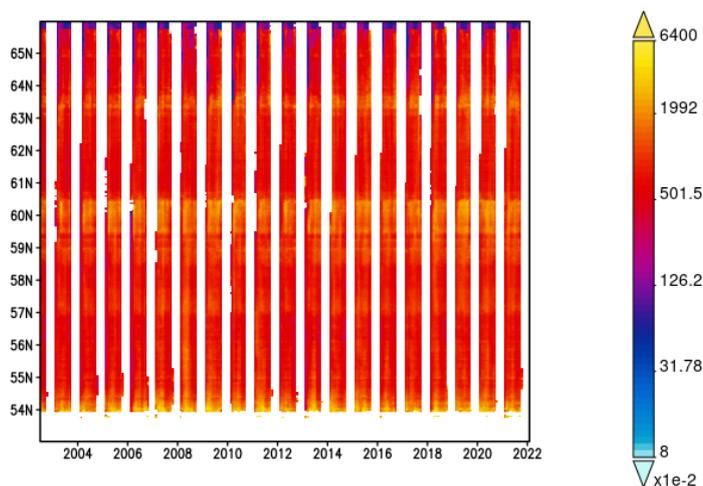
- Selected date range was 2002-Jul - 2022-Feb. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Рисунок 3.51. Диаграмма Хофмоллера для ТПМ за 2002-2022 гг

На данной диаграмме можно выделить, что максимум температуры в теплый сезон приходится на 53-54° с.ш. (24-27°C), а минимум в холодный период на 60-64° с.ш. (0-3°C).

Можно увидеть области, которые выделяются на общей картине: с 53° с.ш. по 60° с.ш. преобладает более продолжительный теплый период, нежели в широтах, севернее 60°. Также можно выделить годы, где в летний период наблюдаются воды с температурой около 20°C почти на всех широтах: 2003 г (53-63,5° с.ш.); 2006 г (53-63° с.ш.); 2010 г (53-62,5° с.ш.); 2014 г (53-64,5° с.ш.); 2018 г (53-63,5° с.ш.) и 2021 г (53-63,5° с.ш.). А в зимние сезоны выделяются 3 года, где местами на определенных широтах температура опускается ниже 0°C: 2003 г (60-63° с.ш.); 2010 г (59-61° с.ш.) и 2011 г (60-61° с.ш.).

Hovmoller, Longitude-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2002-07-04 00:40:05Z - 2022-Feb, Region 9E, 53N, 30E, 66N



- Selected date range was 2002-Jul - 2022-Feb. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Рисунок 3.52. Диаграмма Хофмоллера для хлорофилла «а» за 2002-2022 гг

На диаграмме выделяются широты, где значения концентрации хлорофилла «а» были максимальны во все года: 54° с.ш., 59,5-60,5° с.ш., 63,5° с.ш. Минимум приходится на 66° с.ш.

Также мы видим, что отсутствуют данные за зимний период ввиду некоторых причин, таких как отсутствие хлорофилла «а», наличие облачности и ледяного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе были исследованы и проанализированы особенности цветения вод Балтийского моря по данным спутникового мониторинга и реанализа.

При анализе первичных характеристик выявлен тот факт, что в Ботническом заливе наблюдаются наименьшие медианы практически у всех характеристик. Максимумы таких параметров как содержание хлорофилла «а» и фосфатов не превышает 1. Кроме того, разброс значений в этом заливе также наименьший. Можем сделать вывод, что воды Ботнического залива меньше остальных подвержены климатической или иной изменчивости. Распределение характеристик в Финском и Рижских заливах достаточно схожи. Существенное отличие наблюдается только в концентрации нитратов. Так, в Рижском заливе медиана равна 56.6 ммоль/м³ и максимум 78.9 ммоль/м³, при этом в Финском заливе медиана равна 6.3 ммоль/м³ с максимумом 18.9 ммоль/м³.

Тренды среднемесячных значений температуры оказались незначимые, значит, мы не можем с уверенностью сказать и существенном изменении температуры поверхности Балтийского моря. Из всех биохимических характеристик существенное изменение выявлено только в концентрации нитратов, в этом случае все тренды значимые и отрицательные. Так, в Рижском заливе коэффициент детерминации $R^2=0.63$. Значимых трендов в содержании хлорофилла «а» вовсе нет. Интересно, что тренд концентрации фосфатов в Ботническом заливе отрицательный, а в Финском – положительный, однако в обоих случаях значения концентрации крайне малы.

Корреляционный анализ выявил значимую обратную связь температуры поверхности моря и концентрации фосфатов. Стоит сказать, что практически все коэффициенты корреляции оказались значимые, но при

анализе графиков связи стало понятно, что уверенно говорить о связи температуры и биохимическими параметрами нельзя.

Таким образом, для анализа климатической изменчивости биохимических параметров Балтийского моря необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как освещенность, осадки, ледовую обстановку и др.

Анализ временного хода температуры поверхности Балтийского моря показал ожидаемую цикличность температуры с минимумами в феврале-марте (1-3°C) и максимумами в июле-августе (17-21°C). Значительных отклонений от нормы не наблюдается.

При анализе временного хода концентрации хлорофилла «а» были выявлены аномальные превышения значений в ноябре 2013 года, 2018 года и 2020 года (40 мг/м³). Это аномальная ситуация, которую можно отнести к осеннему цветению, при котором доминируют диатомовые водоросли. Но нельзя забывать о том, что из-за стандартного алгоритма MODIS, могут наблюдаться сильные завышения значений (см. Глава 2). Без сравнения спутниковых данных с судовыми и лабораторными наблюдениями можно лишь предположить, что повышение значений концентрации хлорофилла «а» в ноябре 2013, 2018 и 2020 годов является следствием перемешивания (в результате сильных ветров) и обильного речного стока, с которым приходят биогенные вещества.

Пространственный анализ позволил увидеть следующие особенности: при общем анализе 2020 года можно выделить несколько месяцев, в которых наблюдалось наиболее активное цветение вод (май, июнь, сентябрь). При анализе 2021 года также можно выделить несколько месяцев, в которых наблюдалось наиболее активное цветение вод (апрель, июнь, сентябрь). При этом стоит заметить, что, как и в 2020 году, так и в 2021 году высокие значения наблюдались в следующих районах Балтийского моря: Финский

залив, Рижский залив, Куршский залив, Гданьский залив, побережье Ботнического залива и в районе Датских проливов (до 64 мг/м³). Надо отметить, что существенные колебания концентраций хлорофилла «а» происходят преимущественно у берегов (10-64 мг/м³), нежели в открытых районах Балтийского моря. Возможно, это связано с завышением значений стандартными алгоритмами MODIS, вследствие наличия в прибрежных районах большого количества взвешенных веществ, которые приходят с речным стоком.

На диаграмме Хофмоллера для температуры поверхности Балтийского моря можно выделить, что максимум температуры в теплый сезон приходится на 53-54° с.ш. (24-27°C), а минимум в холодный период на 60-64° с.ш. (0-3°C).

При анализе диаграммы Хофмоллера можно выделить широты, где значения концентрации хлорофилла «а» были максимальны во все года: 54°с.ш. (20-64 мг/м³), 59,5-60,5°с.ш. (20-40 мг/м³), 63,5°с.ш. (15-30 мг/м³). Минимум значений приходится на 66°с.ш. (<1 мг/м³).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. HELCOM. Eutrophication status of the Baltic Sea 2007-2011. A concise thematic assessment. Baltic Sea Environment Proceedings. 2014. № 143. 41p.
2. Rönnerberg C., Bonsdorff E. Baltic Sea eutrophication: are-specific ecological consequences. In: Kautsky H., Snöijs P. (eds) 17th BMB Symposium. Kluwer, Stockholm. 2004. pp. 227-241.
3. Schiewer U. Ecology of Baltic coastal waters. Springer-Verlag, 2008. 430 pp.
4. HELCOM. Development of tools for assessment of eutrophication in the Baltic Sea // Baltic Sea environmental proceedings. 2006. № 104. 64 p.
5. Буканова Т. В. Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным. – 2014.
6. Baltic Marine Environment Protection Commission. First Baltic sea pollution load compilation. Helsinki Commission. //Baltic Sea Environ. Proc. 1987. № 20. 56 p.
7. Копелевич О. В., Костяной А. Г. Использование биооптических параметров океана, определяемых по спутниковым данным, в качестве основных климатических переменных //Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – Т. 3. – С. 8-29.
8. Орадовский С.Г., Кузнецова И.М., Игнатченко А.В. и др. Основные результаты экологических исследований открытой части Балтийского моря в мае 1991 г. // Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 1991 год: сб. науч. тр. ВНИИГМИ-МЦД. Обнинск.: 1992. С. 220-242.
9. Добровольский А.Д., Залогин Б. С. Моря СССР // Издательство МГУ. 1982. С. 43-50.
10. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 3. Балтийское море // Под ред. Ф.С. Терзиева, В.А. Рожкова, А.И.Смирновой. Вып. 1.

Гидрометеорологические условия. Т. 3, вып. 1.–СПб.:

Гидрометеоиздат, 1992.–447 с.

11. Кабелкайте Ю.А. Экологические проблемы и международное сотрудничество в регионе Балтийского моря // Журнал "География". Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова.
12. Балтийского моря климат – Балтийское море. Морфология бассейна, климат, осадки, соленость. Содержание кислорода и фосфатов. Экономическое использование района. [Электронный ресурс]; <https://adijuhpalace.ru/raznoe/baltijskogo-morya-klimat-baltijskoe-more-morfologiya-bassejna-klimat-osadki-solenost-soderzhanie-kisloroda-i-fosfatov-ekonomicheskoe-ispolzovanie-rajona-stranica-2.html>
13. Евтушенко Н.В., Шеберстов С.В. Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования циклов цветения фитопланктона в Балтийском море. 2016.
14. Thamm R., Schernewski G., Wasmund N., Neumann T. Spatial phytoplankton pattern in the Baltic Sea. Coastline Reports // Baltic Sea Typology. 2004. No. 4. P. 85–109.
15. Kahru M, Elmgren R. Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // Biogeosciences. 2014. V. 11. P. 3619–3633.
16. Hobro R. Stages of annual zooplankton succession in the Asko area (northern Baltic sea) // Acta Bot. Fennica. 1979. No. 110. P. 79–80.
17. Дистанционное зондирование земли : учеб. пособие / Е. Н. Сутырина. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.

18. MODIS. [Электронный ресурс]/Компания «Сканекс» - Электронные текстовые данные. – Режим доступа <https://www.scanex.ru/data/satellites/terra-aqua-modis/>, свободный.
19. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD). Version 3.3, 1999.
20. Лаврова О. Ю. и другие. Комплексный спутниковый мониторинг морей России, 2011.
21. Darecki M., Stramski D. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea // Remote Sensing of Environment. 2004. P. 326-350.
22. Kutser T. Passive optical remote sensing of cyanobacteria and other intense phytoplankton blooms in coastal and inland waters // International Journal of Remote Sensing. 2009. V. 30(17). P. 4401-4425.
23. Darecki M., Ficek D., Krężel A., Ostrowska M., Majchrowski R., Wozniak S., Bradtke K., Dera J., Wozniak B. Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 2: Empirical validation // OCEANOLOGIA. 2008. V. 50(4). P. 509-538.