Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Пространственно-временная изменчивость биомассы фитопланктона Финского залива под влиянием абиотических факторов

Исполнитель Рудич Анна Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«___» _____ 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

Содержание

		стр.
	Введение	3
1	Финский залив	5
1.1	Физико-географическая характеристика	5
1.2	Гидрохимический режим	12
1.3	Фитопланктон	19
1.4	Спутниковые методы определения хлорофилла	21
2	Материалы и методы исследования	23
2.1	Характеристика исходных данных	23
2.2	Методы исследования	27
3	Изменчивость концентрации хлорофилла «а», как характеристика пространственно-временной изменчивости биомассы фитопланктона Финского залива	32
3.1	Внутригодовая и межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла «а»	32
3.2	Оценка уровня эвтрофирования вод залива	40
	Заключение	46
	Список литературы	48
	Приложение А. Температуры поверхности океана, концентрации хлорофилла «а», карты полей цветения	52
	Приложение Б. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX	59

Введение

Финский залив является одной из самых эвтрофированных акваторий Балтийского моря. Эвтрофикация в свою очередь является важнейшим процессом в формировании экосистемы водоема. Происходит перенасыщение акватории биогенными элементами, что сопровождается ростом биологической продуктивности водных масс.

Фитопланктон является начальным звеном пищевой цепи, а также основным «производителем» кислорода в ходе фотосинтеза. Это делает его ключевым звеном водной экосистемы. Одновременно фитопланктон является естественным индикатором состояния морской среды. Изучение его распространения и изменчивости – это важная составляющая адекватной оценки биологической продуктивности водоема. Однако данные о биомассе фитопланктона, даже для такого хорошо исследованного водоема, как Финский залив, мало доступны. В тоже время в открытых базах данных широко представлены результаты спутниковых наблюдений за концентрацией хлорофилла «а» – одного из основных пигментов фотосинтезирующих организмов.

Целью данной работы являлось изучение пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла «а», как косвенной характеристики биомассы фитопланктона, под влиянием абиотических факторов в акватории Финского залива в 2010-2020 годах.

В рамках выполнения работы решались следующие задачи:

– на основании опубликованных источников дать краткую физико-географическую характеристику Финского залива, в том числе гидрологического и гидрохимического режимов;

– изучить фитопланктонное сообщество залива и методы спутникового мониторинга, применяемые для его исследования;

– используя открытые базы данных, собрать информацию о концентрации хлорофилла «а», как косвенной характеристики биомассы фитопланктона, и об абиотических факторах, влияющих на развитие фитопланктона;

– выполнить анализ межгодовой и внутригодовой изменчивости концентрации хлорофилла «а» по данным спутникового мониторинга, сопоставив с изменчивостью тепловых условий;

– проанализировать пространственную изменчивость концентрации хлорофилла «а» по данным экспедиционных исследований и сопоставить ее с результатами расчета индекса трофности вод залива.

1 Финский залив

1.1 Физико-географическая характеристика

Финский залив (фин. Суомен-Лахти) является одним из крупнейших заливов Балтийского моря (рисунок 1.1), самый восточный рукав Балтийского моря, расположен между Финляндией (север) и Россией и Эстонией (восток и юг). [1]

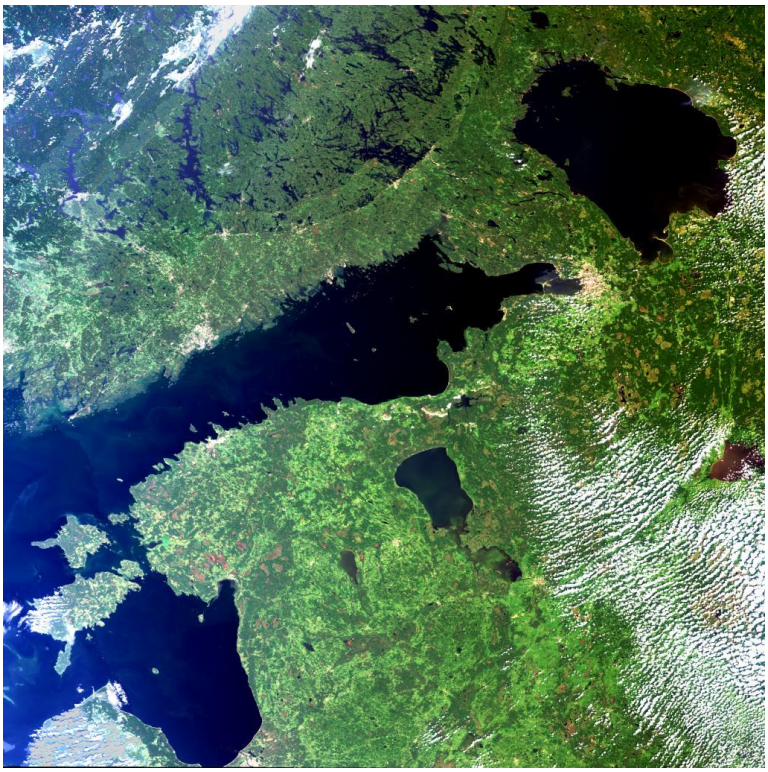


Рисунок 1.1 Финский залив, снимок спутника MERIS, 17.07.2003[1]

Его протяженность с запада на восток составляет 420 км.На востоке залив глубоко вдается в сушу, с севера на восток его протяженность составляет от 19 до 130 км.Международная гидрографическая организация определяет западную границу Финского залива в виде линии, идущей от Спитами (59°13'N) в

Эстонии через эстонский остров Осмуссаар с юго-востока на северо-запад и до юго-западной оконечности полуострова Ханко (22°54'E) в Финляндии. Максимальная глубина (до 115 м)характерна для западной части залива. [2]

В Финский залив впадают реки Нева, Нарва, Луга и другие, а также Сайменский канал. В акватории залива расположены залив крупные острова Гогланд (Сур-сари, или Хогланд), Лавансари (Мощный) и Котлин (Кронштадт) и ряд малых островов. Залив является важным судоходным маршрутом для его основных портов: Порккала, Хельсинки и Котка в Финляндии; Выборг, Приморск, Высоцк, Луга, Санкт-Петербург и Кронштадт в России; и Таллинн в Эстонии. [3]

Восточная (российская) часть залива по своим гидрохимическим и биологическим особенностям делится на два естественных района – пресноводная Невская губа и солоноватоводная восточная часть Финского залива. Открытые воды залива можно разделить на более глубокие западные (к западу от Гогланда) и более мелкие восточные (к востоку от Гогланда) части.[4]

Невская губа является мелководным полузамкнутым водоемом, его средняя глубина составляет около 4 м. Находится она в месте впадения р.Невы в Финский залив, её площадь составляет около 400 км^2. Границей Невской губы на западе является линия защитных сооружений г.Санкт-Петербурга от наводнений Лисий Нос – Кронштадт – Ломоносов.

Впадая в залив, р.Нева образует дельту с устьевым баром – Невское взморье, который является системой отмелей, разделенных фарватерами: Елагинский, Петровский, Галерный, Корабельный и Гребной, которые являются продолжением рукавов дельты. Южнее находится искусственно созданный Морской канал, соединенный судоходным каналом с пассажирским портом «Морской фасад», построенным на намывных территориях Васильевского острова.

Береговая линия восточной части Финского залива достаточно извилиста. На юге расположены Копорская и Лужская губы, а также Нарвский залив. На

севере расположен Выборгский залив, усеянный островами, мелководными банками, а также глубоко врезанными бухтами. Большая часть берега шхерного типа. Острова также есть и в открытых участках залива, крупнейшими из них являются: на востоке о.Котлин, острова Гогланд и Б. Тютерс на западе, о.Сескар и о.Мощный в центральной части. Рельеф дна Финского залива разнообразен, присутствует большое количество прибрежных и островных отмелей, рифов и банок. В направлении с востока на запад глубина залива увеличивается, в районе о.Гогланд она достигает 75 м. Средняя глубина восточной части Финского залива оставляет примерно 25 м. [5]

Восточную часть Финского залива можно разделить на два района по морфометрическим особенностям. Длина мелководного района – от створа мыс Шепелевский – мыс Флотский – составляет 46 км, максимальная ширина достигает 28 км. Здесь преобладают глубины от 10 до 30 м. Западнее указанного выше створа начинается глубоководная зона, акватория резко расширяется, в некоторых местах до 120-130 км. В открытых участках-глубины зачастую превышают 30 м, достигая 60-70 м у западной границы района. Вершина Финского залива (в данном случае речь идет об акватории восточнее о.Гогланд) принимает более 100 км^3 пресной воды. По различным данным объём материкового стока в Балтийское море составляет около 440-490 км^3.Это говорит о том, что на данный участок акватории Балтики, составляющий около 3% от общей площади моря, приходится практически ¼ всех речных вод, поступающих в море. [6]

Основная масса пресных вод (примерно 80 км^3 в год) вносится в Финский залив рекой Невой с востока. Отсюда появляются значительные скорости стоковых течений в Невской губе. На взморье поступающие речные воды распределяются по фарватерам и имеют струйный характер. За пределами бара поток воды становится практически однородным. Данный район можно разделить на две зоны по гидродинамическим особенностям: зона транзита невских вод, которая расположена в центральной части Невской губы, и зона,

занимающая акваторию южнее Морского канала и узкую полосу вдоль северного побережья – застойная и с неустойчивым течением. Скорость стоковых течений в Невской губе прямо пропорциональна расходу воды р. Нева, уменьшаясь по мере отдаления от дельты.

Далее в районе о.Котлин возникает двухслойная эстуарная циркуляция, здесь течения становятся неоднородны по глубине. Наблюдается поверхностное стоковое течение, образованное пресными водами, а также компенсационное придонное течение, которое появляется благодаря более тяжелым соленым водам из Балтийского моря. [7]

Течения Финского залива имеют циклонический характер: опресненные воды двигаются с востока на запад, как правило, вдоль северного берега, соленые морские воды – с запада на восток, в основном, вдоль южного берега. Суммарные течения в Невской губе и в остальной части Финского залива очень изменчивы и зависят от таких факторов, как направление и сила ветров, колебания уровня моря. [8]

Балтийский регион расположен на стыке зон морского и континентального климата. Если сравнивать с западными и южными районами Балтийского моря, для восточной части Финского залива характерен более суровый континентальный климат. Вся акватория залива зимой может покрываться неподвижными или плавучими льдами, что представляет собой серьезную проблему для судоходства. Замерзание начинается с мелководных опресненных участков залива, в первую очередь с Невской губы. Далее оно постепенно распространяется на запад, где находятся открытые глубоководные районы.

Ледовые условия варьируются в зависимости от года и суровости зим. Площадь неподвижного ледового покрова составляет от 27 до 100%. Мелководный восточный район льдом покрывается ежегодно. Глубоководная акватория на западе покрывается сплошным ледовым покровом лишь в суровые зимы. Ледостав в вершине Финского залива держится в район 4-6 месяцев.

Сроки замерзания и вскрытия по всей акватории залива варьируются в достаточно широких пределах. В районе о. Гогланд продолжительность ледового периода составляет от 7 до 171 суток в разные годы. Окончательно акватория очищается ото льда в конце апреля – начале мая. Данные различия сроков замерзания определяют межгодовую изменчивость температуры, солености и других гидрохимических параметров вод глубоководной зоны Финского залива, а также имеют огромное влияние на биологическую составляющую.[9]

Основную роль в понижении температуры воды в осенне-зимний период играют вертикальное и конвективное перемешивание. В восточной части Финского залива наблюдается сохранение более высокой температуры глубинных вод во время суровых зим. Причиной этого является то, что во время суровых зим Финский залив находится под влиянием отрога сибирского антициклона, преобладают восточные ветры, сгоняющие поверхностные опреснённые воды в западную часть акватории. Следовательно, увеличивается компенсационный приток более теплых морских вод по дну залива. Так как присутствующие восточные ветры относительно слабые, они не способствуют глубокому перемешиванию вод. Замерзание происходит в ранние сроки, вследствие чего, перемешивание совсем прекращается, что препятствует дальнейшему охлаждению толщи воды. Весной, после таких зим, температура воды на глубине 30 м может превышать 2 °C. [10]

В малоледные и мягкие зимы степень и глубина охлаждения водных масс максимальна. Во время мягких зим над заливом преобладают воздушные массы атлантического происхождения, господствуют сильные западные ветры. Благодаря этому происходит нагон поверхностных вод на восток, и, соответственно, отток придонных водных масс на запад. При этом происходит и глубокое ветровое перемешивание, и конвекционное, в результате чего слой водной массы до 30-50 м может охладиться до отрицательных температур. После вскрытия и очищения залива ото льда начинается прогрев

поверхностного слоя воды, распространяясь с востока на запад, от прибрежной полосы к открытым участкам залива. [9]

В связи с небольшими глубинами и высокими скоростями стоковых течений Невской губы, на данном участке происходит постоянное перемешивание всей водной толщи, что приводит к гомотермии. В более глубокой части акватории устанавливается термическая стратификация. Также весной и в начале лета здесь наблюдается дихотермия – явление, характерное для Балтики – наличие холодного промежуточного слоя, имеющего наиболее низкую температуру, между поверхностным и придонным слоями воды.[10]

В летние месяцы, благодаря дальнейшему прогреву акватории и ветрам, наблюдается разрушение данного слоя. Летний прогрев способствует повышению температуры воды на глубинах до 20-30 м. Глубже температура практически не меняется, сохраняется холодный слой в течение всего лета. Температура данного слоя зависит от типа предшествующей зимы, а именно от интенсивности вертикальной зимней конвекции. Повышение температуры глубинного слоя происходит осенью, благодаря конвективному и турбулентному перемешиванию, что происходит вследствие охлаждения поверхностных вод и усиления ветров, в результате чего устанавливается гомотермия.

Степень и время прогрева осенью отличается в зависимости от года. На глубине 30 м температурный максимум наблюдается в конце октября, на глубине 40 м в первой половине ноября, на более глубинных слоях в еще более поздние сроки. Далее. С развитием конвекции в конце осени и зимой происходит быстрое охлаждение всей толщи воды.

Распределение солености определяется стоком р. Нева, а также общей циркуляцией вод. В целом, соленость увеличивается с глубиной и в направлении с востока на запад, кроме того для южной части акватории характеры более высокие показатели, чем на севере. Невская губа, благодаря речному стоку, заполнена пресными водами. Вблизи о. Гогланд в летний

период соленость составляет 3-4 ‰ на поверхности. Ближе ко дну соленость увеличивается с 5 ‰ на востоке до примерно 10 ‰ на западе. В восточной части Финского залива глубина залегания пикноклина обусловлена вертикальным распределением температуры и солености, зоны резкого скачка которых (термоклин и галоклин) обычно совпадают или они находятся на близкой глубине. Сила галоклина изменяется как во времени, так и в пространстве, являясь наиболее сильной и стабильной в западной части залива.

Подавляющая часть придонных вод является физиологически наименее благоприятной для водных животных, так как для нее характерна так называемая критическая соленость 5-8 ‰. Происходит резкое расслоение водного массива по солености в течение подавляющей части года в связи со значительным притоком пресной воды. С развитием осенней циркуляции данное расслоение нарушается. Зимой наблюдаются крайне низкие показатели солености в узком поверхностном слое подо льдом (0,2-0,4 ‰), пресные воды перемещаются по подстилающему их слою соленых вод, обладая меньшим удельным весом. [11]

Весной и летом стратификация сохраняется. Часто происходит совпадение зоны наиболее резких температурных скачков с зонами резкого изменения солености. Сезонные изменения солености в поверхностных и придонных горизонтах диаметрально противоположны. У дна соленость, как правило, уменьшается с весны до зимы в связи с ветровым перемешиванием, а на поверхности, наоборот, растет. Происходит это до замерзания залива. После ледостава соленость поверхностных вод снижается на 2,5 ‰, параллельно с этим соленость придонных вод увеличивается на 0,6-2,0 ‰ в сравнении с безледным периодом. [10]

Также, наряду с сезонными, присутствуют резкие и сильные непериодические колебания температуры воды и солености, которые связаны с развитием прибрежного апвеллинга, а также со сгонно-нагонными явлениями. При нагонных (западных) ветрах на поверхности соленость повышается, у дна

уменьшается. При сгонных (восточных) ветрах наблюдается обратная ситуация. Существенную роль сгонно-нагонные колебания играют, прежде всего, в практически пресноводных восточных районах, куда эпизодически проникают солоноватые (до 5 ‰) воды из западных участков залива. При экстремально сильных восточных ветрах возможна интрузия осолонённых вод в Невскую губу по дну Морского канала. Происходят, в том числе, и значительные межгодовые и многолетние колебания солености, которые связаны с крупномасштабными гидрологическими процессами в Балтийском море. [10]

1.2. Гидрохимический режим

Основные характеристики Финского залива представлены в таблицах 1.1, 1.2, 1.3 [12]

Таблица 1.1. Климат и гидрология

Температура воздуха, °C	+3,7°C
Температура воды, °C	От 0 до +15°
Ледовое покрытие, дней в год	40-130
Усредненные осадки, мм $г^{-1}$	643
Средний приток пресной воды, $10^6 м^3 г^{-1}$	114000
Средний приток, $10^6 м^3 г^{-1}$(из Балтики)	480000
Средний общий отток, $10^6 м^3 г^{-1}$	600000
Время удержания, дней	700-1000

Таблица 1.2. Морфометрия и отложения

Площадь, $км^2$	29600
Объем, $км^3$	1100
Средняя глубина, м	38

Максимальная глубина, м	123
Водосборная зона, км^2	412900
Соотношение площадь/водосборный бассейн	0,072
Содержание органических веществ, %	17.6 (поверхность отложений)

Таблица 1.3. Биологические компоненты.

Диск Секки, глубина, м	4 (суммарная)
Бактерии, 10^6мл$^{-1}$	0,4-6,6
Биомасса фитопланктона, мгChl a 1^{-1}	Суммарная 3-10
Биомасса фитопланктона, мгChl a 1^{-1}	Весенний максимум 20-80

Насыщению кислородом поверхностных вод залива способствует значительная интенсивность ветрового режима. Аэрация нижележащих слоев зависит от глубины конвекционного и ветрового перемешивания. Поступление богатых кислородом речных вод в Невскую губу, а также интенсивное вертикальное перемешивание водных масс, обеспечивают благоприятный кислородный режим по всей водной толще от поверхности до дна в ее пределах. [11]

Термическая и соленостная стратификации ограничивают циркуляцию воды в восточной части Финского залива. Из-за относительно застойного глубоководного слоя кислородные условияобычно самые плохие в среднем и западном районах залива. Здесь можно обнаружить хорошо выраженные линейныекорреляционные связи между придонной соленостью, кислородом и давлением. В более мелководном восточном регионе роль местных условий более важна, чем гидрографические условия, обусловленные непосредственной связью с собственно Балтийским морем. Концентрация кислорода уменьшается с глубиной.Особенно это уменьшение заметно в слое температурного скачка.

Летом с опусканием термоклина постепенно опускается и слой резкого изменения концентрации растворенного кислорода. Осенью и особенно зимой (до ледостава) с развитием конвекции аэрируются все более глубокие горизонты воды, и содержание кислорода выравнивается от поверхности до дна. Поскольку летний прогрев в основном ограничен лишь глубинами 20–30 м, интенсивность осенне-зимнего перемешивания влияет на степень насыщения кислородом более глубоких вод в течение весны и лета. [10]

Максимальная концентрация отмечается после мягких малоледных зим. Напротив, после суровых зим из-за раннего замерзания и слабого перемешивания глубинные воды бедны кислородом. Таким образом, на большей части акватории глубоководной зоны содержание растворенного кислорода у дна в течение значительного времени года определяется типом предшествующей зимы. В остальные сезоны имеет место только расход запасов кислорода, накопленных в осенне-зимний период. Следствием этого является возникновение дефицита кислорода у дна в конце лета — начале осени, в некоторые годы развивается гипоксия.

Вершина Финского залива — один из наиболее эвтрофированных регионов Балтийского моря. Наряду со значительной внешней биогенной нагрузкой с огромного и достаточно густонаселенного водосбора, существенный вклад в поступление биогенных элементов в залив вносят внутриводоемные процессы: вынос из донных осадков и транспорт из более западных районов залива с придонными течениями. При этом большое значение имеют кислородные условия придонных вод. В частности гипоксийные явления сопровождаются увеличением концентрации фосфатов, вследствие их выхода из донных отложений. [4]

Вертикальное распределение биогенных элементов тесно связано с температурной и соленостной стратификацией. При гомотермии в осенне-зимнее время наблюдается равномерное распределение биогенных веществ в водной толще. В вегетационный период вследствие интенсивных

продукционных процессов в верхнем перемешанном слое количество минеральных соединений азота и фосфора ничтожно мало. В слое термоклина происходит резкое возрастание концентраций, достигающих максимальных значений у дна.

Балтийское море получает чрезмерное количество фосфора (P) и азота (N), что проявляется в неприятном цветении водорослей, мутности, недостатке кислорода в придонных водах. Финский залив является одним из наиболее сильно загруженных суббассейнов Балтийского моря, где удельные нагрузки по N и P в два-три раза выше, чем во всей Балтике. Финский залив получает наземные питательные вещества изтрех соседних стран: Эстонии, Финляндии и России. В дополнение к этому атмосферное осаждение, происходящееиз других стран в дополнение к этим трем, а также из судоходства.[13]

Невская губа характеризуется высоким содержанием растворенных органических веществ, основная масса которых поступает со стоком р. Невы (15% от общего стока рек). Другой крупнойтрансграничной рекой является Нарва, около 63% ее водосборной площади расположено в России, 31% - в Эстонии и 7% - в Латвии. Площадь водосборного бассейна Финского залива почти в 14 раз превышает его площадь, чтоприводит к высокой нагрузке питательных веществ, попадающих в акваторию, по отношению к его площади и объему. Концентрация их, в целом, убывает с востока на запад. [13]

В восточной части Финского залива в период летней стратификации наибольшее содержание органических веществ отмечается в поверхностных опресненных слоях воды. Осенью в результате перемешивания содержание органических веществ выравнивается по всей водной толще. [7]

Вершина Финского залива является зоной активной седиментации. Скорость осаждения сестона убывает в направлении с востока на запад и в среднем в открытых районах восточной части Финского залива составляет приблизительно 150 г/м^2 сухого вещества или 8 г Сорг/м^2 в год, что примерно

в 1,5–2 и более раза выше, чем в западной части залива и в других районах Балтийского моря.[14]

Илы окрашены в серые, бурые, темно-серые и черные тона, часто имеют запах сероводорода. Наиболее типичен следующий тип донных осадков. На поверхности субстрата находится слой полужидкого — на долю воды приходится 88% — окисленного ила коричневого цвета, толщиной обычно несколько сантиметров; ниже тонкий слой серо-зеленого, а затем черного ила. Коричневый цвет обусловлен наличием гидроокислов железа и марганца, мощность его определяется глубиной проникновения аэрированных вод в толщу грунта. Черная окраска нижележащих слоев связана с присутствием в них сульфида железа, и указывает на восстановительные условия.[4]

Толщина верхнего окисленного слоя изменяется по годам и сезонам в зависимости от степени насыщения придонных вод кислородом. Осенью с развитием вертикальной циркуляции мощность коричневого слоя увеличивается по сравнению с периодом летней стагнации. При сильном дефиците кислорода черный слой может вплотную прижиматься к поверхности субстрата. Тонкая верхняя пленка серого или коричневого цвета в этом случае почти не заметна, и вся проба грунта выглядит как сплошной монолит черного цвета. При этом обычно отмечается запах сероводорода.

На поверхности донных осадков глубоководной зоны (особенно на коричневых илах) часто имеет место усиленное накопление железа и марганца в виде конкреций. Скоплениями конкреций усеяны огромные площади дна восточной части Финского залива. Запасы их здесь достигают колоссальных величин. [4]

Химический состав грунтов тесно связан с их гранулометрическим составом. Содержание карбонатов во всех типах донных осадков крайне незначительно: в пересчете на карбонат кальция оно на большей части акватории не превышает 1%. Количество органического углерода также

сравнительно невелико. В зависимости от характера грунта оно колеблется в пределах 0.3–6.0%.

Накопление органических и биогенных веществ, в основном, идет в прямой зависимости от доли мелкой фракции в грунте. Наиболее бедны ими грубозернистые осадки мелководной зоны, а также ледниковые глины. Максимальное количество органических веществ (4– 6 % $C_{орг}$) содержится в илах. Питательная ценность илов, однако, невысока, поскольку органическое вещество в них представлено преимущественно стойкими трудноразлагаемыми соединениями (гуминовые вещества, битумы).

Относительное содержание соединений азота в органическом веществе осадков невелико. Среднее отношение углерода к азоту (C/N) составляет около 11. Все это говорит о преобладании аллохтонного материала в органическом веществе грунтов восточной части Финского залива.

Донные отложения богаты фосфором (до 0.57%). Значительная часть фосфора приходится на долю легкоподвижных минеральных соединений, что отмечалось еще в первых исследованиях химического состава грунтов вершины Финского залива. Накопленные в осадках запасы фосфора представляют значительную опасность для экосистемы, как источник внутренней биогенной нагрузки. [13]

Необходимо отметить, что в последние годы происходят существенные изменения химического состава донных осадков восточной части Финского залива, в частности заметно снижается содержание органических веществ, что связано с изменением биогеохимических процессов после вселения чужеродных полихет *Marenzelleria arctia*[15]

Финский залив, в особенности эстуарий реки Невы, в устье которой расположен самый крупный на побережье Балтийского моря город — Санкт-Петербург, уже долгие годы подвергается разнообразным видам антропогенного воздействия (сброс сточных вод, дноуглубительные работы, дампинг, строительство гидротехнических сооружений). Это обусловило

существенное загрязнение прибрежных районов Финского залива, особенно в местах интенсивного судоходства (судоходные фарватеры, якорные стоянки), а также в зонах пониженного водообмена, где накапливаются загрязняющие вещества.

В целом по данным геохимических исследований и биотестирования, донные отложения открытых участков залива, удаленных от устья р. Невы и локальных источников загрязнения, характеризуются хорошим качеством и слабой токсичностью. [15]

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что наиболее характерной особенностью гидрологического режима восточной части Финского залива является выраженная обособленность поверхностных и глубинных вод в течение всего вегетационного периода из-за устойчивой стратификации водной толщи. Благодаря этомубенталь залива четко разделяется на две зоны с различными условиями среды. Граница между ними определяется максимальной глубиной залегания летнего термоклина (примерно 20–30 м). Мелководные участки, особенно в местах поступления материкового стока (район о. Котлин, Лужская и Копорская губы, Выборгский залив), заполнены сильно опресненной и, как правило, хорошо аэрированной водой. Летом отмечается значительный прогрев воды (до 20°С). Наиболее типичны для этой зоны грубозернистые донные осадки. Для придонных вод открытых глубоких (от 20–25 до 75 м) районов характерны почти круглогодично низкая (меньше 5 °С) температура воды, более высокая «критическая» (5–8 ‰) соленость и, часто, пониженное содержание кислорода вплоть до развития гипоксии в отдельные годы. Преобладающим типом донных осадков в глубоководной зоне являются илы.

1.3 Фитопланктон

Фитопланкто́н— растительная часть планктона, распространенного в слое воды (в Мировом океане составляет в среднем 200 м), получающем солнечную энергию (эвфотическая зона).[16] Представляет из себя одноклеточные микроскопические растительные организмы размером от 1 мкм до 1 мм. Фитопланктон — основной первичный продуцент органические вещества в водоемах, за счет которого существуют водные гетеротрофные организмы, является начальным звеном пищевой цепи.

Осуществляет процесс фотосинтеза. Служит пищей для зоопланктона и зообентоса.Его размножение вызывает «цветение воды».

Морской фитопланктон включает представителей многих групп водорослей: диатомовых (*Bacillariophyta*), динофлагеллят (*Pirrophyta*), кокколитофорид (*Coccolithus*), кремнежгутиковых (*Silicoflagellata*), криптомонад (*Cryptophyta*), хризомонад (*Chrysophyta)*, зелёных (*Chlorophyta*) и сине-зелёных (*Cyanophyta*) водорослей. Из них первые три группы обычно преобладают в морских биоценозах.[21]

В состав морского фитопланктона входят различные организмы: автотрофные (фотосинтезирующие), гетеротрофные (использующие растворенное органическое вещество) и фаготрофные (питающиеся отдельными частицами). По численности в основном преобладают автотрофные организмы, которые имеют хлорофилл.[21]

Цветения азотфиксирующих цианобактерий в Балтийском море происходят ежегодно в конце лета (июль-август). В составе цветений их доминантными видами являются токсигенные *Nodularia spumigena* и *Aphanizomenon flos-aquae*. Этому благоприятствует оптимальное для этих видов низкое отношение растворенных соединений азота к концентрации фосфора в Балтийском море.Как правило, цианобактериальное цветение воды

сопровождается выделением и накоплением биологически активных веществ и токсинов, представляющих опасность для человека и животных. [17]

Для мелководной зоны Финского залива, находящейся под влиянием стока р.Невы и Невской губы, характерен пресноводный озерный тип фитопланктона.[18]

В водах южного побережья Финского залива обнаружено 154 вида и внутривидовых таксона, представляющих различные группы центрических и пеннатных диатомовых водорослей. Преобладают представители бентосных группировок, большая численность эпифитов и эпипелитов. Благодаря специфичному обмену водных масс акватории в бентосе южного побережья Финского залива в пределах заказника «Лебяжий» одновременно встречаются сугубо пресноводные, солоноватоводные и морские виды. Поступление вод из болотистых мест и мест, богатых родниками, приводит к тому, что в альгофлоре присутствуют виды, типичные для этих местообитаний.[19]

Золотистые водоросли (*Chrysophyceae*) встречаются в водоемах различного типа, но преимущественно это пресноводные холодолюбивые организмы. Их характерной особенностью является способность формировать покоящиеся кремнистые стадии (стоматоцисты), обеспечивающие их выживание в суровых условиях севера. Некоторые виды золотистых могут вызывать токсичные “цветения” в водоемах, в том числе и подледные.[20]

Жёлтозелёные водоросли (лат. *Xanthophyceae*, или *Xanthophyta*) также присутствует в акватории Финского залива. Хлоропласты данного вида водорослей окрашены в желто-зеленый и желтый цвета. Представителями данного класса являются по большей части пресноводные организмы.[21]

Благодаря процессу фотосинтеза водоросли имеют свойство поглощать и накапливать солнечную энергию в форме органических соединений, при этом выделяя кислород, который жизненно необходим не только самим водорослям, но и остальным обитателям водоема. При этом синтезированная органика служит источником энергии гетеротрофным организмам - бактериям,

животным и т.д. В связи с этим свойства фитопланктонного звена экосистемы определяет её состояние. Численность, биомасса, таксономический состав, физиологическая активность фитопланктона позволяют сделать выводы о благополучии водоёма или его кризисном состоянии.[22]

Распространение фитопланктона по акватории варьируется в зависимости от метеорологических и гидрологических условий,таких как температура воды, освещенность, глубина, концентрация биогенов и растворенного кислорода, а также лимитируется антропогенным воздействием.

1.4 Спутниковые методы определения хлорофилла

Фитопланктон является первичным звеном трофической цепи гидроэкосистемы. Его концентрацию можно определить через количество фотосинтезирующего пигмента – хлорофилла, который обладает свойством переизлучать поглощенную энергию света, а именно флуоресцировать. Измеряя флуоресценцию фитопланктона, можно рассчитать концентрацию хлорофилла (Chl) у микроводорослей трех основных таксонов: сине-зеленых, диатомовых и зеленых, обладающих различиями пигментного аппарата и спектров возбуждения флуоресценции.

Данные о концентрации Chl являются одним из основных параметров, используемым для оценки биологической продуктивности вод и их экологического состояния. Сезонная динамика хлорофилла совпадает с динамикой хлорофилла a. Отношение Chl c/Chl a считается показателем физиологического состояния водорослей, увеличиваясь в “стареющем” планктоне и детритном материале.[22]

Данные спутниковых сканеров цвета дают возможность рассчитать оптические характеристики поверхностного слоя воды, а также различные биохимические параметры, в том числе концентрации Chl a. [23]

При этом использование стандартных алгоритмов обработки спутниковых данных зачастую приводит к значительным ошибкам, так как стандартные алгоритмы не учитывают специфику конкретных морей. [23]

Одной из главных причин больших ошибок стандартных алгоритмов для Балтийского моря является высокая концентрация окрашенного органического вещества, которая в свою очередь является специфической особенностью вод балтийского бассейна.[24]

Цвет морской воды, наблюдаемый из космоса и регистрируемый датчиками, определяется, главным образом, содержанием в ней фитопланктона.[21]

Концентрация Chl a является важнейшим показателем количества и распределения фитопланктона по акватории залива. В связи с этим было принято решение использовать концентрацию Chl a как главный индикатор. Для рассмотрения изменения количества фитопланктона во времени для исследования были взяты годы с 2010 по 2020 включительно. Период с апреля по октябрь был выбран в связи с наиболее высокими температурами воздуха и поверхности океана относительно внутригодовой изменчивости, а также в связи со стабильным переходом через отметку в 0 °C и отсутствии ледового покрова на акватории залива.

2.Материалы и методы исследования

2.1 Характеристика исходных данных

Для анализа был выбран вегетативный период (с 1.04 по 31.10) с 2010 года по 2020 год.

При выполнении работы использовались материалы с портала Giovanni [25].Giovanni – портал NASA, разработанный Центром данных и информационных услуг Годдарда по наукам о Земле (GES DISC), который используется для отображения и анализа геофизических параметров, полученных на основе обработки различных спутниковых снимков. Спутниковая информация находится в свободном для пользователей доступе. Пример интерфейса приведен на рисунке 2.1.

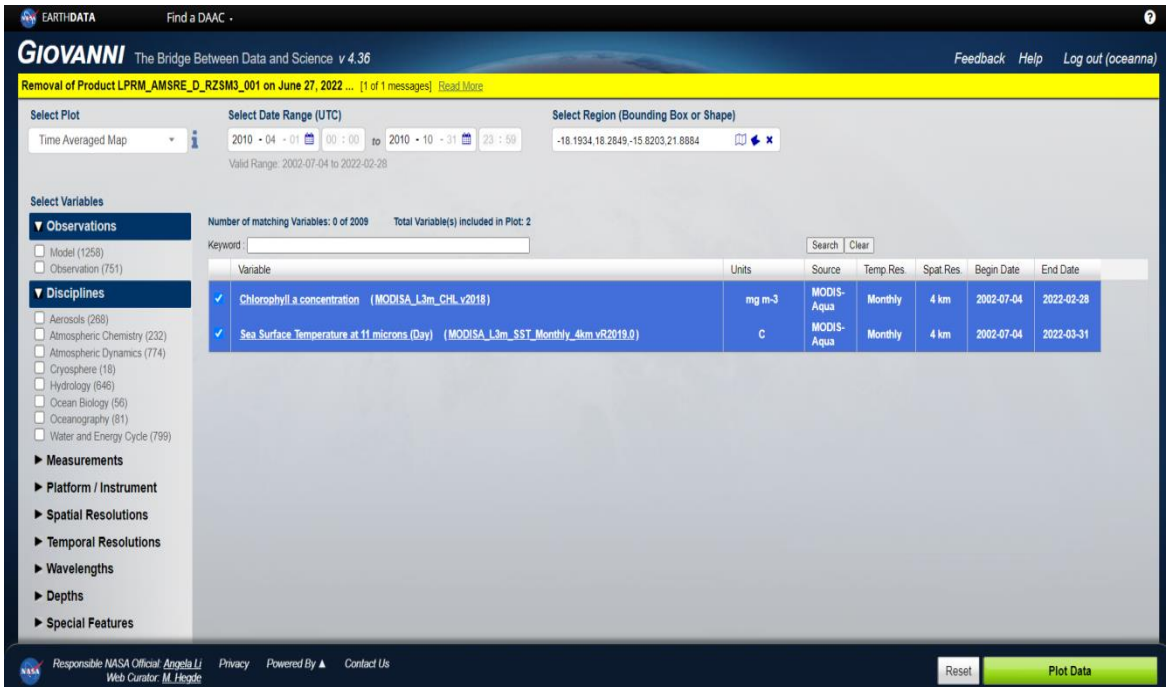


Рисунок 2.1 Интерфейс портала Giovanni.Выбор данных [25]

В работе использовались данные о поверхностной температуре океана и концентрации хлорофилла «а», полученные при помощи спутника MODIS-Aqua.

Спутник MODIS-Aqua. MODIS – спектрорадиометр с визуализацией среднего разрешения. Он является основным прибором на борту спутников Aqua (EOS PM) и Terra (EOS AM). Спутник Aqua имеет орбиту с юга на север через экватор днем. Данный спутник просматривает всю поверхность Земли каждые два дня, данные собираются в 36 спектральных диапазонах. Система MODIS имеет большое значение для понимания глобальных процессов, происходящих на всей поверхности планеты, а также в океанах и нижних слоях атмосферы. [26]

Также при выполнении данной работы использовались данные о поверхностной температуре океана, солености, концентрации биогенов и хлорофилла «а», содержании растворенного кислорода с портала Copernicus [27], которые также находились в свободном для пользователей доступе. Пример интерфейса портала Copernicus представлен на рисунке 2.2.

Рисунок 2.2 Интерфейс портала Copernicus. Выбор данных [27]

Copernicus – программа мониторинга Земли Европейского союза. На данном портале представлены данные о наблюдениях различных уровней обработки, в том числе модельные, совмещенные натурные и спутниковые наблюдения, что позволяет иметь более полную картину происходящего на поверхности Земли, а также использовать уровень обработки данных, требуемый для выполнения поставленной задачи [27].

Copernicus Marine Service – тематический поток услуг, целью которого является предоставление бесплатных открытых научно оцененных морских данных.

База данных по Балтийскому морю DAS. Также при выполнении данной работы использовались данные о натурных наблюдениях, полученные при помощи системы DAS. Пример интерфейса базы данных DAS представлен на рисунке 2.3.

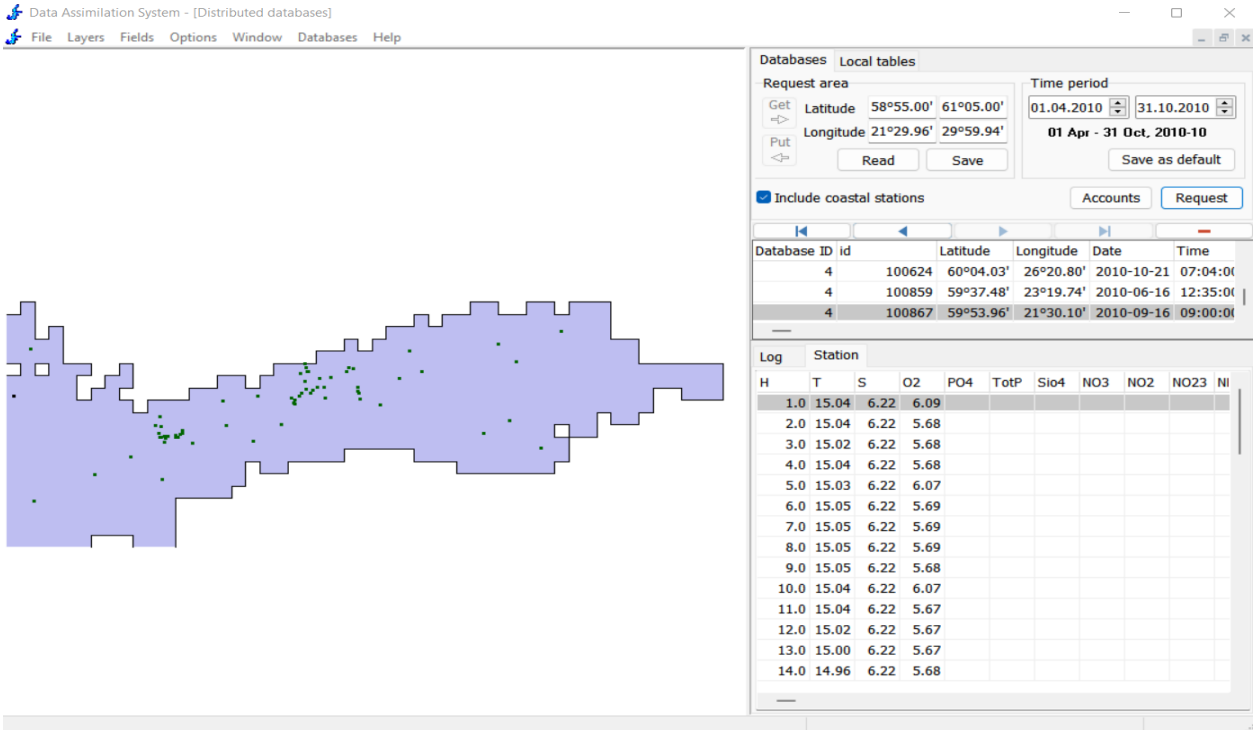


Рисунок 2.3 Интерфейс базы данных по Балтийскому морю DAS. Выбор данных [28]

DAS – Data Assimilation System (Система усвоения данных)– это компьютерное программное обеспечение, которое было разработано Стокгольмским университетом в качестве инструмента для запроса и анализа гидрографических и химических данных по Балтийскому морю. Здесь представлены данные, полученные в результате различных экспедиций [28].

Данные о среднесуточной температуре воздуха были получены с портала «Расписание погоды» (rp5). На данном портале есть в наличии архивы данных с метеостанций в свободном доступе. Дискретность – 3-6 часов, данные были осреднены до среднесуточных значений. Пример интерфейса портала «расписание погоды» представлен на рисунке 2.4.

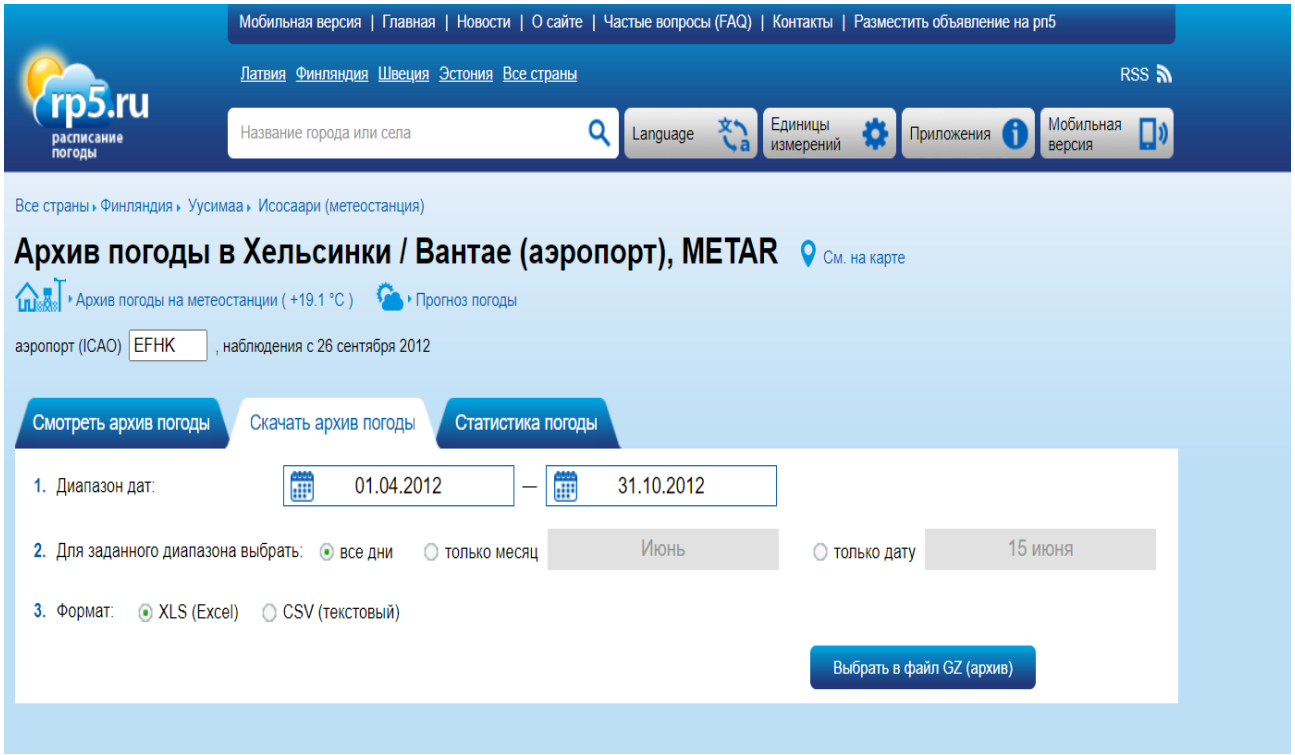


Рисунок 2.4 Интерфейс портала «расписание погоды». Выбор данных [29]

Обобщенная информация об исходных данных приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Характеристика исходных данных

№ п/п	Ряд наблюдений	Период дискретность	Источник информации
1	Средняя по акватории Финского залива концентрация хлорофилла а	29/30.03-31.10 2010-2020 гг. 8 суток	портал Giovanni
2	Средняя по акватории Финского залива температура поверхности океана	29/30.03-31.10 2010-2020 гг 8 суток	портал Giovanni
3	Температура поверхности Финского залива	01.04-31.10 2010-2020 гг 1 сутки	Портал Copernicus
4	Данные о метеоусловиях в городах Таллинн, Хельсинки, Выборг, Ломоносов	01.04-31.10 2010-2020 гг 1 сутки	Портал rp5
5	Температура, соленость концентрация Chl a, азота N, фосфора P, кислорода O_2 поверхностного слоя Финского залива	01.04-31.10 2010-2020 гг 1 сутки	Портал DAS

2.2 Методы исследования

Для анализа данных использовалось программное обеспечение Panoply [30], находящееся в свободном доступе на сайте NASA. Данное программное обеспечение используется для работы с файлами в формате .nc, который является наиболее распространенным в использовании для гидрометеорологических данных, в связи с высокой «ужимаемостью»

информации. Пример визуализации данных с использованием пакета Panoply приведен на рисунке 2.5

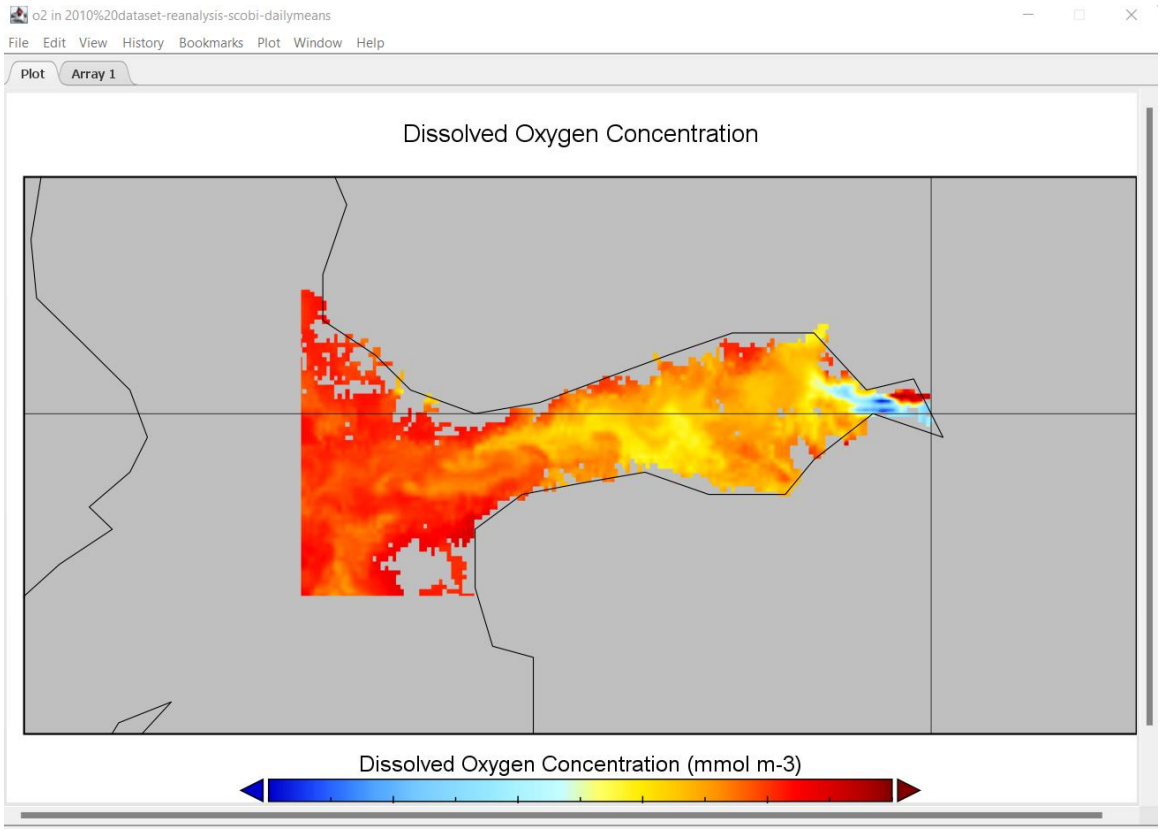


Рисунок 2.5 Интерфейс пакета Panoply [30]. Визуализация данных о содержании растворенного кислорода

Также для статистического анализа данных использовался пакет «Анализ данных» на базе MSExcel. Применялся метод корреляционного анализа для выявления линейной зависимости между анализируемыми рядами.

Линейная зависимость случайных величин наблюдается при условии, что при возрастании (убывании) одной величины, другая имеет тенденцию возрастать (убывать) по линейному закону. При этом коэффициент корреляции r характеризует степень тесноты линейной зависимости. При $r>0$ наблюдается прямая зависимость, при $r<0$ – обратная. Коэффициент детерминации r^2 показывает долю дисперсии исходного ряда, описываемую моделью регрессии[30].

Для оценки уровня трофности вод был рассчитан индекс E-TRIX. Он является функцией следующих параметров: содержания растворенного кислорода и концентрации общего фосфора, минеральных форм азота и хлорофилла «а» [32]

Концентрация хлорофилла «а» характеризует первичную продукцию фитопланктона, являясь величиной, прямо пропорциональной биомассе фитопланктона.

Расчетная формула:

$$E\text{-}TRIX=(\lg[Ch\ D\%O\ N \cdot P] + 1{,}5)/1{,}2, \quad (1)$$

где

Ch – концентрация хлорофилла «а», мкг/дм^3;

D%O – отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-го насыщения;

N – концентрация растворенной формы минерального азота, мкг/дм^3;

P – концентрация общего фосфора, мкг/дм^3.

Значения индекса E-TRIX меняются в диапазоне от 0 до 10. По значению показателя определяют уровень трофности вод:

<4 – низкий, качество вод высокое;

4-5 – средний, качество вод хорошее;

5-6 – высокий, качество вод посредственное;

6-10 – очень высокий, качество вод плохое.

Для определения отклонения в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-го насыщения были рассчитаны ряды абсолютного содержания растворенного кислорода [33], соответствующего 100% насыщению:

$$\ln C = a_1 + a_2\left(100/t\right) + a_3 \ln\left(t/100\right) + a_4\left(t/100\right) + S\left[b_1 + b_2\left(t/100\right) + b_3\left(t/100\right)^2\right], \quad (2)$$

где t – температура воды, К;

S – соленость воды, ‰;

C – абсолютное содержание растворенного кислорода (мл/л), соответствующее состоянию 100 % насыщения;

a_n, b_m – коэффициенты, приведенные в таблице 4 ($m = 1 \div 3, n = 1 \div 4$).

Величина отклонения в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-го насыщения определялась как:

$$\mathrm{D\%O} = \left(\frac{\mathrm{O}_{2\text{фактический}} - \mathrm{O}_{2\text{насыщение}}}{\mathrm{O}_{2\text{насыщение}}} \right) * 100\% \quad , \quad (3)$$

где $O_{2_{фактический}}$ – фактическое содержание кислорода (мл/л);

$O_{2_{насыщение}}$ – содержание кислорода (мл/л), соответствующее 100 % насыщению.

Таблица 2.2 Значения коэффициентов, используемых в расчетах абсолютного содержания растворенного кислорода, соответствующее состоянию 100 % насыщения

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
a1	-173,429	b1	-0,0331
a2	249,6339	b2	0,014259
	143,3483	b3	-0,0017
a4	-21,8492		

Также для определения количества накопленного тепла до момента проявления 1-го пика цветения была рассчитана такая величина, как градусо-дни тепла по формуле:

$$Q = \sum_{1}^{n} T_{\text{ср}} \tag{4}$$

где $T_{ср}$ – среднесуточная температура поверхности океана,

n – количество дней до первого пика цветения фитопланктона.

3 Изменчивость концентрации хлорофилла «а», как характеристика пространственно-временной изменчивости биомассы фитопланктона Финского залива

3.1 Внутригодовая и межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла «а»

Для анализа межгодовой и внутригодовой (в вегетативный период) изменчивости концентрации хлорофилла «а» были использованы данные спутниковых наблюдений с дискретностью 8 дней с портала системы спутникового мониторинга Giovanni (см. таблицу 2.1). Для учета влияния температуры поверхности воды на изменчивость анализируемого показателя также использовались данные спутникового мониторинга с аналогичной дискретностью. Применяя внутренние инструменты портала Giovanni, данные о температуре поверхности воды и концентрации хлорофилла «а» усреднялись для всего Финского залива.

Стоит отметить, что спутниковые методы исследования сильно завышают концентрацию хлорофилла «а», но для изучения межгодовой изменчивости системной ошибкой можно пренебречь. Внутри года динамика цветения фитопланктона отображается также не достаточно точно из-за чувствительности спутниковых наблюдений к облачности, что может привести к неверным выводам. Цветение фитопланктона в зависимости от части залива и времени года сильно варьирует по дате наступления и величине пиковых значений, что связано с неравномерным распределением благоприятных абиотических условий по акватории залива.

Рассмотрим более подробно изменчивость концентрации хлорофилла «а» внутри вегетативного периода для интервала 2010-2020 годы для акватории Финского залива.

В 2010 году первый пик цветения (рисунок 3.1б) пришелся на 23 апреля и достиг 30,3 мг/ м^3. Оценка градусодней тепла, накопленных с 1 апреля к моменту первой вспышки, как одного из показателей тепловых условий развития фитопланктона, составила 18,26 °С. Далее наблюдалось постепенное снижение концентрации хлорофилла «а». Резкие скачки значений концентрации в течение 16 дней можно объяснить тем, что спутниковые данные напрямую зависят от облачности. Например, 24 мая общая облачность составила 80-100%, что является очевидным препятствием для получения качественных данных по спутниковым снимкам. Динамика изменений температуры поверхностного слоя воды (рисунок 3.1а) характеризуется годовым температурным ходом, а также наличием температурного скачка во второй декаде мая. Так, 17 мая для обоих показателей наблюдается повышение значений до 20,4 мг/м^3 при 12,8°С.

Далее наблюдаются еще несколько пиков цветения, в первой декаде августа и 3-й декаде сентября.

Пространственное распределение интенсивности цветения в 2010 году в момент первого пика цветения представлено на рисунке 3.1в. Наибольшие концентрации хлорофилла «а» располагаются вдоль эстонского побережья. Также стоит обратить внимание на то, что спутник «не видит» прибрежную зону.

Аналогичная динамика концентрации хлорофилла «а» наблюдалась в 2011- 2015 годах и в 2019 году (см. приложение А, рисунок А.1-А.6). Первый пик цветения в основном приходится на 2-3 декаду апреля и в среднем составляет 25 мг/м^3

Далее переходим к рассмотрению существенно отличающихся годов. Из общей картины сильно выделяется 2018 год (рисунок 3.2).

Первый и самый высокий пик концентраций хлорофилла «а» приходится на 7 апреля – 26,37 мг/м^3(рисунок 3.2б), при этом сумма градусо-дней тепла составила 0,4 °С. Такое малое количество накопленного тепла объясняется тем,

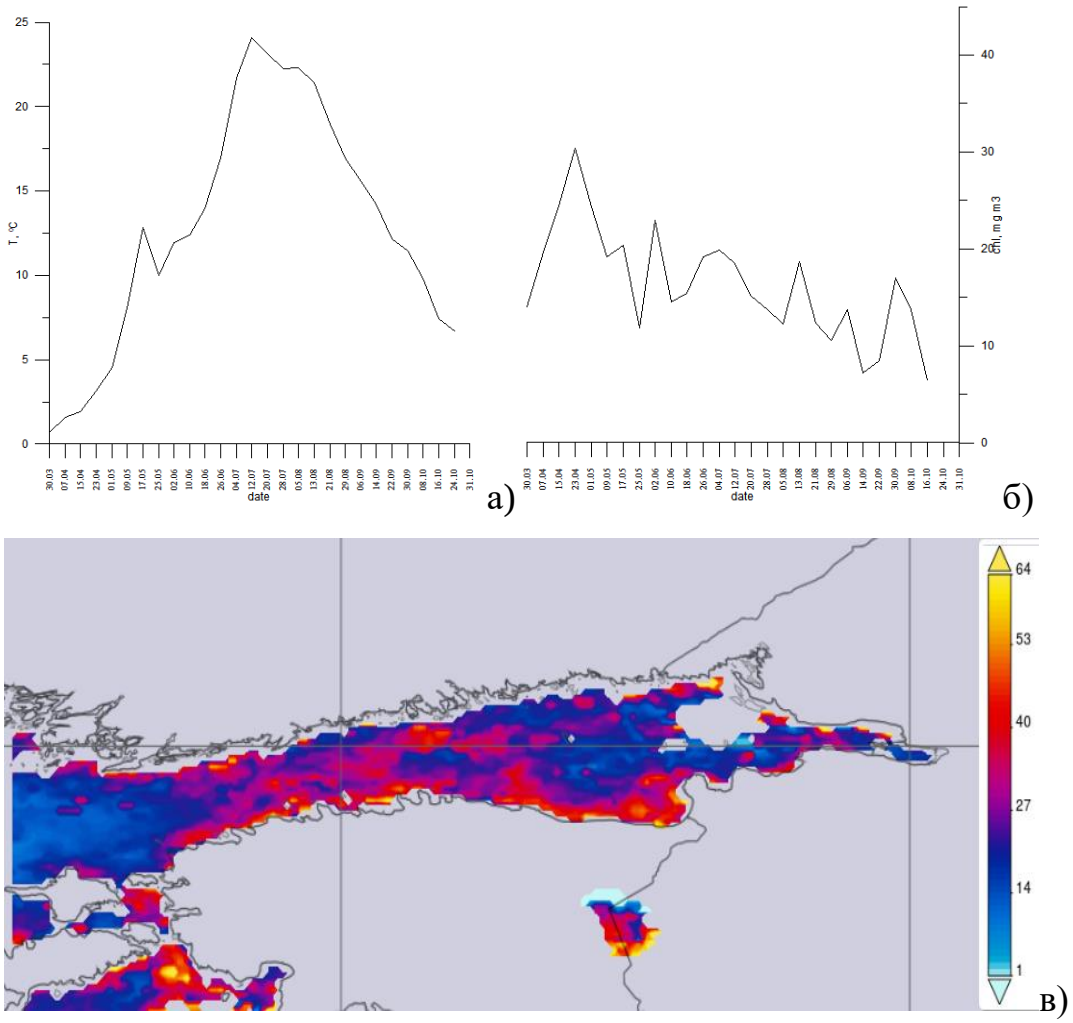


Рисунок 3.1 Финский залив, 2010 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за апрель 2010 года

что 2018 год характеризуется низкими температурами поверхности моря, лед с акватории сошел в 3 декаде апреля (рисунок 3.3). Также высокие концентрации хлорофилла «а» наблюдаются: 25 мая (25,21 мг/м^3) и 26 июня (23,6 мг/м^3). Еще один пик концентраций наблюдается 21 августа (19,4 мг/м^3). Самые высокие значения температуры поверхности моря (23,7°С) приходятся на период 20-28 июля (рисунок 3.2в).

При этом в западной части залива наблюдается цветение, благодаря которому на графике мы можем наблюдать относительно высокие концентрации хлорофилла «а».

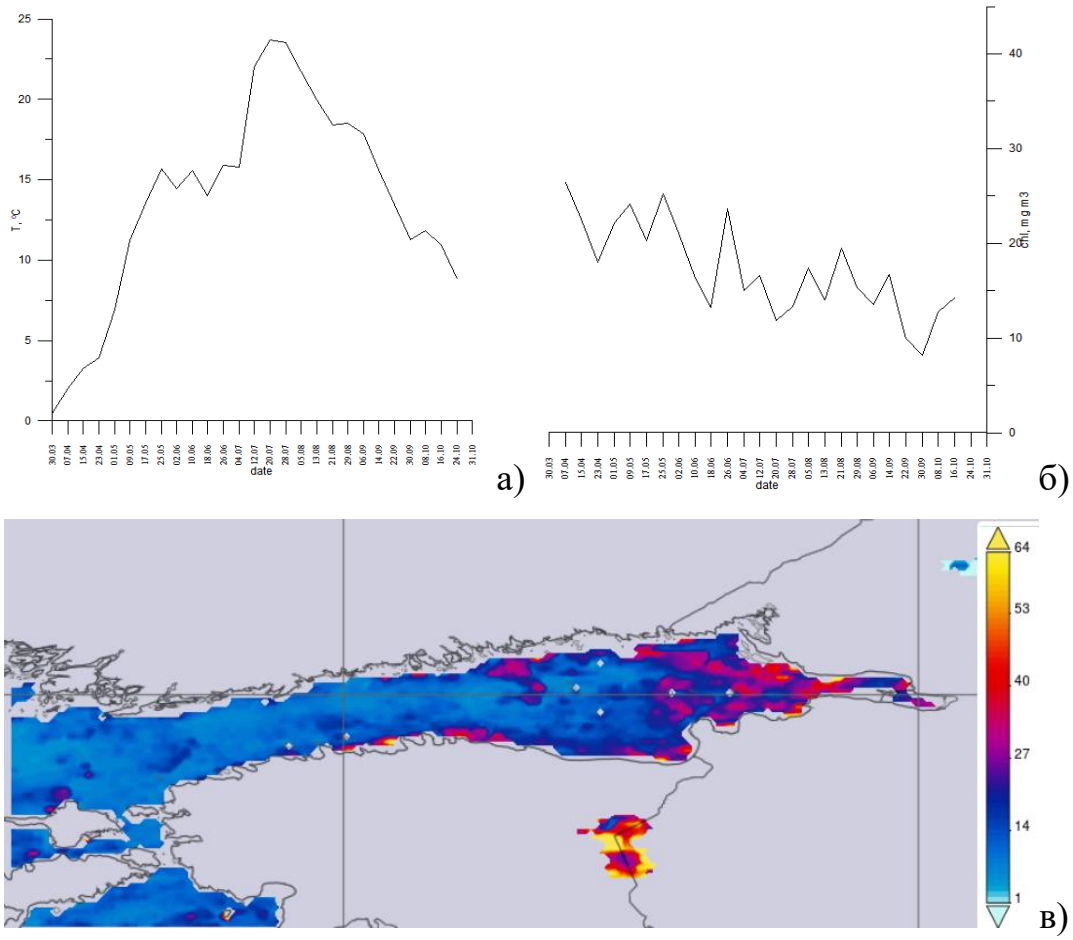


Рисунок 3.2 Финский залив, 2018 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за сентябрь 2018 года

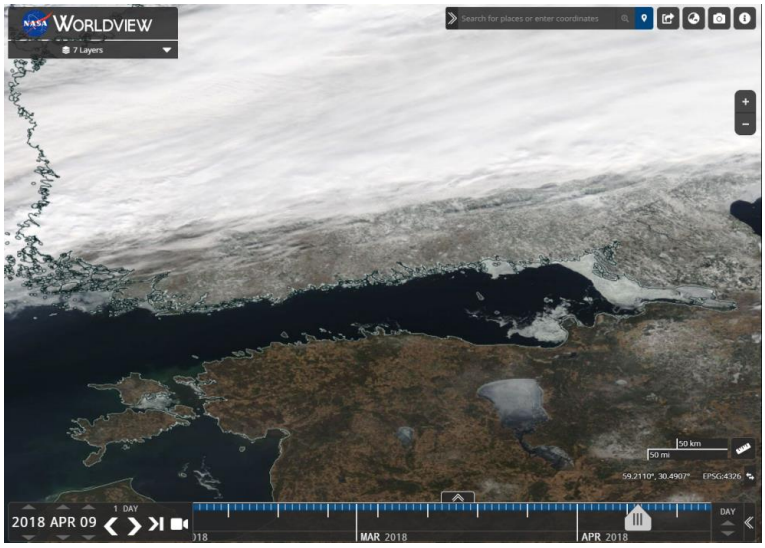


Рисунок 3.3 Ледовая обстановка на 9 апреля 2018 года[34]

Также в период самых высоких температур воды – в июле – происходило цветение воды (рисунок 3.4). При этом на графике отображаются относительно низкие концентрации хлорофилла «а».

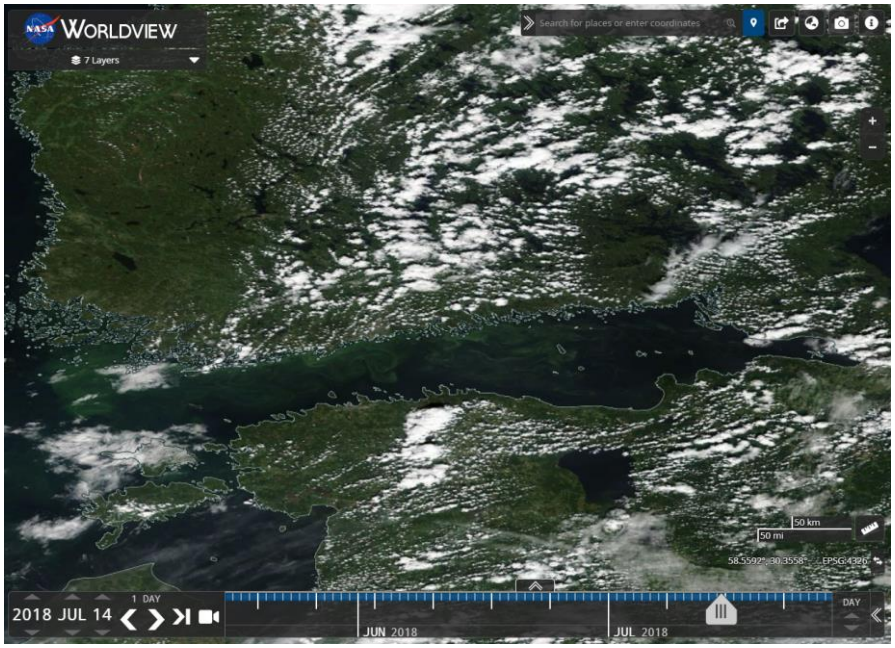
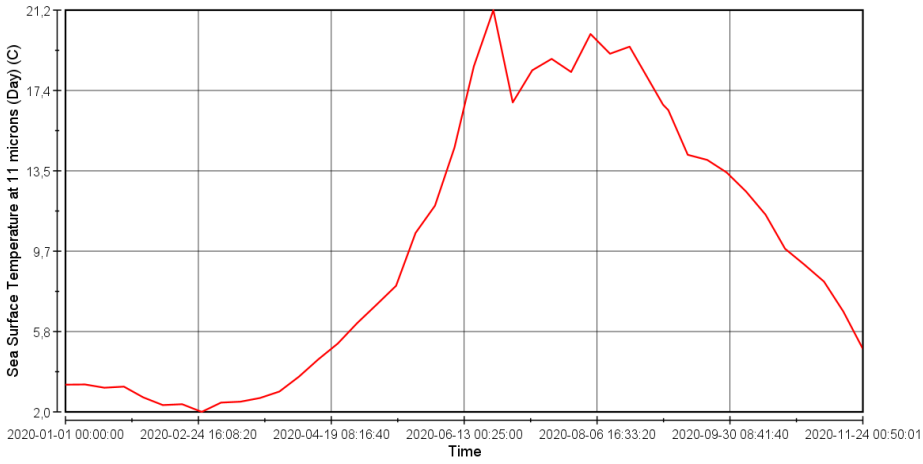


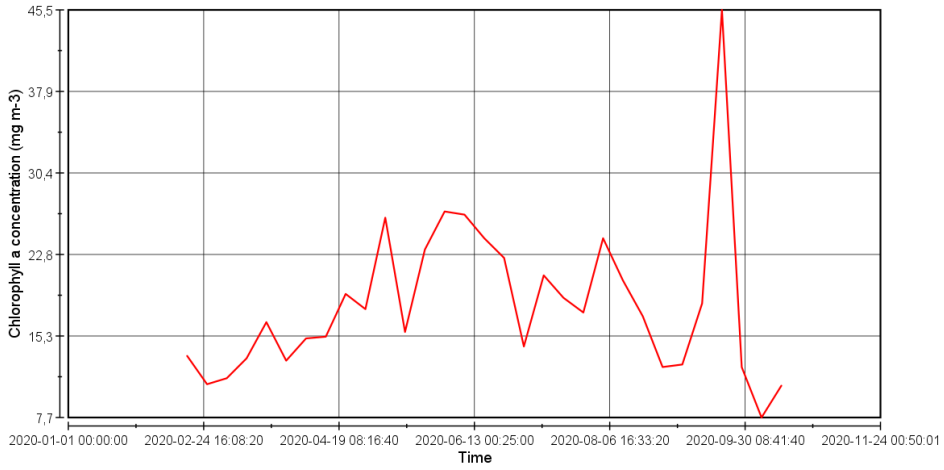
Рисунок 3.4 Спутниковый снимок цветения в июле 2018 года[34]

В 2020 году первый пик цветения зафиксирован 8 мая (25,89 мг/м^3), сумма градусо-дней тепла за этот период составили 157,2 °С. Также, наблюдается резкий скачок концентраций хлорофилла «а» (рисунок 3.5 б) 21 сентября (41,6 мг/м^3). Наиболее высокие значения температуры поверхности моря отмечены 25 июня (21,36 °С). Этот год характеризуется высокими температурами поверхности океана (рисунок 3.5а) и температурами воздуха. В связи с этим исследование проводилось с учетом всего года. Кроме того, зимой 2019-2020 года на акватории залива практически отсутствовал ледовый покров (рисунок 3.6).

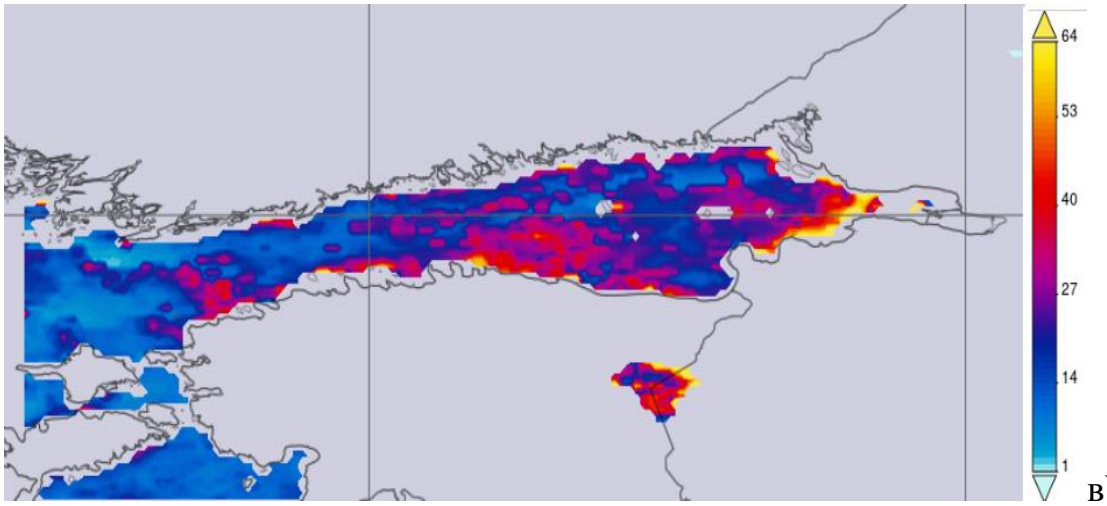
Также наблюдается аномальное цветение в феврале этого года в западной части акватории (рисунок 3.7), которое прекратилось в апреле.



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 Финский залив, 2020 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за сентябрь 2020 года

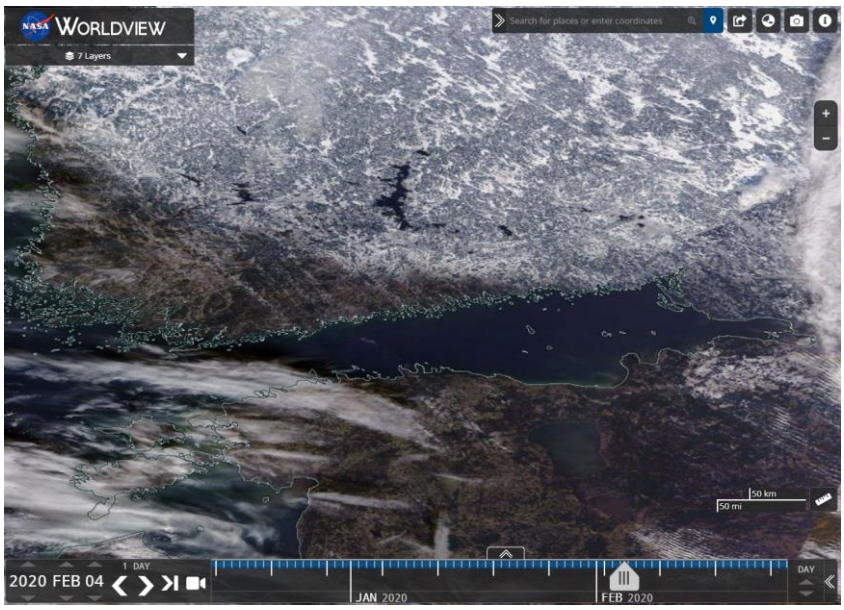


Рисунок 3.6. Спутниковый снимок Финского залива на февраль 2020 года[34]

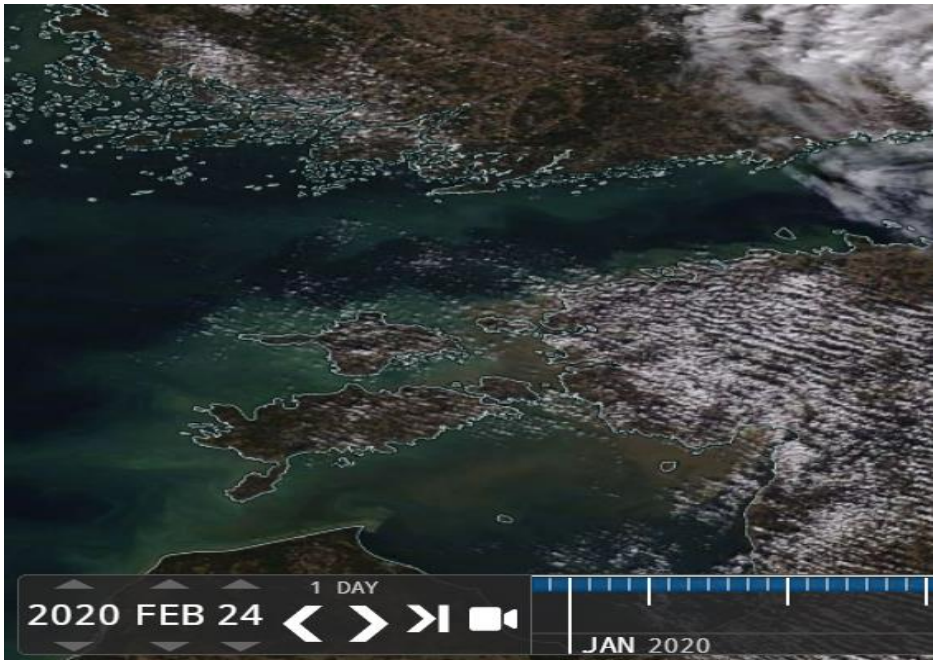


Рисунок 3.7. Спутниковый снимок аномального цветения в западной части Финского залива в феврале 2020 года [34]

Похожая картина наблюдается в 2017 году. Здесь также происходит большая вспышка цветения воды в сентябре (см. приложение А, рисунок А.7).

Таким образом, можно прийти к выводу что, несмотря на грубое осреднение характеристик, в целом наблюдается согласование межгодовых изменений хлорофилла «а» друг с другом, в частности наличие сезонных пиков цветения, таких как во 2-й декаде апреля, а также в 3-й декаде сентября. Прослеживается корреляция между температурой поверхности океана в 2017 и 2020, коэффициент корреляции r=0,7. Также неплохая корреляция прослеживается между температурами поверхности океана в 2012 и 2018 годах, коэффициент корреляции r=0.636. Расчеты корреляции велись после удаления линейного тренда.

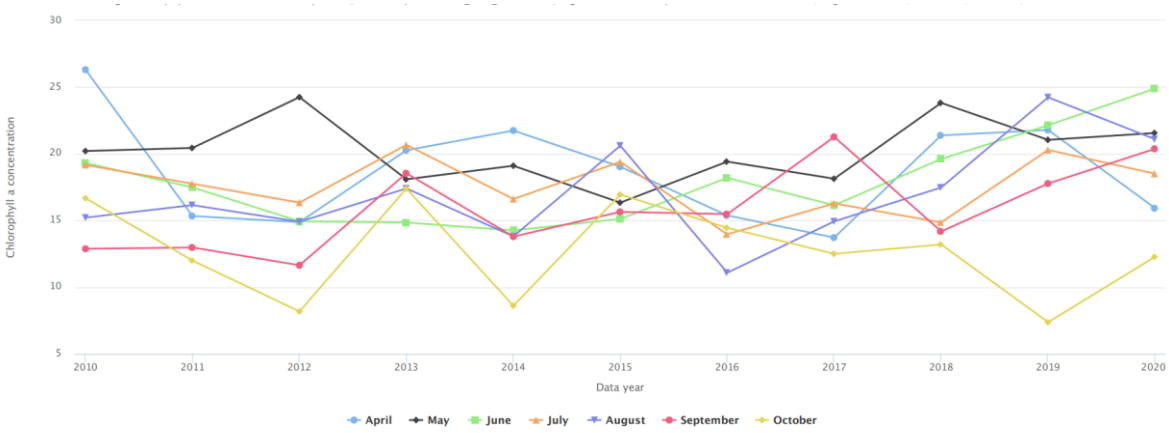


Рисунок 3.8 Сравнение месячных концентраций хлорофилла «а» по годам [25]

Данных о температуре поверхности моря недостаточно для отслеживания динамики биомассы фитопланктона, характеризующейся через концентрацию хлорофилла «а», так как на распространение ее влияют и другие факторы, такие как доступность биогенных элементов, насыщение вод кислородом.

3.2 Оценка уровня эвтрофирования вод залива

Информация о распределении биомассы фитопланктона (или концентрации хлорофилла «а») может быть учтена, как одна из характеристик уровня трофности исследуемого водоема, индивидуально или в составе интегральных показателей, например, индекса E-TRIX.

Для оценки пространственной изменчивости эвтрофикации вод Финского залива был рассчитан индекс E-TRIX, который наглядно показывает уровень трофности вод. При расчетах использовались данные экспедиционных измерений с портала DAS, включающие в себя концентрации общего фосфора, минеральных форм азота, хлорофилла «а», а также показатели температуры, солености и содержания растворенного кислорода для расчета отклонения в абсолютных значениях содержания O_2 от 100%-го насыщения (см. таблицу 2.1). Расчеты выполнялись также в вегетативный период для временного интервала 2010-2020 гг.

Рассмотрим более подробно распределение полученных значений индекса E-TRIX в отдельные годы.

В 2010 году наибольшие концентрации хлорофилла «а» наблюдались в центральной части залива, достигая тут 20 мг/л, и у финского побережья – 12-13 мг/л (рисунок 3.9). Далее с выходом в западную часть концентрации хлорофилла «а» снижались до 2-4 мг/л. Значения индекса E-TRIX по всему заливу (рисунок 3.9) были низкими и колебались в пределах 2-3, что говорит о высоком качестве вод в 2010 году. Однако, в северо-западной части залива на финском побережье показатель достигал значений от 4 до 6, что говорит о посредственном качестве прибрежных вод. Также в этом районе наблюдаются высокие концентрации хлорофилла «а», температура поверхностного слоя воды составила 7,8°C, содержание растворенного O_2 – 6,65 мл/л, общего фосфора P –2,33 ммоль/л, минерального азота N_m – 37,48 ммоль/л. Следует отметить, что

результаты экспедиционных исследований представлены для центральной и западной части залива.

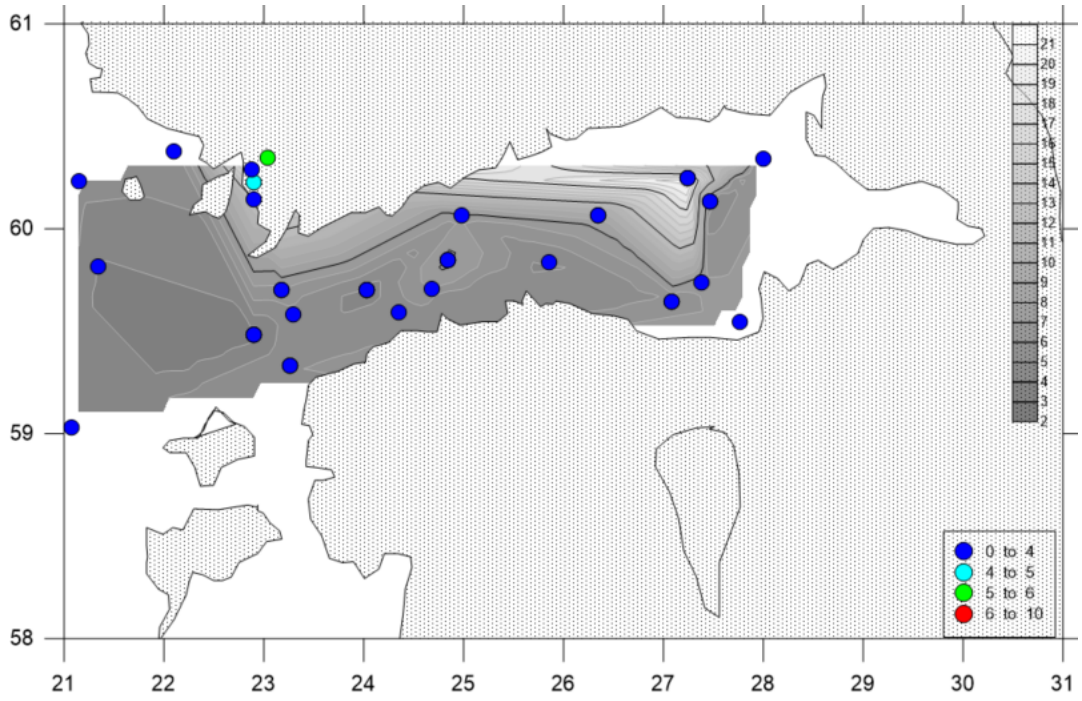


Рисунок 3.9. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2010 год

Измерения за 2011 год также проводились в центральной и западной областях Финского залива, но преимущественно в водах Финляндии (рисунок 3.10).

Вдоль финского побережья концентрации хлорофилла «а» за выбранный период в центральной части залива относительно низкие (3-4 мг/л), по мере приближения к финскому побережью они растут, достигая 10 мг/л. Наибольшие значения наблюдаются в районе Хельсинки. По данным за май индекс E-TRIX в районе Хельсинки он достиг 5, что говорит о посредственном качестве прибрежных вод.

В июне в районе Хельсинки также высокий уровень трофности, что говорит о посредственном качестве прибрежных вод. Здесь же наблюдаются

наиболее высокие концентрации хлорофилла «а» относительно всего исследуемого района. На побережье Финского города Турку также был рассчитан индекс E-TRIX, у береговой линии уровень трофности высокий, качество вод посредственное. С отдалением от побережья уровень трофности падает, достигая показателя 4, что говорит о хорошем качестве вод.

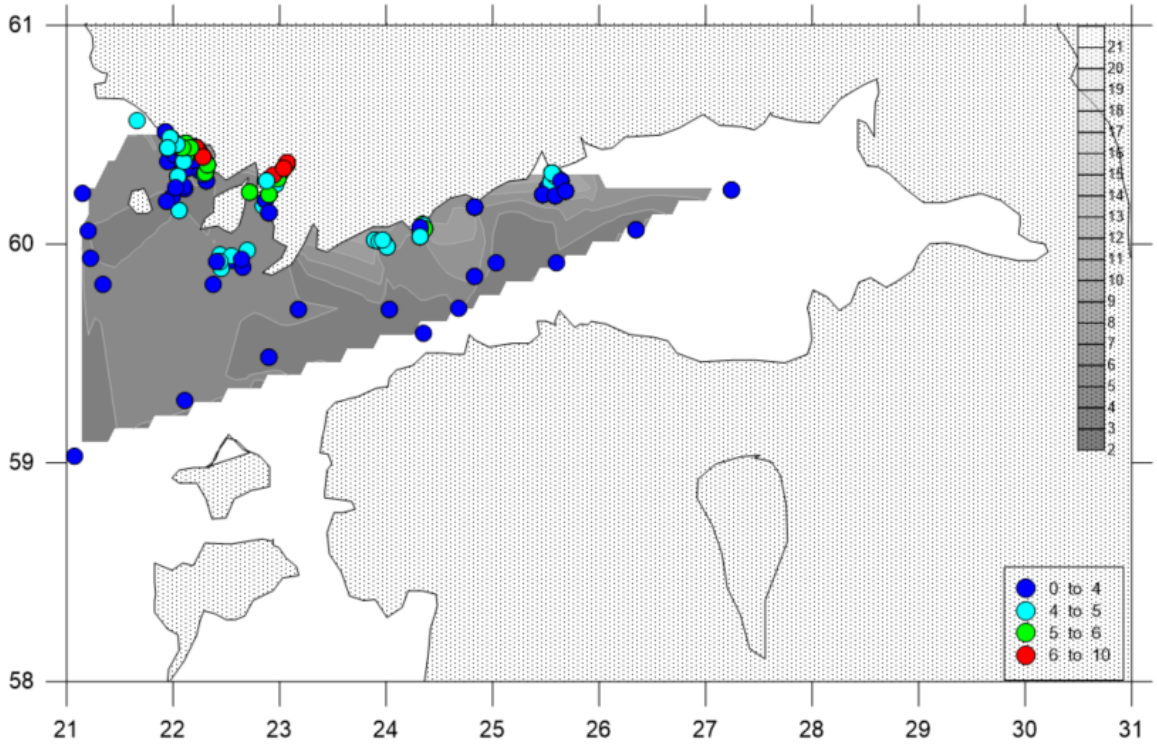


Рисунок 3.10 Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2011 год

В июле на побережье Турку уровень трофности высокий и очень высокий, показатели варьируются в диапазоне 5-7, что говорит о посредственном и плохом качестве вод соответственно. С отдалением от береговой линии показатели стабилизируются, качество вод улучшается.

В августе в районе Хельсинки уровень трофности средний, качество воды хорошее. В районе Турку воды, вдающиеся в сушу, имеют очень высокий

уровень трофности, что говорит о плохом качестве вод. По мере отдаления от береговой линии, уровень трофности снижается.

В сентябре-октябре в открытой акватории наблюдается низкий уровень трофности (2-3). В районе Хельсинки качество вод высокое – хорошее, в районе города Турку уровень трофности высокий и очень высокий, качество вод плохое.

Похожая картина наблюдается и в 2012 и 2020 годах (см. Приложение Б, рисунок Б.1-Б.2). Наихудшее качество вод было в районе города Турку. При этом в районе п-ва Ханко наблюдались достаточно высокие концентрации хлорофилла «а», достигая 21 мг/л.

В 2013-2015 годах (а также в 2019 году) наблюдаются относительно низкие концентрации хлорофилла «а» по всей акватории залива (см. Приложение Б, рисунок Б.3-Б.6). Также можно отметить низкий уровень трофности вод в открытой акватории. Высокий уровень трофности вод наблюдается на финском побережье в районе Хельсинки и Турку в мае и августе. Вдоль эстонского побережья наблюдается также низкий уровень трофности, значения индекса E-TRIX колеблются в диапазоне 2-4 балла.

В 2016 году самые высокие концентрации хлорофилла «а» (рисунок 3.11) сосредоточены в центральной части залива, а также в районе Хельсинки (20 мг/л), Турку (18-20 мг/л) и Таллинна (14 мг/л).

В апреле-мае вдоль эстонского побережья наблюдаются низкие показатели уровня трофности вод. Они варьируются в пределах 2-4 баллов. В мае в районе береговой линии Хельсинки показатель уровня трофности растет. К июню он достигает очень высоких значений, 6,5 баллов. По мере удаления от побережья, значения индекса трофности снижаются. В июле уровень трофности снижается до 2-3 баллов. В августе наблюдается уровень трофности равный 5 баллам, что является показателем посредственного качества вод. В сентябре индекс трофности варьируется в диапазоне 0-4, но в некоторых точках достигает 5. В открытой акватории индекс трофности равен 2 баллам.

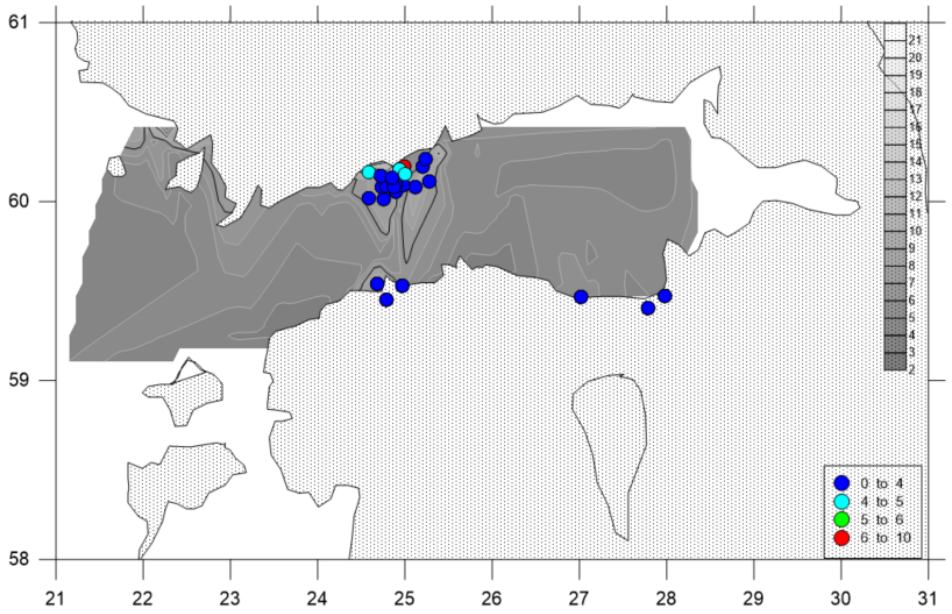


Рисунок 3.11. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2016 год

В 2017 году цветение фитопланктона (концентрации хлорофилла «а») было распределено по более широкой акватории (рисунок 3.12).

Высокие концентрации наблюдаются в центральной части залива, здесь они достигают 18 мг/л. Также высокие концентрации хлорофилла «а» распространяются вдоль финского побережья, в частности в районе городов Хельсинки и Турку.

В апреле в районе Хельсинки наблюдается низкий уровень трофности, он составляет 2-3 балла . В мае концентрации биогенов и хлорофилла «а» растут, что приводит к повышению уровня трофности вод до 5 баллов. К июню концентрации продолжают расти, уровень трофности достигает 6 баллов. В июле уровень трофности падает до 3-4 баллов. В августе можно наблюдать высокое качество вод, уровень трофности опустился до 1-2 баллов. В сентябре-октябре по всей открытой акватории наблюдается низкий уровень эвтрофирования вод, индекс E-TRIXварьируется в диапазоне 2-3 балла.

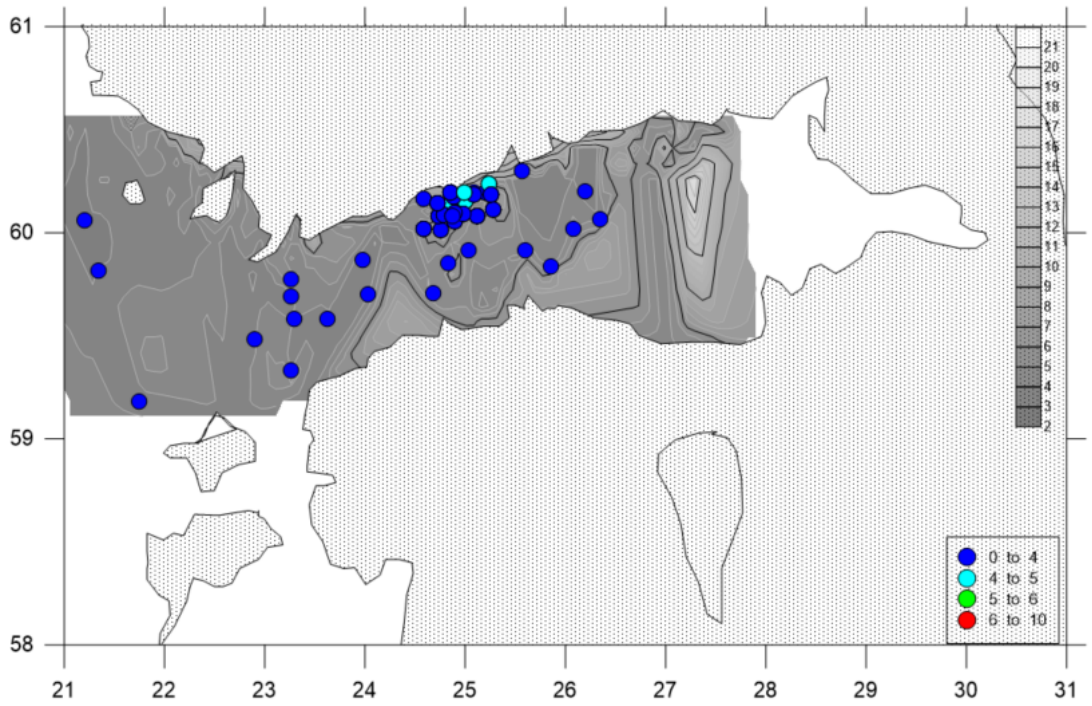


Рисунок 3.12.Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2017 год

В 2018 году наблюдаются очень высокие концентрации хлорофилла в центральной части залива вдоль эстонского побережья, 14-18 мл/л (см. Приложение Б, рисунок Б.7). В мае- июне индекс трофности вод в районе Хельсинки составляет 3-4 балла. К середине лета он возрастает до 4-5 баллов. В сентябре он составляет 5,3 балла. В открытой акватории наблюдается низкий уровень трофности 2-3 балла.

Таким образом, приходим к выводу, что изменения индекса трофности E-TRIX в достаточной степени коррелируют с изменениями концентрации хлорофилла «а». Самые высокие показатели наблюдались в прибрежной зоне, в частности на финском побережье. Это происходит благодаря поступлению с речным стоком большого количества биогенных элементов. В связи активным перемешиванием вод, в открытой акватории концентрации биогенов и хлорофилла «а» относительно низкие.

Заключение

В ходе исследования была дана краткая физико-географическая характеристика Финского залива, в большей степени его восточной части, его гидрологического и гидрохимического режимов на основании различных опубликованных источников.

Было изучено фитопланктонное сообщество залива. Оно представлено такими организмами, как цианобактерии, цветение которых происходит ежегодно в июле-августе, в восточной части Финского залива распространен пресноводный озерный тип фитопланктона, благодаря наличию стока из р.Нева. В южной части залива преобладают центрические и пеннатные диатомовые водоросли. Также в заливе присутствуют золотистые и желтозеленые водоросли.

Были рассмотрены, а также использованы методы спутникового мониторинга, такие как анализ данных через портал NASA Giovanni, что позволило отследить пространственно-временную изменчивость.

При использовании открытых баз данных, а именно портала Giovanni и портала Copernicus были получены данные о концентрации хлорофилла «а» и температуре поверхности океана с дискретностью 8 суток, а также при использовании портала «Расписание погоды» были получены срочные данные о метеоусловиях в городах, расположенных на побережье акватории. Кроме того, с помощью портала DAS были получены натурные данные о концентрации хлорофилла «а», биогенных элементов, растворенного кислорода, температуре и солености по всей акватории. Для всех данных брался вегетативный период 2010-2020 годов.

Благодаря полученным усреднённым по всей акватории данным о температуре и концентрации хлорофилла «а» были выявлены некоторые закономерности во временной изменчивости концентрации хлорофилла «а». Также был рассчитан такой показатель как градусодни тепла, отражающий количество накопленного тепла. Были построены карты полей цветения.

Выделяются 2 основных пика цветения: в конце апреля-начале мая и в конце сентября. При этом в исследуемый период входили несколько аномальных лет, 2018 аномально холодный, восточная часть акватории была покрыта льдом в апреле, при этом в западной наблюдалось цветение. 2020 год был аномально теплым, акватория не замерзала и присутствовало аномальное цветение в западной части акватории в феврале, а также были замечены очень высокие концентрации хлорофилла «а» в конце сентября, максимальные за весь исследуемый период.

При расчете корреляционной взаимосвязи использовались данные с портала Copernicus о среднесуточной температуре поверхности океана за весь исследуемый период. Данные расчеты выявили корреляцию между 2017 и 2020 годами, а также между 2012 и 2018 годами. Был сделан вывод о том, что данных одной температуры поверхности недостаточно для качественной оценки динамики распространения хлорофилла «а».

Далее была проанализирована пространственная изменчивость концентрации хлорофилла «а» с использованием натурных данных с портала DAS, а также был рассчитан индекс трофности вод E-TRIX. В результате был сделан вывод о том, что наиболее эвтрофированными являются прибрежные участки залива, в частности побережье Финляндии, что происходит благодаря поступлению биогенных элементов с речным стоком. Открытая акватория характеризуется высокими показателями качества вод.

Список использованной литературы

1. International Hydrographic Organization “Limits of oceans and seas” (Special Publication №23) 3rd edition 1953 IMP Monégasque, Monte-Carlo. P. 5.
2. " Финляндия, залив”. Новая международная энциклопедия. 1905
3. Энциклопедический сайт https://www.britannica.com/place/Gulf-of-Finland
4. «Роль макро- и мейзобентоса в донных сообществах вершины Финского залива»А.А. Максимов и В.А. Петухов
5. Е.К. Ланге «Современное состояние фитопланктона восточной части Невской губы (Финский залив, Балтийское море)»
6. Сборник материалов XI Международного экологического форума «День Балтийского моря» СПб: ООО «Макси-Принт», 2010, 534 с.
7. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. «Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий.»— М.: ИКИ РАН, 2016.— 334 с. : табл., ил., цв. ил.
8. «Оценка текущего состояния и проблем уникальных береговых ландшафтов восточной части Финского залива, степени их уязвимости к воздействию внешних факторов природного и техногенного характера»Г.Г. Гогоберидзе, Д.В. Рябчук, В.А. Жамойда
9. С.А. Агафонова, А.Н. Василенко, А.А. Мироненко, Н.Л. Фролова «Ледовый режим и его опасные проявления на реках арктической зоны России»
10. Степанова Наталья Борисовна«Вертикальная термохалинная структура и механизмы формирования холодного промежуточного слоя Балтийского моря»
11. Л.К. Давыдов, А. А. Дмитриева, Н. Г. Конкина«ОБЩАЯ ГИДРОЛОГИЯ»
12. «The Gulf of Finland» H. Pitkänen, J. Lehtoranta, and H. Peltonen

13. Knuuttila, Seppo; Räike, Antti; Ekholm, Petri; Kondratyev, Sergey (2016). «Nutrient inputs into the Gulf of Finland: Trends and water protection targets.» Journal of Marine Systems,

14. «The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review» Pekka Alenius, Kai Myrberg and Alexei Nekrasov

15. «Biologicalinvasion in criticalsalinity zone: introduction of polychaetesMarenzelleriaarctia to the easternGulf of Finland (Baltic Sea)»AlexeyMaximov

16. Экологический энциклопедический словарь. — Кишинев: Главная редакция Молдавской советской энциклопедии. И.И. Дедю. 1989.

17. Л.Н. Волошко, Т.В. Сафронова «Цианобактериальные «цветения» в Финском заливе Балтийского моря»

18. В.Н. Никулина, Е.К. Ланге «Изменения развития фитопланктона в восточной части Финского залива» 2008г

19. Н.Б. Балашова, Г.А. Киселев, В.А. Степанова, А.В. Тобиас«Диатомовые водоросли бентоса южного побережья Финского залива»

20. «Разнообразие стоматоцист золотистых водорослей (chrysophyta) Финского залива Балтийского моря 2019 г. С. Н. Шадрина*

21. Сайт географического факультета МГУ им.Ломоносова http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/int_sem7/Color_phyt.html

22. «Биофизические методы мониторинга»Инна Тюнина

23. «Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета» О.В. Копелевич, В.И. Буренков, С.В. Шеберстов

24. «Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвет»Т.В.Буканова, С.В. Вазюля, О.В. копелевич, В.И. Буренков, А.В. Григорьев, А.Н. Храпко, С.В. Шеберстов, С.В. Александров.

25. Портал Giovanni https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/

26. Портал NASA MODIS https://modis.gsfc.nasa.gov/

27. Портал Copernicus https://resources.marine.copernicus.eu/

28. Портал DAS https://nest.su.se/das/

29. Портал «Расписание погоды» https://rp5.ru/

30. Сайт NASA https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/

31. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине “Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации” Санкт-Петербург 2007

32. Vollenweider R.A., Giovanardi F., Montanari G. etal. «Characterizationofthetrophicconditionsofmarinecoastalwaterswithspecialreferenceto the NW Adriatic Sea: proposalfor a trophicscale, turbidityandgeneralizedwaterqualityindex» // Environmetrics. – 1998. – 9, Iss. 3. – P. 329 – 357. – doi:10.1002/(SICI)1099095X(199805/06)9:3<329::AIDENV308>3.0.CO;2-9)

33. Таблицы растворимости кислорода в морской воде, Л., Гидрометеоиздат, 1976 г.

34. Портал NASA WorldView https://worldview.earthdata.nasa.gov/

35. «Планктонные и бентосные сообщества юго-восточной части Балтийского моря в летний период 2019 года» С.В. Александров, А.А. Гусев, А.С. Семенова

36. «Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования циклов цветения фитопланктона в Балтийском море»Н.В. Евтушенко, С.В. Шеберстов

37. «Эволюции гидрохимических структур вод балтийского бассейна» В.Ф. Дубравин, М.В. Капустина, В.А. Кречик

38. «Оценка состояния экосистемы шельфово-склоновой зоны северо-восточной части Черного моря на основе индекса трофности (TRIX)” 2016г Н.Д. Романова, В.К. Часовников, Е.Г. Арашкевич, С.А. Мошаров, А.Б. Никишина, А.В. Костылева, Н.Е. Луппова

39. Сайт диссертационного совета ЗИН РАН https://www.zin.ru/boards/24.1.026.02/

40. ВКР «Оценка экологического состояния восточной части Финского залива» Бодрова Е.В.

41. Архив https://web.archive.org/

42. European space agency https://earth.esa.int/showcase/env/Finland/Gulf_of_Finland_MER_FR_Orbit_07204_20030717.html

43. Портал единой государственной системы информации об обстановке в мировом океане http://esimo.oceanography.ru/

Приложение А. Температуры поверхности океана, концентрации хлорофилла «а», карты полей цветения

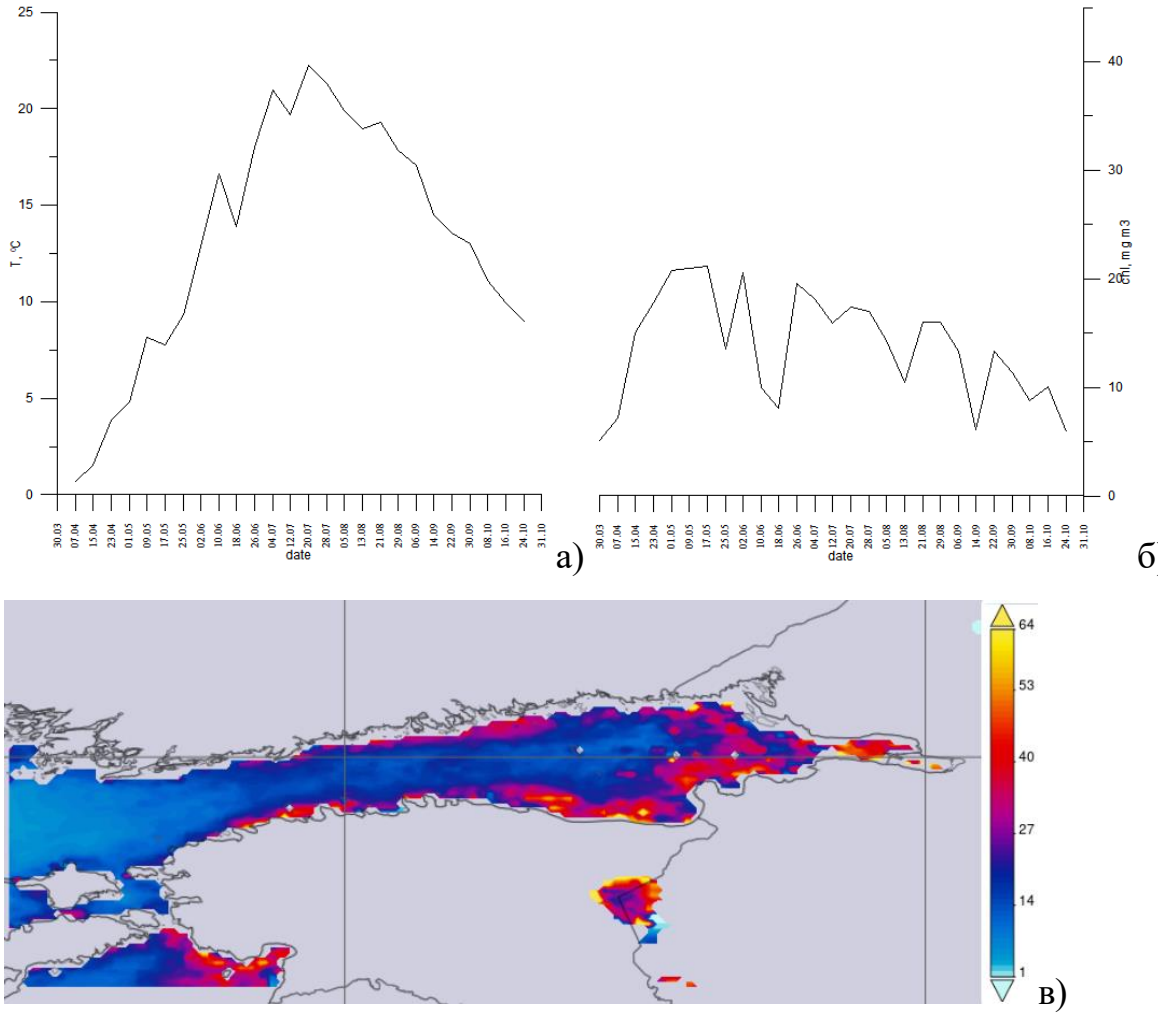


Рисунок А.1. Финский залив, 2011 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за май 2011 года

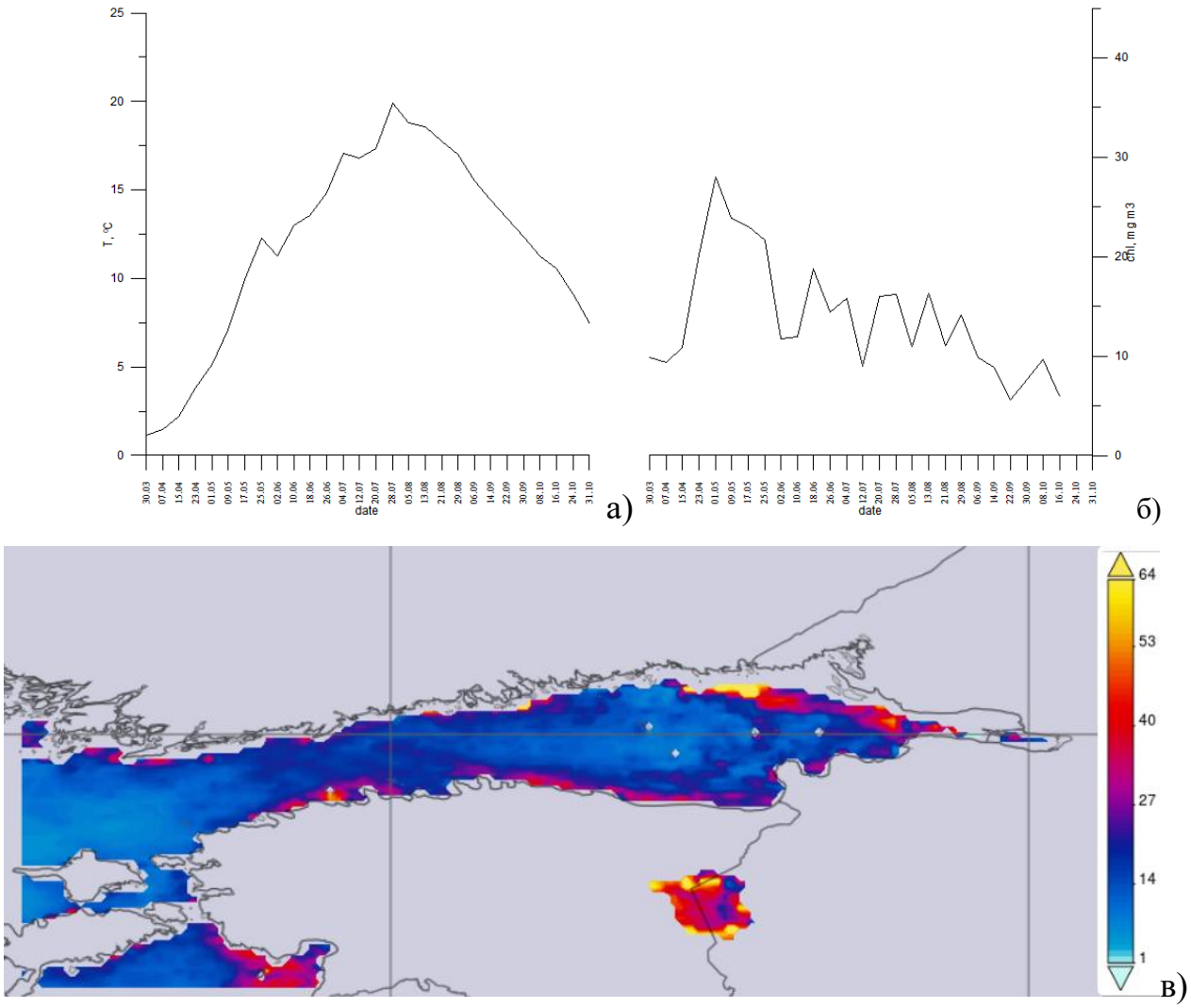


Рисунок А.2. Финский залив, 2012 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за апрель 2012 года

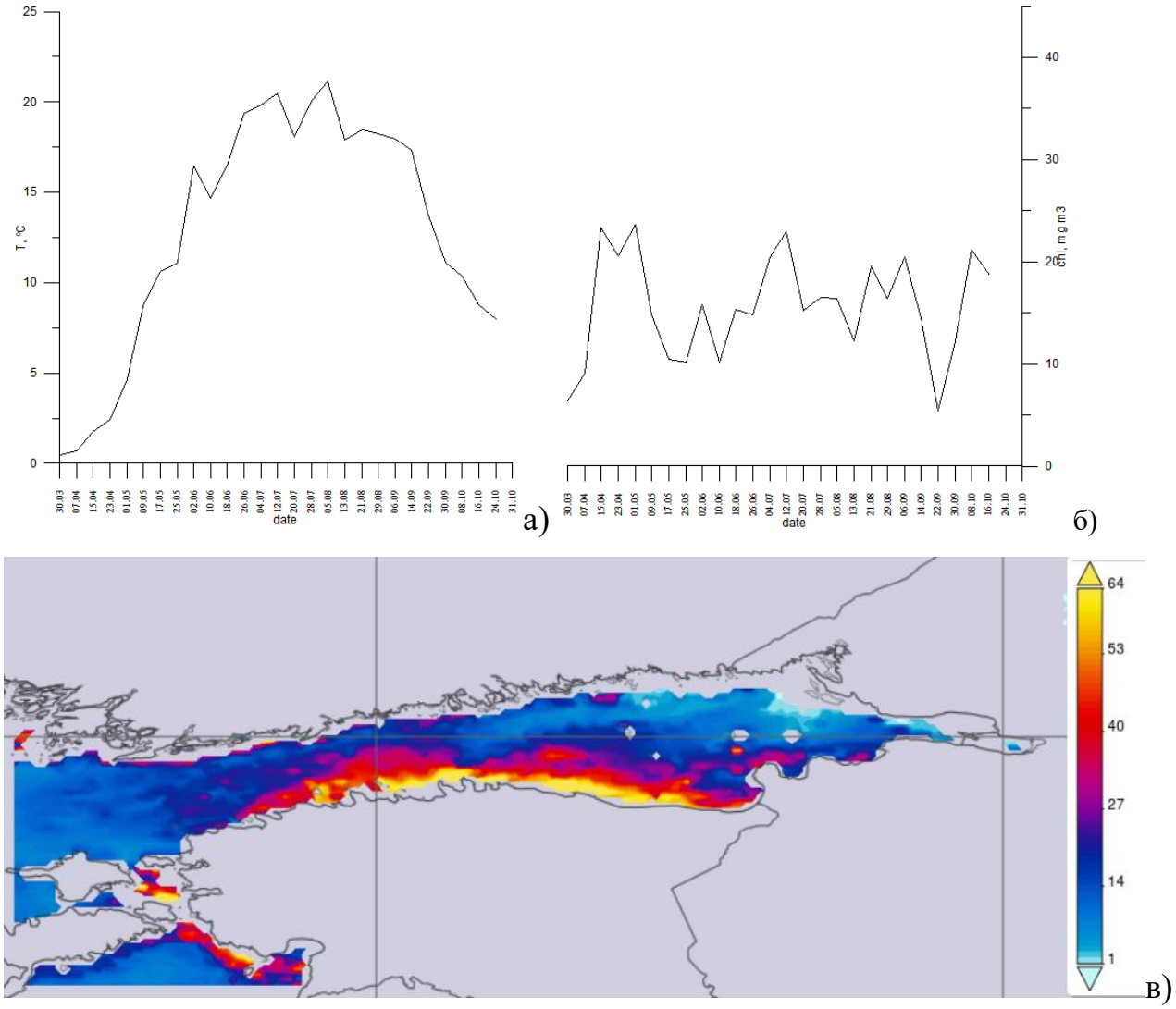


Рисунок А.3. Финский залив, 2013 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за апрель 2013 года

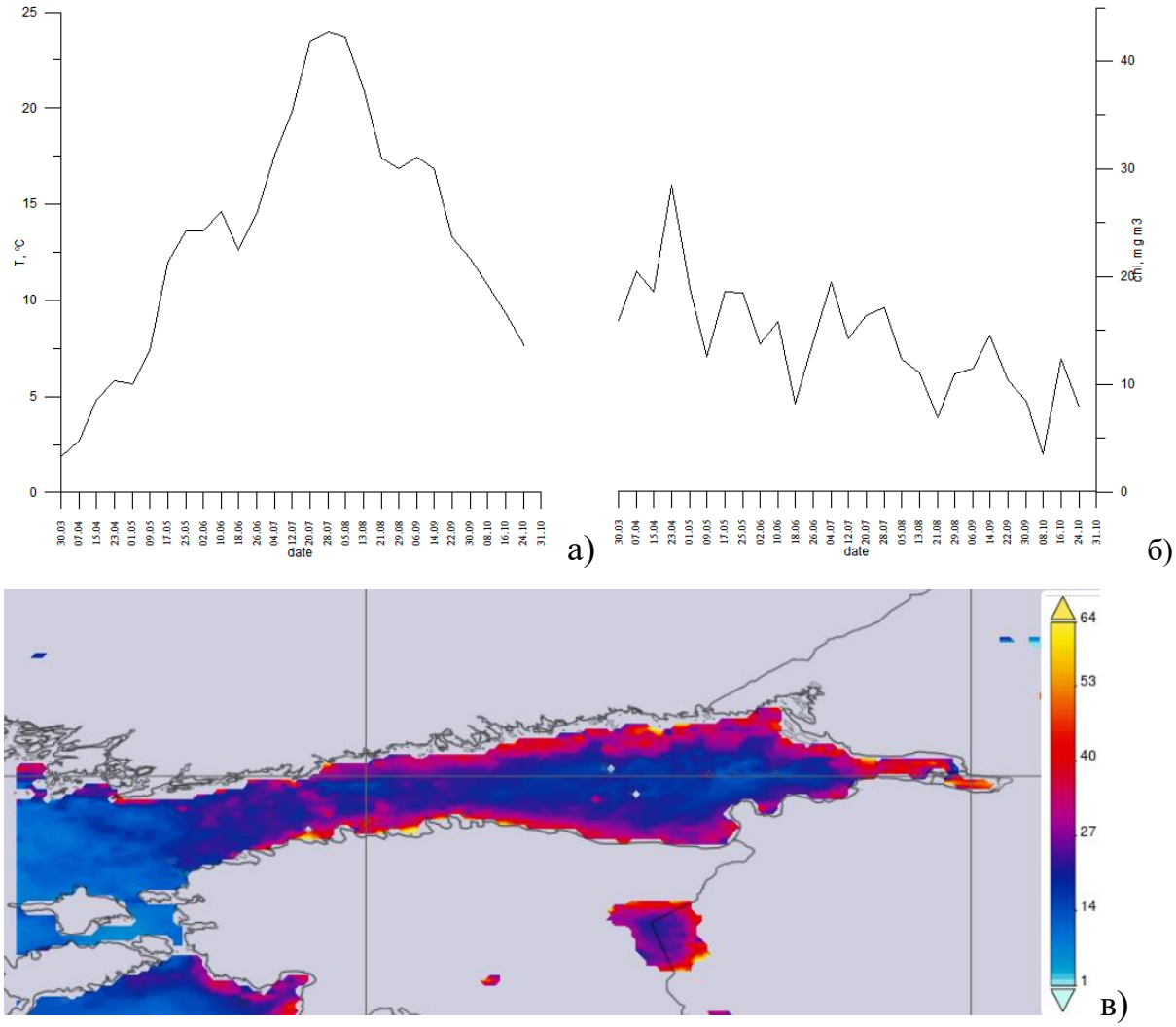


Рисунок А.4. Финский залив, 2014 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за апрель 2014 года

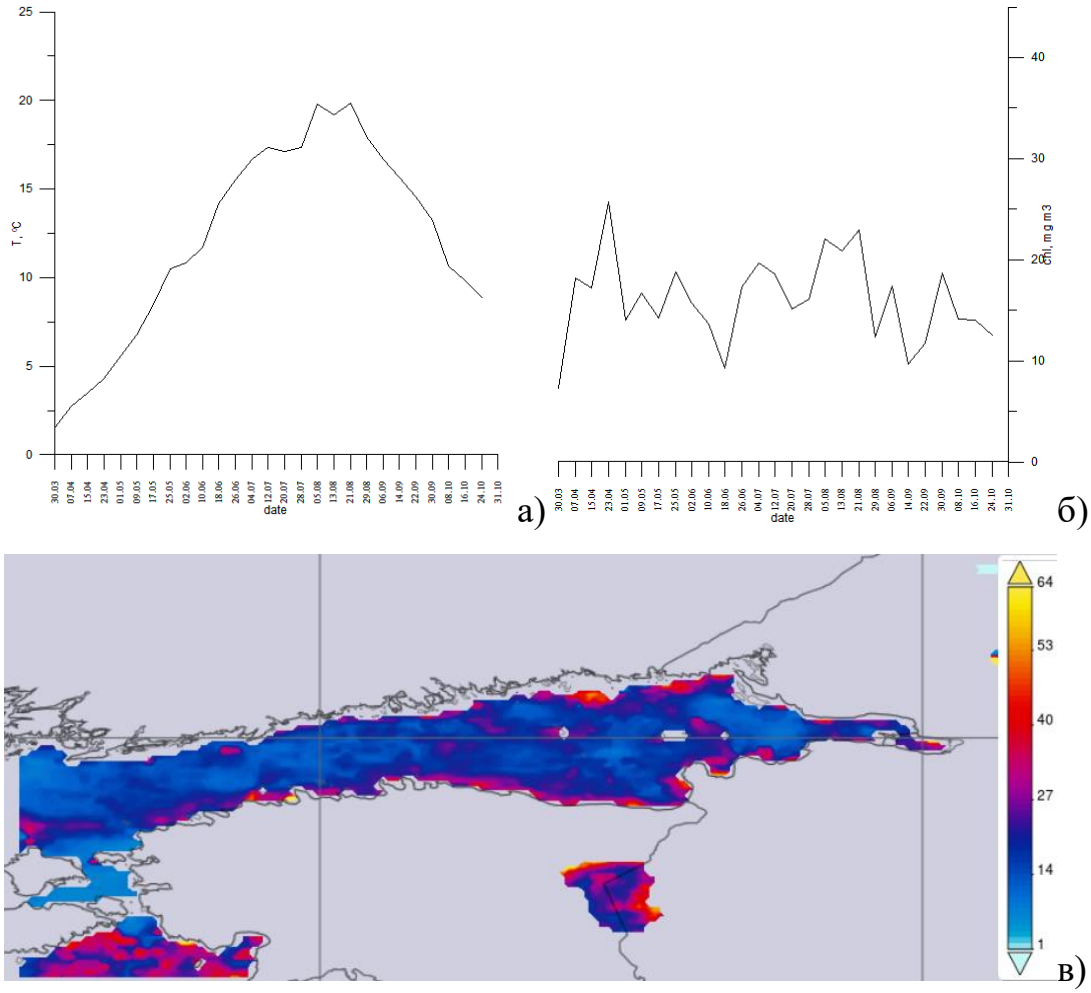


Рисунок А.5. Финский залив, 2015 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за апрель 2015 года

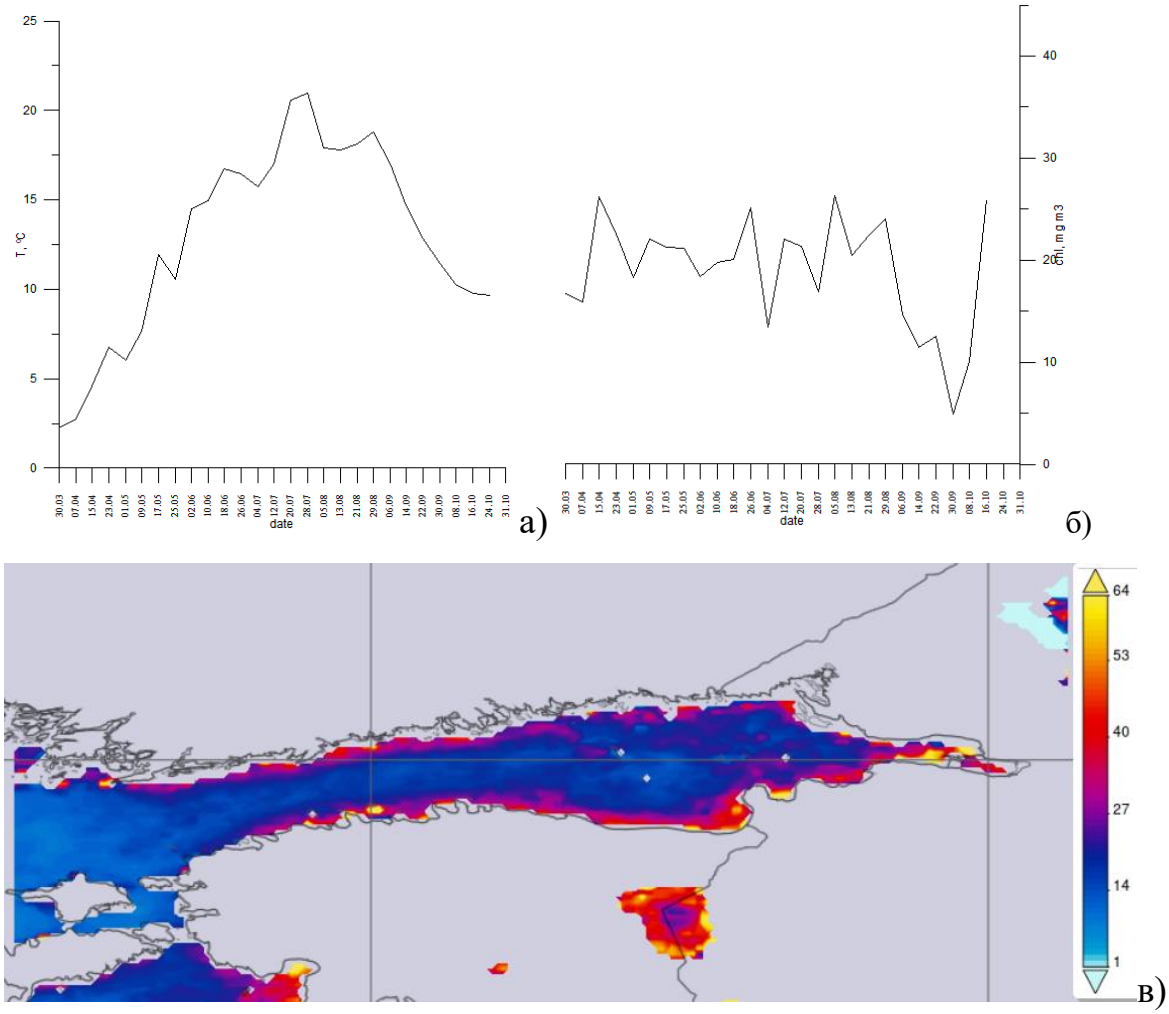


Рисунок А.6. Финский залив, 2019 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за апрель 2019 года

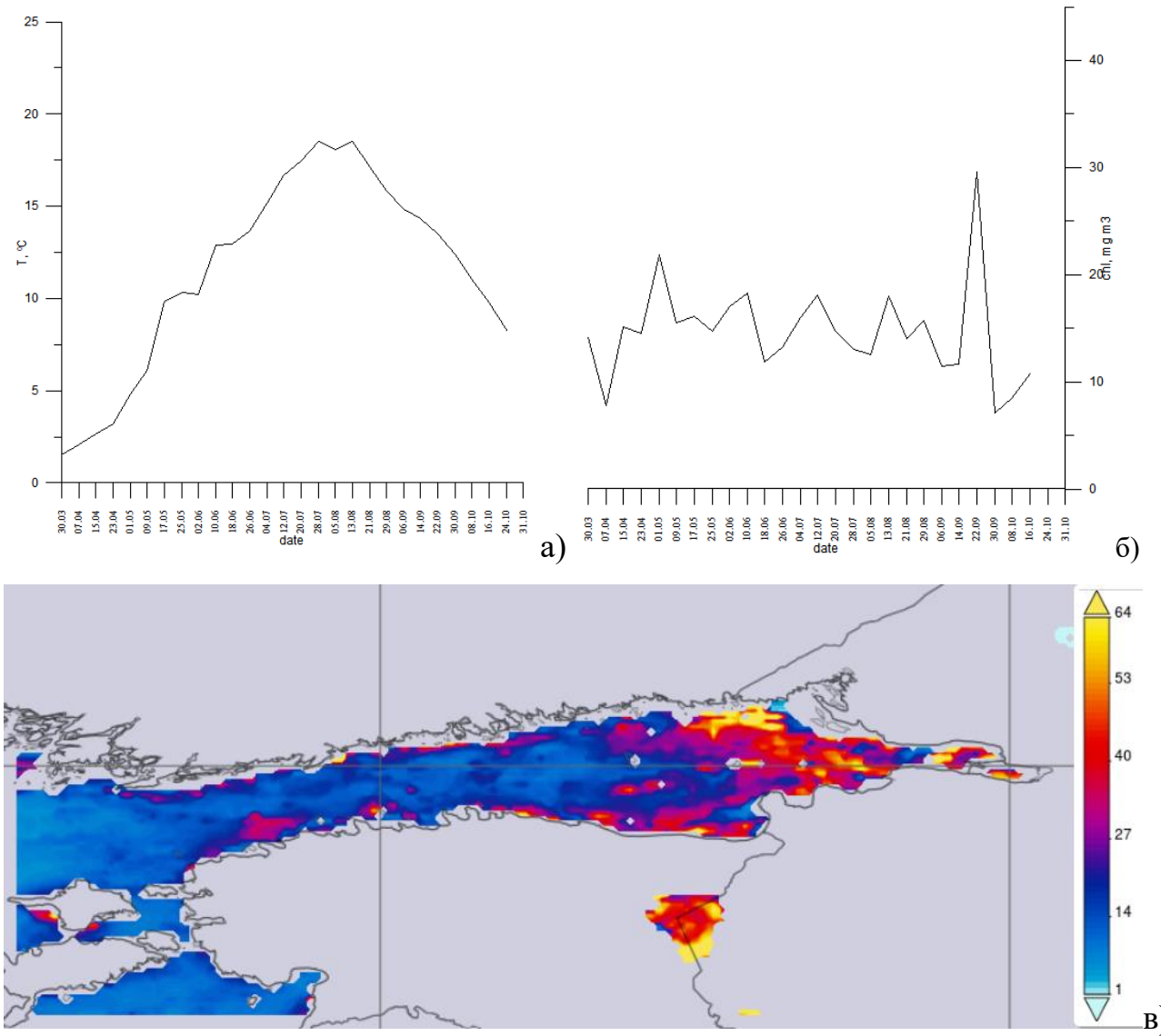


Рисунок А.7. Финский залив, 2017 год: а) температура поверхности океана, б) концентрации хлорофилла «а», в) карта полей цветения за сентябрь 2017 года

Приложение Б . Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX

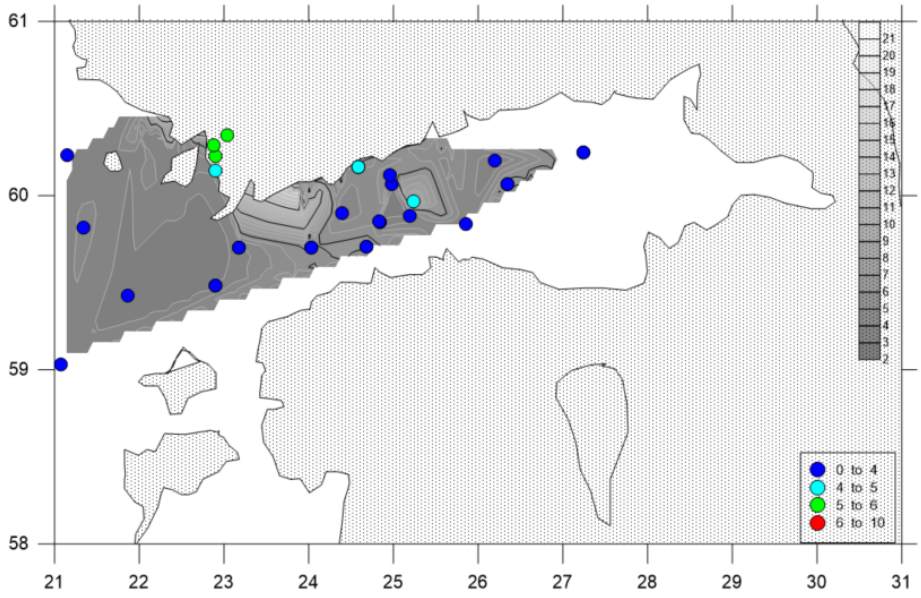


Рисунок Б.1. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2012 год

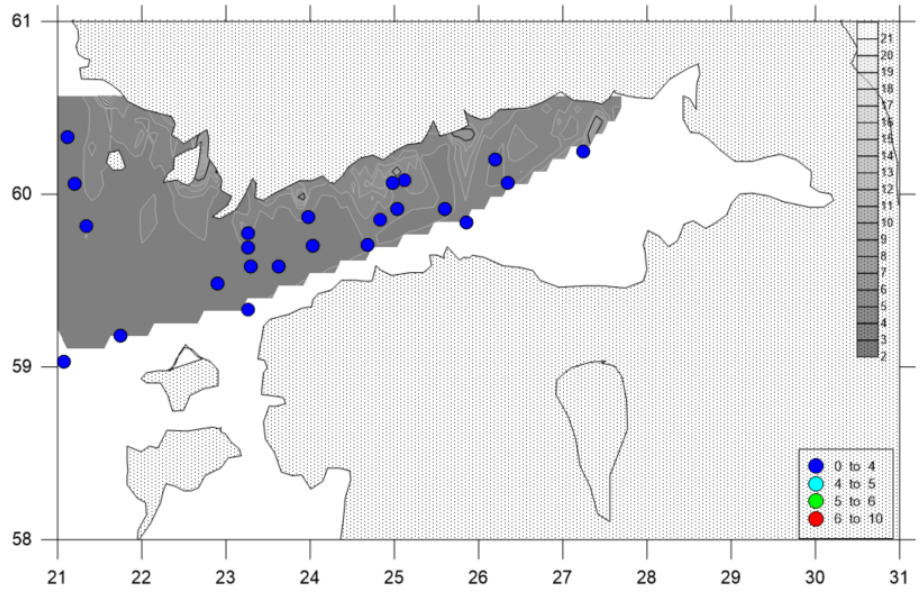


Рисунок Б.2. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2020 год

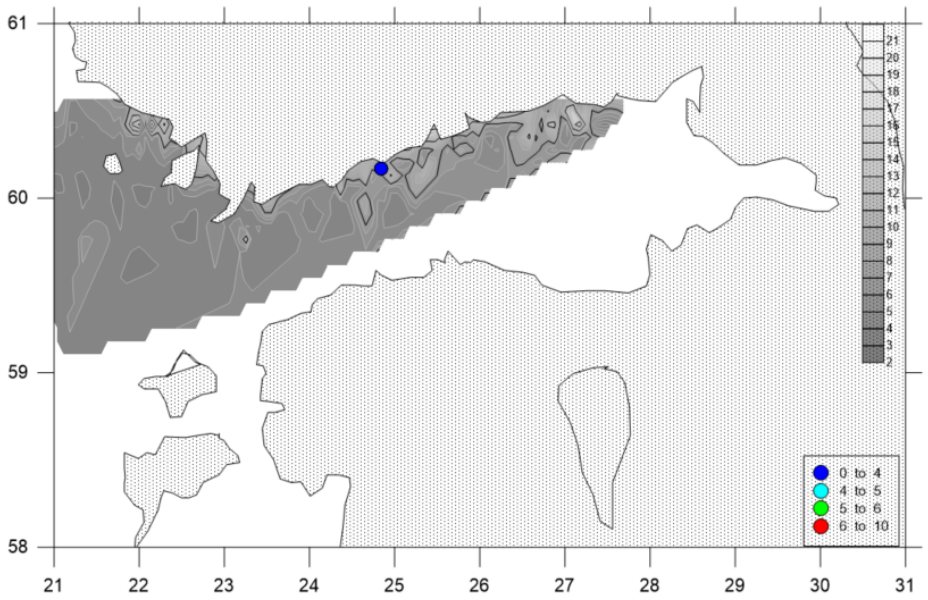


Рисунок Б.3. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2013 год

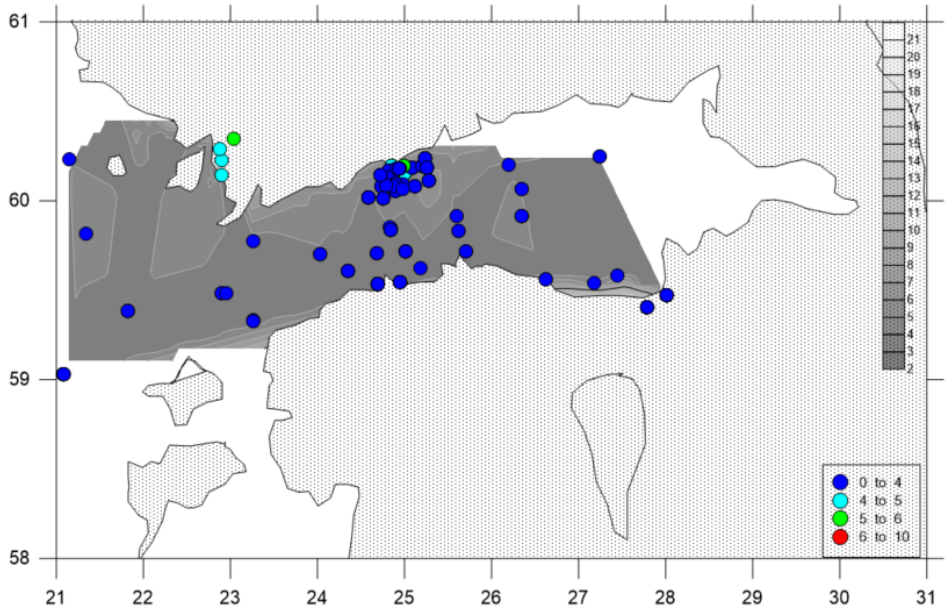


Рисунок Б.4. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2014 год

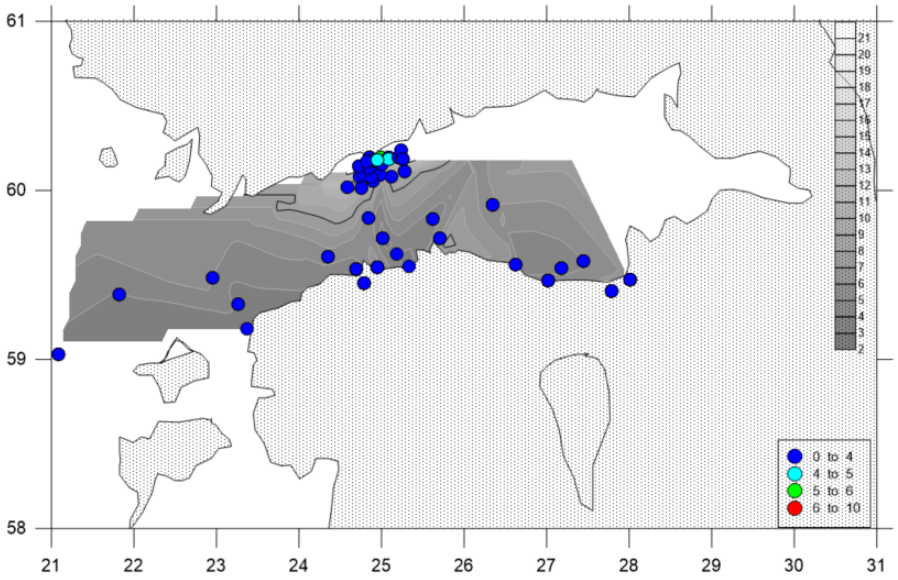


Рисунок Б.5. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2015 год

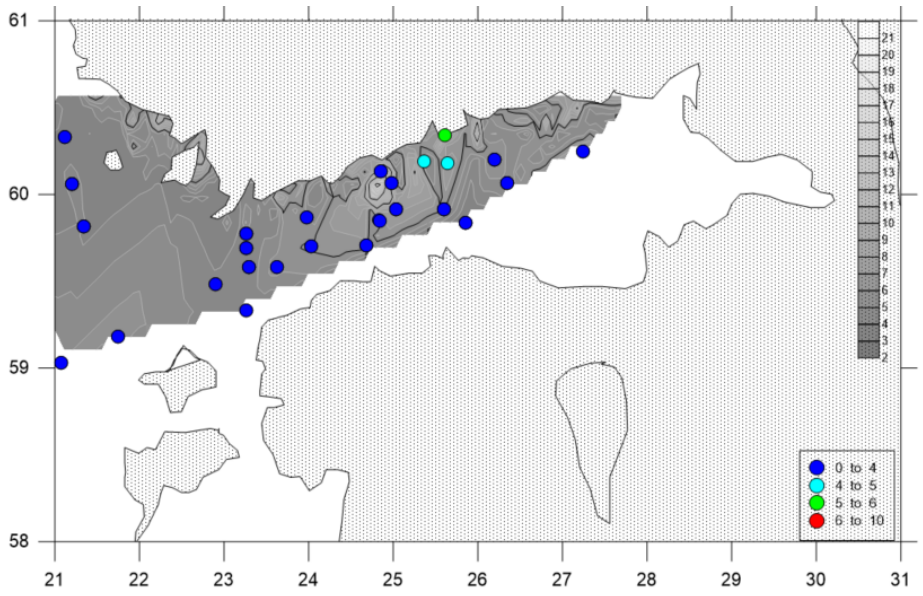


Рисунок Б.6. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2019 год

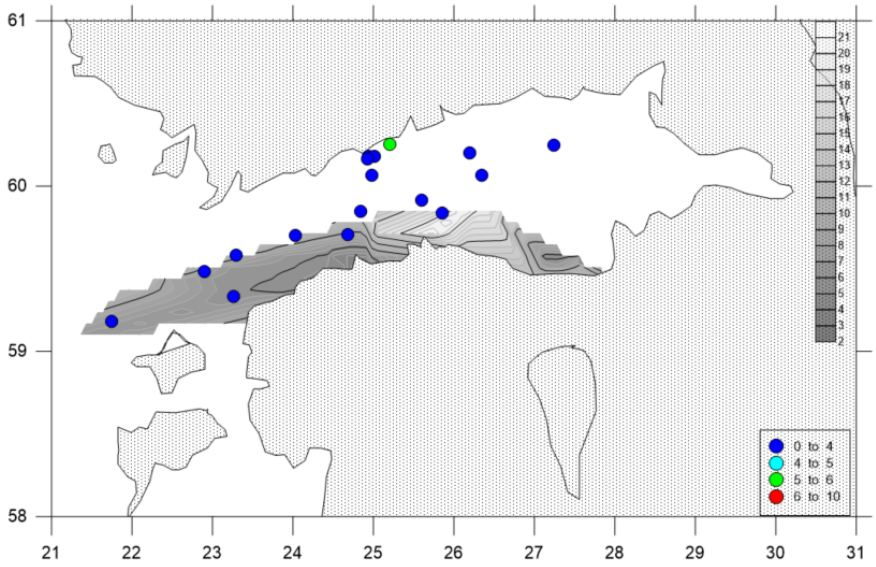


Рисунок Б.7. Распределение концентрации хлорофилла «а» и рассчитанный индекс E-TRIX за 2018 год