

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему Оценка современного уровня эвтрофикации по данным
контактных и спутниковых измерений

Исполнитель Иванова Анна Константиновна

Руководитель кандидат физ.-мат. наук, доцент

Еремина Татьяна Ремовна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой



кандидат географических наук, доцент,

Плинка Николай Леонидович

«19» 06 2018г.

Санкт-Петербург

2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему Оценка современного уровня эвтрофикации по данным
контактных и спутниковых измерений

Исполнитель Иванова Анна Константиновна

Руководитель кандидат физ.-мат. наук, доцент

Еремина Татьяна Ремовна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

кандидат географических наук, доцент,

Плинк Николай Леонидович

«___» _____ 2018г.

Санкт–Петербург

2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Эвтрофикация как глобальный процесс	4
1.1 Процесс эвтрофикации	4
1.2 Эвтрофикация в Балтийском море и Финском заливе	8
1.3 Современное состояние эвтрофикации по данным контактных измерений	10
1.4 Оценка эвтрофикации по спутниковым данным	12
1.5 Хлорфилл- <i>a</i> и фитопланктон	16
2 Методы исследования.....	20
2.1 Исходные данные.....	20
2.2 Параметрическое моделирование	28
2.3 Параметризация профилей.....	29
2.4. Кластерный анализ.....	31
3 Анализ пространственно-временной изменчивости хлорофилла- <i>a</i> .	34
3.1 Работа с исходными данными	34
3.2 Иерархическая кластеризация	37
3.3 Кластеризация методом <i>k</i> -средних	40
3.4 Анализ распределения хлорофилла- <i>a</i>	46
3.5 Анализ спутниковых данных.....	51
Заключение	53
Список литературы	55

ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее важных проблем Балтийского моря – это эвтрофикация, которая представляет из себя процесс качества воды и увеличения биологической продуктивности, в результате поступления биогенных элементов в избыточном количестве, под воздействием естественных и антропогенных факторов.

Из-за излишнего количества биогенных веществ увеличивается биомасса фитопланктона и идет активное развитие сине-зеленых водорослей. Происходит накопление органического вещества, уменьшается прозрачность воды. Значительное количество кислорода уходит на окисление органического вещества, что в результате изменяет световой и газовый режим, оказывая влияние на сообщества гидробионтов.

Все эти факторы, а также устойчивая стратификация, специфические особенности водообмена и влияние метеорологических факторов определяют чувствительность Балтийского моря к эвтрофикации.

Финский залив является наиболее эвтрофированным районом Балтийского моря. Многочисленные исследования (HELCOM) показывают в этой области наличие максимальных концентраций хлорофилла *a*. Это обуславливает необходимость регулярного мониторинга вод Финского залива.

Целью данной работы является оценка современного уровня эвтрофикации Финского залива с использованием данных контактных и спутниковых измерений.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать состояние эвтрофикации по данным контактных измерений
2. Проанализировать состояние эвтрофикации по спутниковым данным
3. Провести параметризацию вертикальных профилей распределения хлорофилла-а
4. Провести кластеризацию полученных профилей
5. Провести оценку состояния эвтрофированности Финского залива

1. Эвтрофикация как глобальный процесс

1. Процесс эвтрофикации

Эвтрофикация – это процесс обогащения водоема биогенами, которые оказывают стимулирующее воздействие на рост фитопланктона. В свою очередь повышение количества фитопланктона вызывает помутнение воды, и бентосная растительность попадает в теневую зону. В процессе фотосинтеза планктоном выделяется кислород. Кислород находится в поверхностном водном слое и достаточно быстро улетучивается, обитающие в глубине рыбы и моллюски в результате задыхаются. [1]

В начале своего развития процесс эвтрофикации не наносит явного урона и приносит, в том числе, положительный эффект, который заключается в повышении биологической продуктивности и разнообразии видов, численность рыб также увеличивается. Однако, чем больше развивается эвтрофикация, тем сильнее преобладают отрицательные эффекты.

В течение последних десятилетий на всех континентах происходит нарушение режима внутренних водоёмов - озёр, водохранилищ и прибрежных зон морей. Эти изменения вызваны повышенным поступлением в водоёмы биогенных веществ - азота и фосфора. Биогены попадают в воду из городских и промышленных стоков, сливов с сельскохозяйственных угодий, то есть источников, связанных с активной деятельностью человека. Повышенная концентрация азота и фосфора, дает толчок развитию таких видов фитопланктона, как сине-зеленые водоросли. Для их разложения увеличивается количество расходуемого кислорода, так необходимого для других гидробионтов. Результатом этого становится шаткость морской экосистемы. [1]

Деятельность людей изменяет среду обитания для животных и растений, химический состав воздуха и воды, вмешивается в баланс биогеохимических процессов и разнообразие жизни на планете. В результате этих видов деятельности поверхностные и подземные воды во всем развитом

мире теперь имеют повышенные концентрации азота и фосфора по сравнению с концентрациями даже в середине 20-го века. Это является серьезной экологической проблемой, поскольку происходит стимуляция роста растений и нарушается баланс между производством и метаболизмом органического вещества в прибрежной области.

Проблемы от влияния эвтрофикации подразделяются на три группы: причинные факторы, прямые воздействия и косвенные воздействия. Причинные факторы характеризуют приток биогенных веществ, а также увеличение их концентрации. Прямые воздействия на прямую относятся к первичным продуцентам (фитопланктону и подводным растениям). Косвенные воздействия имеют отношение к зоопланктону, рыбам и макрозообентосу (Рисунок 1).

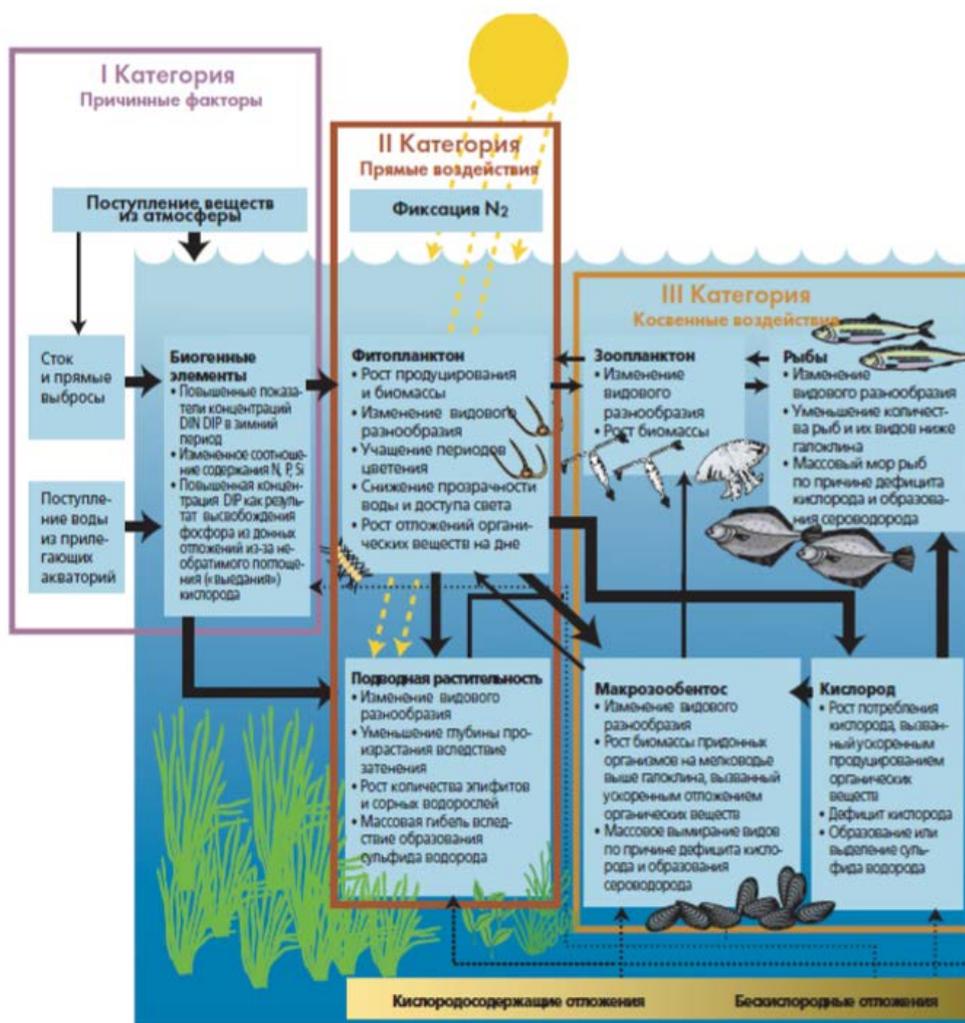


Рисунок 1. Модель эвтрофикации (Aertebjerg et al., 2003).

Четыре примера на Рисунке 2 показывают, как концентрации азота и фосфора увеличились в два с половиной раза с 1960-х по 1990 год на северо-западе Черного моря, в Центральном Балтийском море, в Архипелажном море (северная часть Балтики) и в Ирландском море. [2]

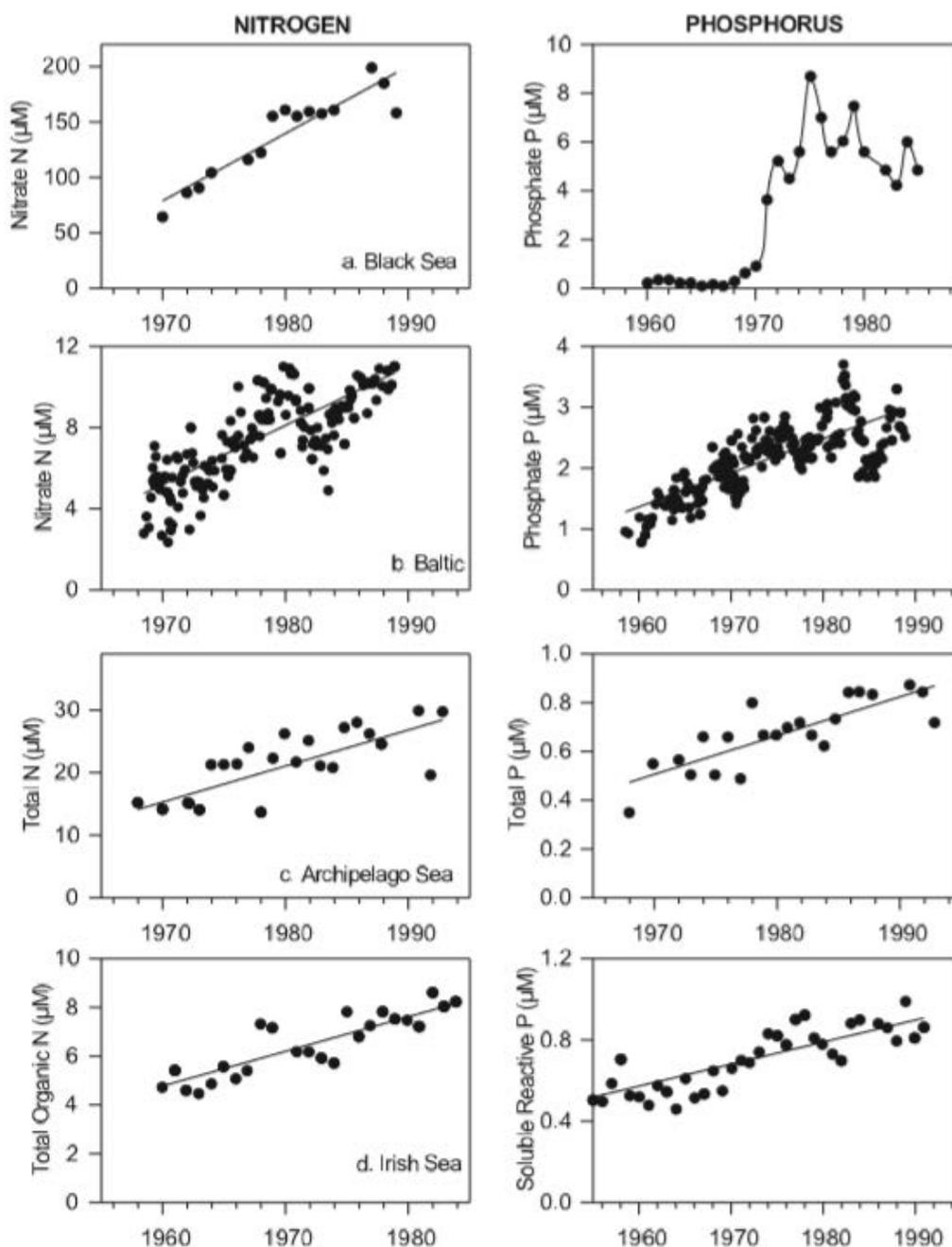


Рисунок 2. Увеличения концентраций азота и фосфора в прибрежных водах: (а) среднегодовая концентрация нитратов в нижней реке Дуная и среднегодовая концентрация фосфатов в румынских прибрежных водах Черного моря (б) концентрации нитратов и фосфатов в придонных водах

Центрального Балтийского моря; (с) общая концентрация азота и общего фосфора в внешнем море архипелага, северная часть Балтики; (d) средние зимние (январь-февраль) концентрации общего органического азота и растворимого реактивного фосфора в центральном Ирландском море. [2]

Уникальный характер прибрежных экосистем происходит от их положения на границе суши и моря, где они подвержены влиянию изменчивости как на границе моря, так и на границе водораздела.

Человеческий контроль за сезонным притоком и оттоком пресной воды в прибрежную зону является нарушением природного процесса, что в свою очередь изменяет химию рек, притоки питательных веществ в эстуарии и способность эстуариев ассимилировать питательные вещества.

Некоторые прибрежные экосистемы существенно изменяются за счет увеличения поступления азота или фосфора. Скорость осаждения органического вещества влияет на концентрацию кислорода в воде над осадками. Когда скорость подачи органического вещества увеличивается в результате обогащения питательными веществами, бентический микробный метаболизм стимулируется и вызывает изменения в высвобождении питательных веществ и скоростях потребления кислорода. Осадки и донные сообщества являются, следовательно, наиболее чувствительными частями прибрежной экосистемы для эвтрофикации и гипоксии.

Экологические проблемы, связанные с эвтрофикацией и, как следствие, низким содержанием кислорода, растут в глобальном масштабе. Происходит изменение таких процессов и параметров, как: прозрачность воды; распределение и численность подводных растений; темпы роста и воспроизводства пелагических, и донных беспозвоночных; ухудшение среды обитания беспозвоночных и рыб, включая катастрофические нарушения, которые вызывают массовую смертность животных; изменения в ключевых эко системных функциях (первичное производство).

1.2. Эвтрофикация в Балтийском море и Финском заливе

Балтийское море обладает замкнутой системой водотока, благодаря этому его можно отнести к морям внутреннего типа. С Северным морем Балтика сообщается через проливы, именуемые Датскими. В дальнейшем Датские проливы имеют сообщение с проливами Скагеррак и Каттегат.

Климат Балтики обладает высокой изменчивостью, по причине разнонаправленных воздействий влажного и относительно мягкого морского воздуха из Северной Атлантики и сухого и холодного воздуха из Евразии. Бассейн Балтийского моря получает ежегодно относительно высокий объём осадков - 450 мм. В северной части моря выпадает значительное количество осадков и низкое испарение, на юге напротив, малое количество осадков и высокое испарение.

Площадь водосбора Балтийского моря в 4 раза превышает площадь самого моря и составляет 1.74 млн. км² (Рисунок 3). Солёность вод Балтийского моря в 5 раз ниже средней солёности Мирового океана. На поверхности она составляет всего 7 ‰, а у дна - 11-13 ‰.

Изменение придонной солёности вод в Балтийском море происходит по причине притока солёных, плотных и насыщенных кислородом североморских вод, которые следуя с запада на восток заполняют глубоководные впадины Балтийского моря, что способствует усилению стратификации.

Вертикальная стратификация в свою очередь препятствует аэрации придонных слоев и кислород расходуется на окисление органического вещества в Готландской впадине. Бескислородные воды, вытесненные из Готландской впадины, попадают в Финский залив, ухудшая тем самым его экосистему.

Во время затопки вытесненные из глубоководных впадин водные массы приносят в верхние слои Балтийского моря биогенные соединения,

вследствие чего, через пару лет наблюдается активное цветение цианобактерий. [3]

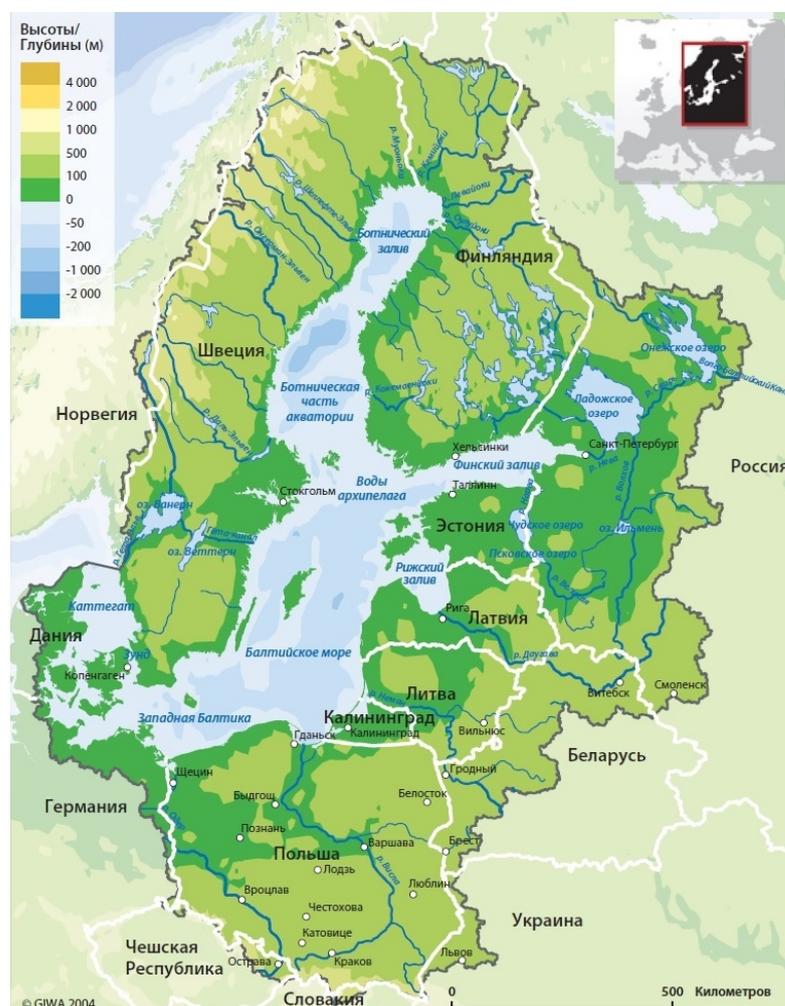


Рисунок 3 – Водосборный бассейн Балтийского моря

Один из самых оживленных морских маршрутов проходит в Балтийском море, являясь причиной сброса с судов сточных вод, мусора, ядовитых жидкостей, нефти и продуктов нефтепереработки. Многолетнее накопление перечисленных веществ приводит к высокой антропогенной нагрузке. Различают два вида антропогенного воздействия: техногенное загрязнение (токсичные вещества, представляющие опасность для всех живых организмов) и эвтрофирование. [3]

Первая серьезная научная забота об эвтрофикации, как угрозе для морских экосистем, началась в 1950-х годах из-за интенсивного распространения водорослей и снижения раковинного промысла в заливе

Мориче (мелкая прибрежная лагуна на южном берегу Лонг-Айленда, Нью-Йорк). К 1990 году было собрано достаточное количество материала, а проблема вызвала общественный и научный интерес. Шведский журнал АМВЮ опубликовал специальный выпуск, посвященный 20-летним исследованиям по эвтрофикации в районе Балтийского моря. [4]

Эвтрофикация является одной из наиболее серьезных причин изменения экосистем Балтийского моря. Эвтрофированию способствует сравнительно небольшой объём и длительный период обновления вод Балтийского моря. Вторая из причин, это поступление биогенных веществ, источниками которых являются промышленные сточные воды, отходы сельского хозяйства, в котором используются минеральные удобрения, загрязнения, приходящие из атмосферы. Так же немалый процент фосфора и азота поступает в толщу воды из донных отложений моря, что увеличивает продукцию водорослей.

Наиболее эвтрофированные районы Балтийского моря, это Гданьский залив, Рижский залив и Финский залив. Финский залив является одной из наиболее загрязненных зон Балтийского моря. На загрязнение залива в большой степени влияет Санкт-Петербург, сбросы сточных вод которого оказывают воздействие на экологическое состояние восточной части залива.

1.3. Современное состояние эвтрофикации по данным контактных измерений

Хельсинкская конвенция по защите морской среды Балтийского моря впервые была одобрена странами-участницами в 1974 году. После некоторых политических изменений, новый вариант конвенции был подписан в 1992 году и вступил в силу с 17 января 2000 года. Далее была проведена оценка состояния морской среды и факторов, воздействующих на нее. По итогам были обозначены главные проблемы, определены цели и задачи, в результате

чего в ноябре 2007 года все страны участники Хельсинской конвенции утвердили совместно разработанный План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (ПДБМ).

План предусматривает восстановление экосистемы Балтийского моря. Для этого требуется реализация природоохранных программ и проектов ХЕЛКОМ в рамках задач ПДБМ. Среди приоритетных направлений природоохранной деятельности, заложенной в ПДБМ, борьба с эвтрофированием, которое приводит к несбалансированному функционированию экосистемы, представляется наиболее существенным и трудным процессом.

Для достижения намеченной цели, необходимы количественно измеряемые индикаторы. К таким индикаторам можно отнести:

- зимние концентрации питательных веществ в поверхностных водах;
- летняя глубина прозрачности воды, измеряемая по диску Секки;
- концентрация хлорофилла-а;
- диапазон глубин распространения подводной растительности;
- продолжительность и площадь сезонного истощения кислорода. [4]

Негативные последствия на функционирование морских систем Балтийского моря могут усиливать в ряде случаев антропогенные и климатические факторы. Потепление климата и увеличенная биогенная нагрузка стимулируют развитие сине-зеленых водорослей, которые активно формируются в летний период, когда температура воды превышает 16°C.

Для контроля процесса эвтрофикации необходим постоянный мониторинг и для этого существуют различные методы. Это контактные измерения, анализ спутниковых снимков, моделирование. Контактные измерения обладают наибольшей точностью, однако это высокие финансовые затраты, нерегулярность рейдов, данные «точечные», то есть снятие параметров происходит на определенных станциях и покрывает не большое пространство. Большая часть научного исследования, проведенного

в данной работе для исследования уровня эвтрофикации, проходила по данным концентрации хлорофилла, собранным контактными методами за 2002 – 2014 года в Финском заливе.

1.4. Оценка эвтрофикации по спутниковым данным

В настоящее время разработано множество методов дистанционного аэрокосмического зондирования океана. Основными из них являются: спектрометрирование; радиолокационная съемка; тепловая съемка в ИК-диапазоне; СВЧ-радиометрия; лазерное зондирование; лазерная и радиовысотометрия; новые многоспектральные, гиперспектральные и другие методы. [5]

Особенности использования данных спутникового зондирования позволяют представить более полную картину распределения, хлорофилла-а и уровня эвтрофикации Балтийского моря, следовательно, и Финского залива. Весь Балтийский регион, за исключением Ботнического залива и некоторых участков Ботнического моря оценивается как эвтрофированный (Рисунок 4).

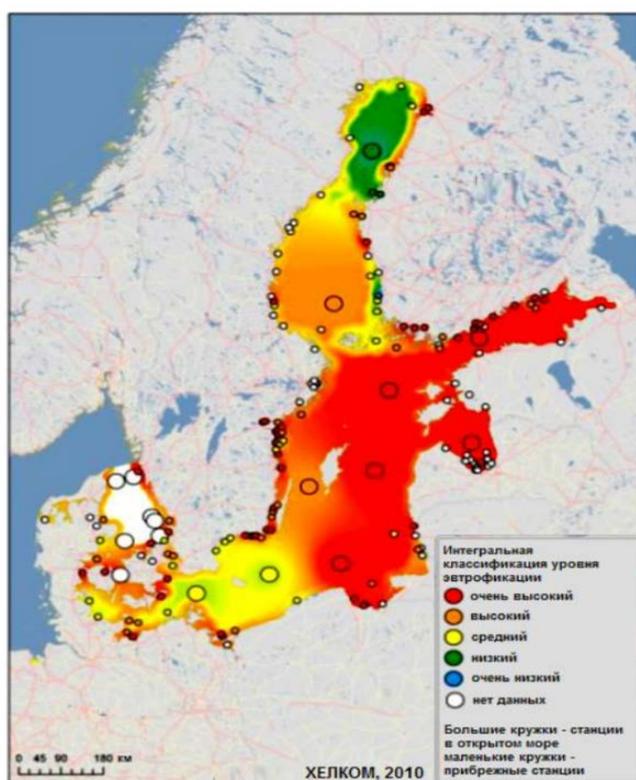


Рисунок 4. Интегральная оценка уровня эвтрофикации Балтийского моря за 2003-2007 гг. по данным HELCOM, 2009

Подобная ситуация сохранялась вплоть до 2011 года, что подтверждается данными и экспертной оценкой Хельсинской комиссии за 2003-2007 гг. Уровень эвтрофикации Балтийского моря за 2007-2011 гг. определен на основе классификации экологического статуса, определенной в рамках Водной директивы Европейского союза.

Прибрежные районы в Ортер-Бухте (Германия), внешний прибрежный Кварк (Финляндия) и внешний прибрежный Ботнический залив, внешнее прибрежное Ботническое море и внутренний и внешний прибрежные районы Кварк (Швеция) были единственными прибрежными районами, которые национальные власти оценивали, как находящиеся в хорошем экологическом статусе.

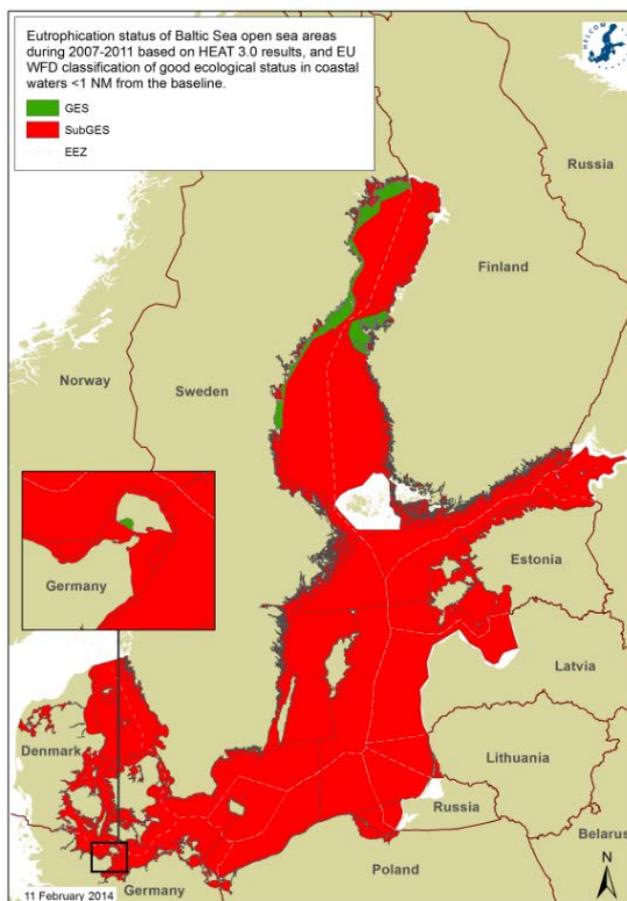


Рисунок 5. Интегральная оценка уровня эвтрофикации в 2007-2011 гг по данным HELCOM, 2011

Данные из интегральной оценки из Рисунка 5 свидетельствует о том, что, несмотря на принятые меры по сокращению внешних источников азота и фосфора в море, эвтрофикация все еще затрагивает почти весь морской район. В районах открытого моря, наиболее затронутых эвтрофикацией, находятся Финский залив, Аландское море, Рижский залив, Западный бассейн Готланд, Восточный Готландский бассейн, Борнхольмский бассейн, Гданьский бассейн и Аркона.

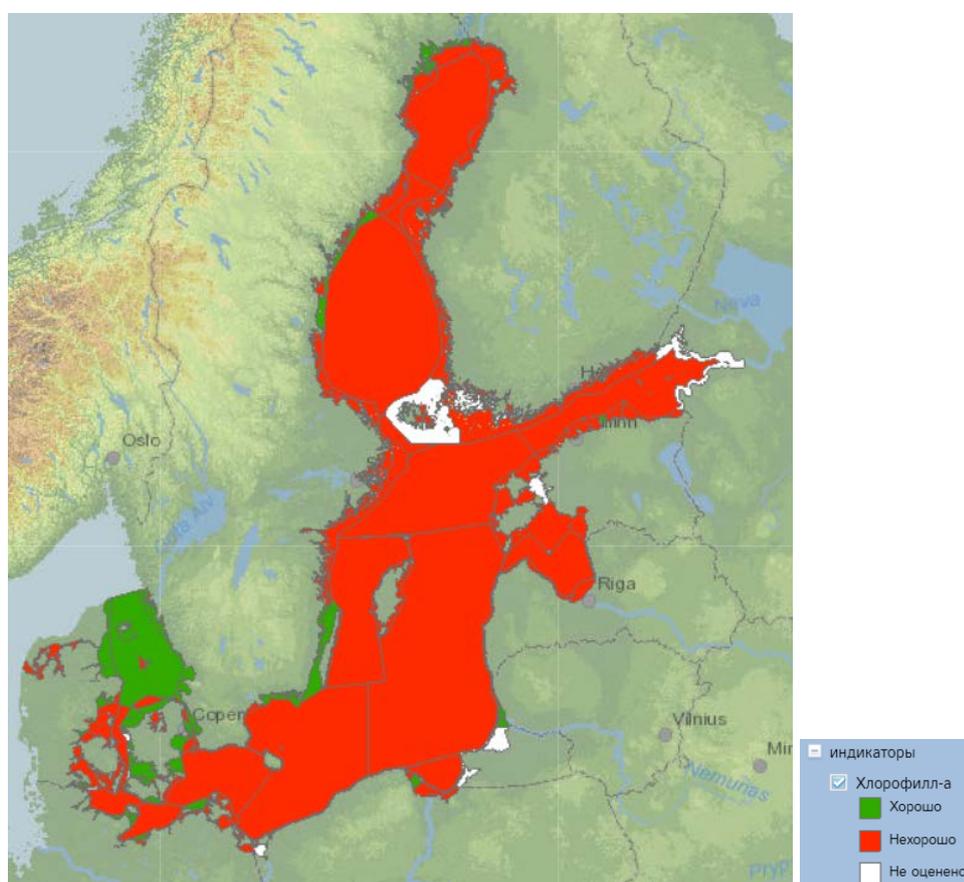


Рисунок 6. Индикаторная оценка хлорофилла-а по данным HELCOM, 2015

Рисунок 6 показывает присутствие в пространстве Балтийского моря хлорофилла-а за 2011-2015 года. Можно заметить, что значительная область обозначена красным цветом, что отражает наличие высокой плотности хлорофилла-а (как следствие - присутствия большого количества фитопланктона). Хороший статус имеет пространство у Каттегата и

некоторые прибрежные области (Северное Ботническое море, северный берег Финского залива, прибрежные воды архипелага Блекинге и Калмарсунда).

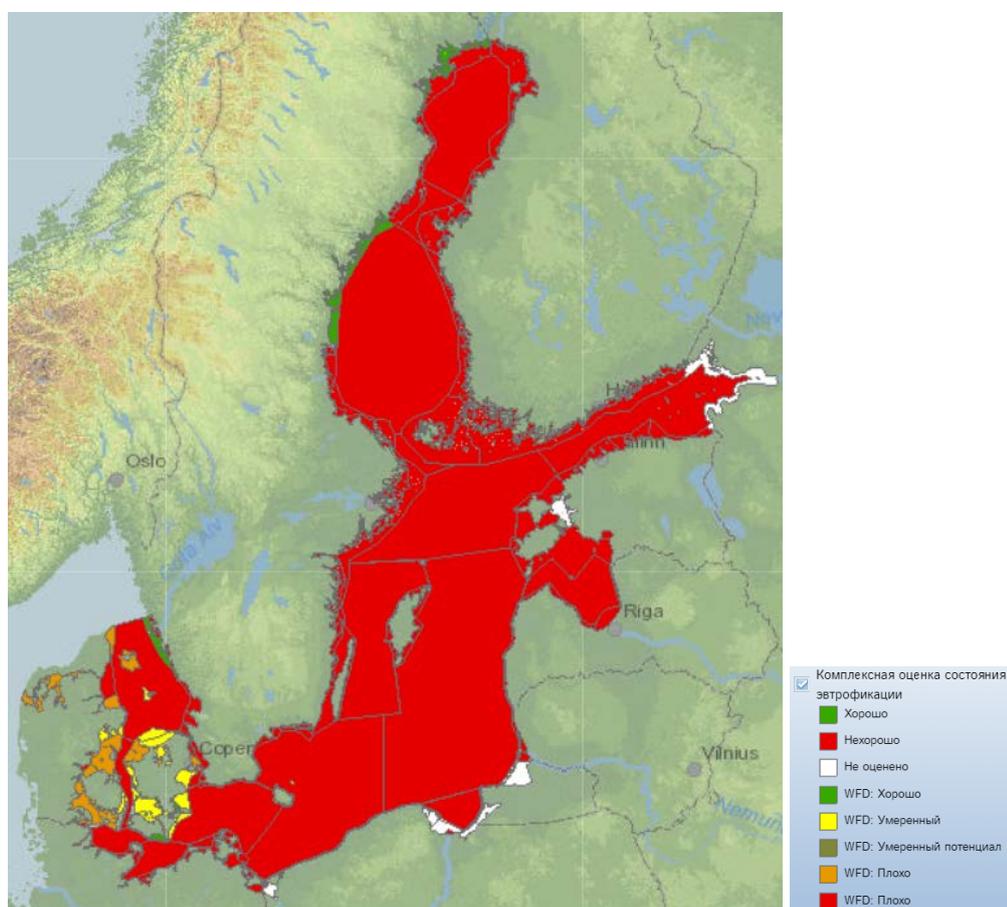


Рисунок 7. Комплексная оценка состояния эвтрофикации по данным HELCOM, 2015

Из Рисунка 7 следует, что в центральной части Финского залива эвтрофикация существенно не изменилось, но есть прибрежные области, не затронутые спутниками, данные о которых отсутствовали за весь рассматриваемый период. За период с 2002-2015 год в Балтийском море преобладают области с высокой степенью эвтрофированности, за исключением прибрежных областей Ботнического залива.

Таким образом, спутниковые данные позволяют более детальным образом оценить состояние водной поверхности, но обладают рядом недостатков. В информации со спутников имеются данные о концентрации

хлорофилла и его флуоресценции, освещенности, мутности воды, температуре, и других характеристик поверхностного слоя океана.

Но точность этой информации не так велика. Постоянное наличие облачности в районе Балтийского моря, так же затрудняет комплексную оценку исследуемой области. Имеет смысл сочетать данные спутниковых наблюдений с данными контактных измерений и математическим моделированием.

1.5. Хлорфилл-*a* и фитопланктон

Спутниковые исследования цветовых характеристик упростили процесс понимания глобальных процессов в океане, в том числе позволили исследовать оценить биопродуктивность океана и распределение фитопланктона.

Фитопланктон - микроскопические растения, передвигающиеся в воде с помощью течений. Пищей им служат биогенные вещества, это соединения азота, фосфора и кремния. Чрезмерное развитие фитопланктона, такого как сине-зеленые водоросли, является признаками эвтрофикации.

Выявление признаков эвтрофикации возможно на основе анализа состава фитопланктона. Для эвтрофированных вод свойственно снижение разнообразия видов фитопланктона при высоком количестве нескольких доминантных видов.

На интенсивность развития фитопланктона влияет прозрачность водной среды. Финский залив достаточно мелководен. В результате взмучивания, ветрового перемешивания и оседания отмерших организмов, прозрачность воды уменьшается. Особенно это свойственно прибрежным

районам. прозрачность воды так же значительно уменьшается в период интенсивного цветения.

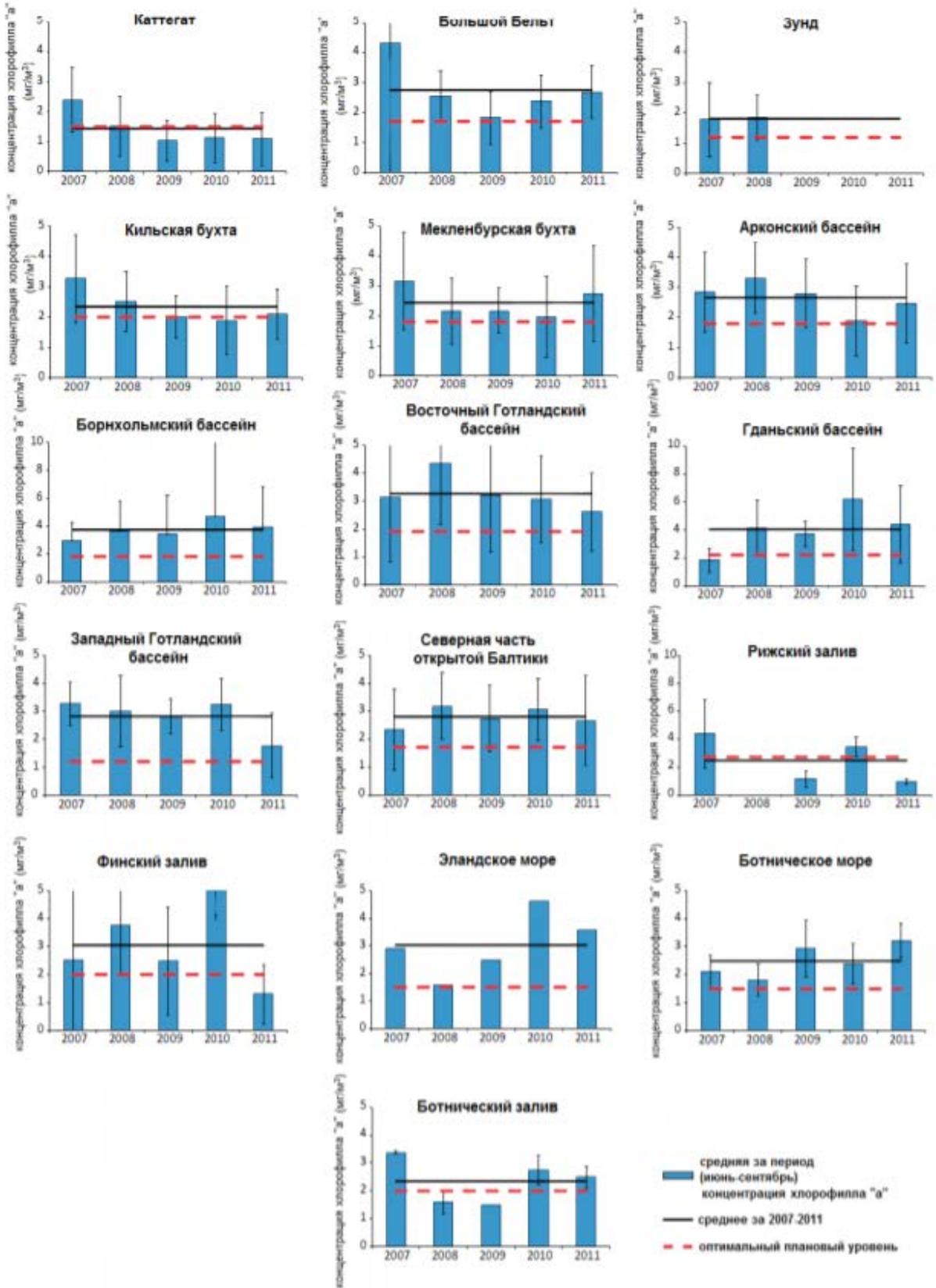


Рисунок 8. – Концентрация хлорофилла *a*, осредненная за период с июня по сентябрь за 2007-2011 гг. по данным HELCOM

Для всех растений, относящихся к категории высших растений, свойственно присутствие хлорофилла, *a* и *b*. Концентрация хлорофилла-*a* – это главный индикатор количества биомассы фитопланктона, во всех группах водорослей он присутствует. Хлорофиллы выполняют значимую роль в процессе фотосинтеза.

На настоящий момент известно примерно 10 видов хлорофиллов, различающихся по химическому составу, цвету и распространенности среди живых организмов. Концентрация хлорофилла *a* и пространственно-временной анализ его изменчивости часто одним из наиболее значимых показателей эвтрофированности вод.

То, как распределяется концентрация хлорофилла *a* в разных областях Балтийского моря за 2007-2011 гг. представлено на Рисунке 8. В Гданьском и Борнхольмском бассейнах можно отметить максимальные значения, где средней концентрацией является 4 мг/м³. Минимальные концентрации хлорофилла *a* отмечаются в Датских проливах и Ботническом заливе, где средняя концентрация составляет 1,5-2 мг/м³. (HELCOM, 2014). В Финском заливе пики концентраций относятся к 2010 году и составляют 5 мг/ м³, минимальные значения в 2011 году (1, 25 мг/ м³).

Помимо этого, хлорофилл обладает способностью к флуоресценции, которая представляет собой свечение тел, возбуждаемое освещением и продолжающееся очень короткий промежуток времени (10^{-8} - 10^{-9} с). По химическому строению хлорофиллы — сложные эфиры дикарбоновой органической кислоты — хлорофиллина и двух остатков спиртов — фитола и метилового.

Свет играет немаловажную роль в распределении фитопланктона по вертикали. Поэтому основные концентрации фитопланктона находятся в слое

воды от 0 до 15 метров. Также, сточные воды, приносящие поток биогенов, влияют на массовое развитие фитопланктона в прибрежных районах и заливах.

Увеличение или уменьшение количества фитопланктона в Балтийском море обладает ярко выраженным сезонным характером. Соответственно для среднегодовых изменений климата в Балтийском море определено четыре сезона: биологическая зима, весна, лето и осень, а также семь стадий годовой сукцессии фитопланктона: зимняя, весенний пик, начало лета, летний минимум, летний максимум, осенний период и поздняя осень. [7]

Количество фитопланктона имеет три явных пика: весенний (основной), летний и осенний. [8] Зимой незначительное разнообразие видов и низкая биомасса фитопланктона.

Весной по мере увеличения солнечных часов и установлением термоклина наступает биологический сезон, для которого характерно развитие диатомовых водорослей.

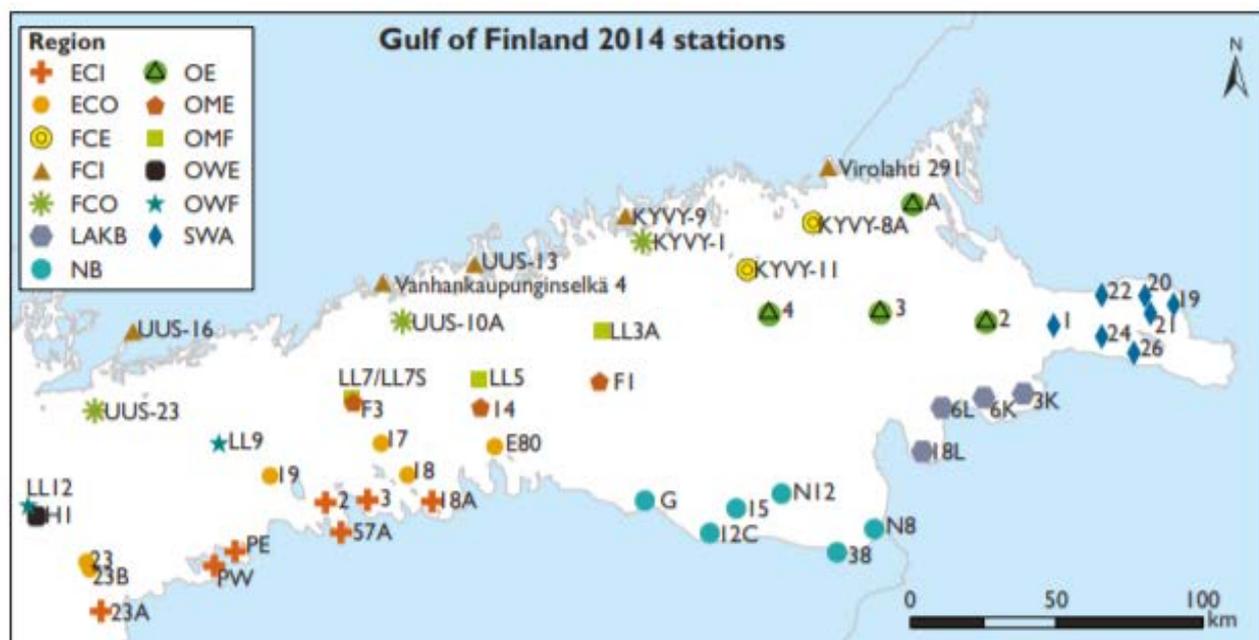
После наступления биологического лета поверхностные воды становятся бедными на биогенные элементы и устанавливается устойчивый галоклин и термоклин, на место диатомовых водорослей приходят сине-зеленые. [7]

Осенью температурный режим водных масс выравниваются по вертикали и происходит перемешивание вод, биогенные элементы выносятся из глубинного слоя в эвфотический, поэтому для диатомовых водорослей наступает второй пик развития. Затем продуктивность и суммарное количество фитопланктона постепенно сокращается до зимних концентраций. Это имеет взаимосвязь с понижением уровня солнечной радиации. [9]

2. Методы исследования

2.1. Исходные данные

Для исследования уровня эвтрофикации были использованы данные по концентрации хлорофилла за 2002 – 2014 года в Финском заливе, относящиеся к данным мониторинга качества воды предоставленными из Эстонии, Финляндии и России. (Рисунок 9)



GOF2014 station map. ECI = Estonian Coast In, ECO = Estonian Coast Out, FCE = Finnish Coast East, FCI = Finnish Coast In, FCO = Finnish Coast Out, LAKB = Luga and Koporye Bays, NB = Narva Bay, OE = Offshore East, OME = Offshore Middle EST, OMF = Offshore Middle FIN, OWE = Offshore West EST, OWF = Offshore West FIN, SWA = Shallow Water Area. Graph: Marco Nurmi.

Рисунок 9. Карта станций GOF (The Gulf of Finland)

База данных включает 12747 измерения на 231 уникальных станциях. Все станции расположены в Финском заливе между 22 – 30° в.д. и 58 – 61°с.ш, их географическое положение обозначено на карте (Рисунок 10). Наибольшее количество измерений проводилось в 2008-2014 годах, основная

масса выполненных станций приходилась на Выборгский залив и южное побережье Финского залива.

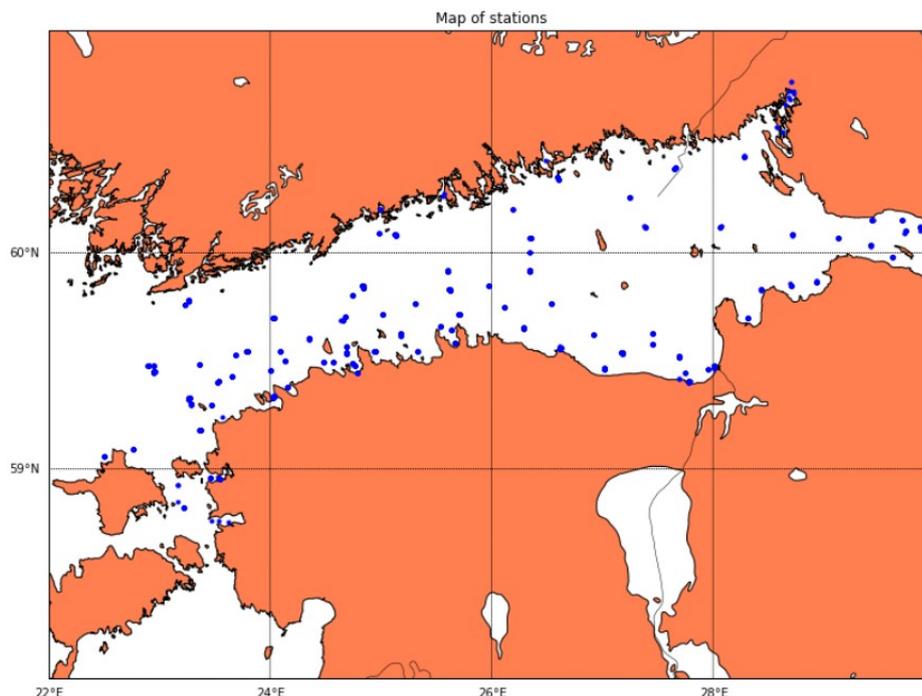


Рисунок 10. Карта распределения станций

Каждое измерение включает в себя информацию о дате, времени, географических координатах и значениях хлорофилла на заданных горизонтах (Таблица 1). Максимальная глубина в данных измерениях достигала 40 метров с максимальным значением 500 мкг/л. Минимальное значение находилось на поверхности и составляло 0,01 мкг/л. Среднее значение составляло 3,61 мкг/л.

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	70.0	0.22
1	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	69.0	0.21
2	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	68.5	0.20
3	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	68.0	0.21
4	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	67.5	0.20
5	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	67.0	0.21
6	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	66.5	0.22
7	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	66.0	0.20
8	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	65.5	0.20
9	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	65.0	0.19
10	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	64.5	0.20
11	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	64.0	0.19
12	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	63.0	0.21
13	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	62.0	0.19
14	2014.0	8.0	14.0	12.0	59.804	24.74	61.5	0.19

Таблица 1. Пример исходных данных

Данные распределены неравномерно, на многих станциях отсутствовали значения на некоторых горизонтах. В результате проведенного анализа также было выявлено значительное присутствие выбросов, то есть значений существенно выходящих за пределы средних значений концентраций хлорофилла-а, выявленных за многолетний период исследования Балтийского моря и Финского залива. (Таблица 2).

Region / Station	Depth (m)	Surface salinity (g/kg)	Obs Chl <i>a</i>	Mean Chl <i>a</i> (µg/l)	Mean Chl <i>a</i> 2013–2014	Obs DIN	Mean DIN (µmol/l)	Mean DIN 2014–2015	Obs DIP	Mean DIP (µmol/l)	Mean DIP 2014–2015
EST Coast In			339	4.4	4.9	217	6.1	8.1	214	0.71	1.05
2	44	5.9	112	4.2	4.5	41	5.8	8.5	44	0.77	1.05
3	40	5.5	58	4.0	4.3	36	5.3	7.8	36	0.82	1.11
PE	21	6.0	19	4.1	3.7	30	5.6	7.4	27	0.60	0.92
18A	46	5.3	10	4.8		33	5.3	6.5	33	0.80	1.24
23A	25	6.1	17	3.1		20	6.3		20	0.51	
57A	10	5.9	104	5.3	6.5	27	8.3	10.7	27	0.77	1.03
PW	24	5.9	19	3.9	5.1	30	6.5	6.7	27	0.55	0.93
EST Coast Out			38	4.2	3.0	126	5.2	6.3	118	0.69	1.09
17	102	5.3	12	4.3	2.6	42	5.4	6.5	39	0.77	1.22
18	96	5.1	12	4.2	3.6	33	5.5	6.9	31	0.70	1.17
19	85	5.9	7	4.4	3.1	30	4.9	6.2	30	0.63	1.01
23	90	6.3	7	3.7	2.9	21	4.7	5.6	18	0.59	0.90
FIN Coast East			400	6.2	4.8	189	12.5	10.9	189	1.13	0.92
KYVY-II	65	4.2	200	5.5	4.2	61	10.2	10.8	61	1.11	0.91
KYVY-8A	48	3.7	200	7.0	5.6	128	13.6	11.2	128	1.14	0.94
FIN Coast Out			639	5.4	4.7	390	8.8	8.3	395	0.90	0.87
39A	42	5.2				46	9.7	9.6	49	0.90	0.92
KYVY-I	28	3.5	175	6.3	6.5	76	13.1		76	0.89	
UUS-10A	53	5.3	268	5.7	6.2	109	8.5	7.9	109	1.04	0.87
UUS-23	60	5.9	196	4.3	3.0	159	6.7	7.1	161	0.83	0.81

Таблица 2. Региональные среднегодовые значения концентраций хлорофилла-а (The Gulf of Finland assessment, 2016)

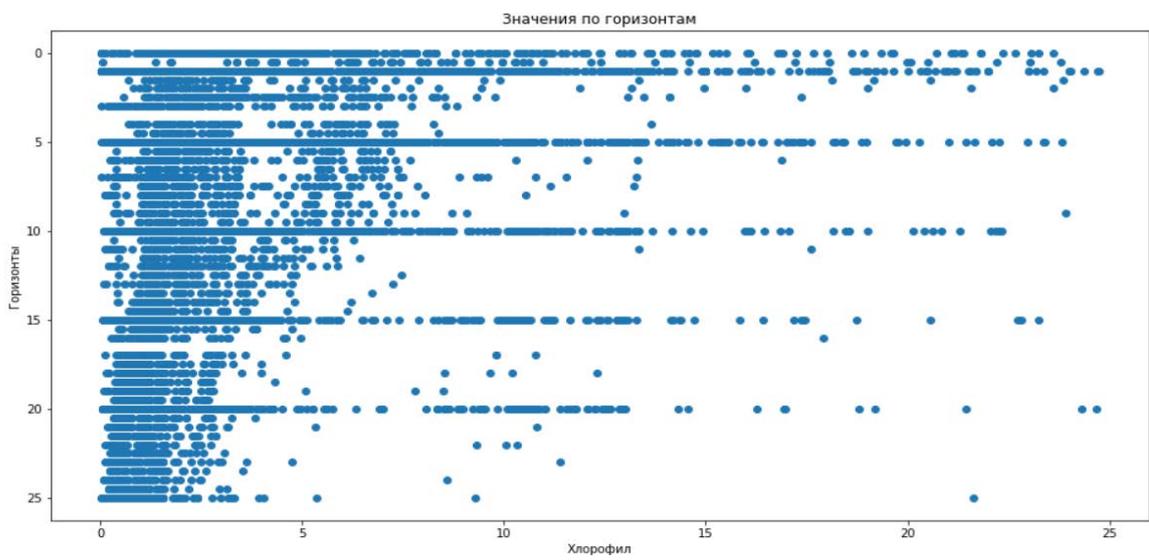


Рисунок 11. Распределение значений концентрации хлорофилла по глубине

В следствие примененных ограничений осталось 7743 измерения из изначальных 12747 (Рисунок 11). Как можно заметить, с глубиной концентрация хлорофилла уменьшается, что подтверждает Рисунок 12. На поверхности большая часть данных принимает значение около 3 мкг/л, максимум, в основном, располагается на глубине 5 метров, ниже 20 метров значение не меняется и составляет менее 1мкг/л.

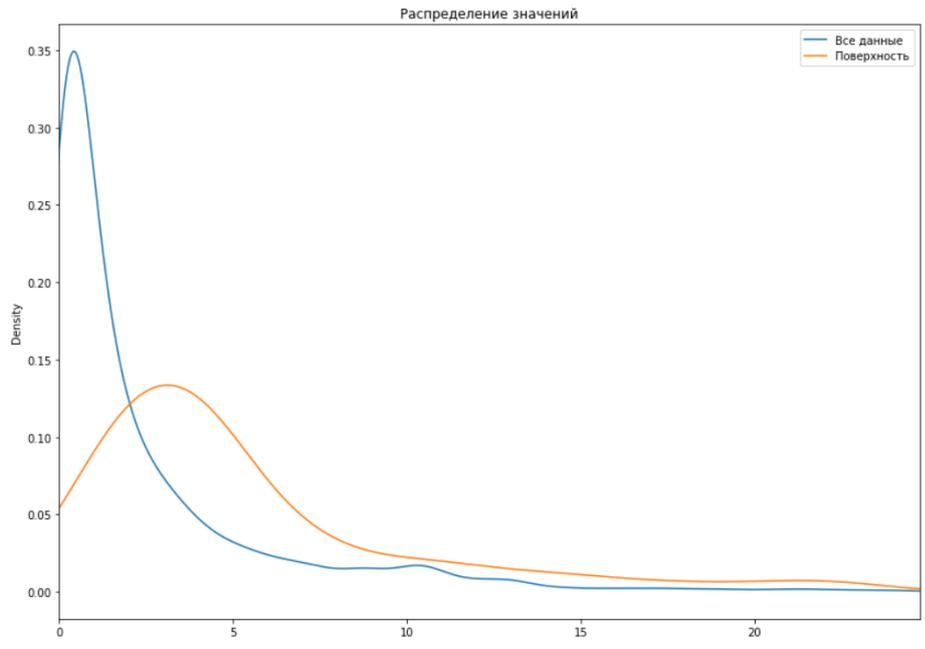


Рисунок 12. Распределение значений хлорофилла на поверхности и на глубине

Данные, превышающие региональные среднегодовые концентрации хлорофилла-а и данные на глубине свыше 20 метров были отброшены. Так как на глубинах ниже фотического слоя хлорофилл отсутствует. Таким образом осталось 383 профиля хлорофилла-а для дальнейшего исследования. Визуально исходные профили представлены на рисунках 13.1 – 13.4.

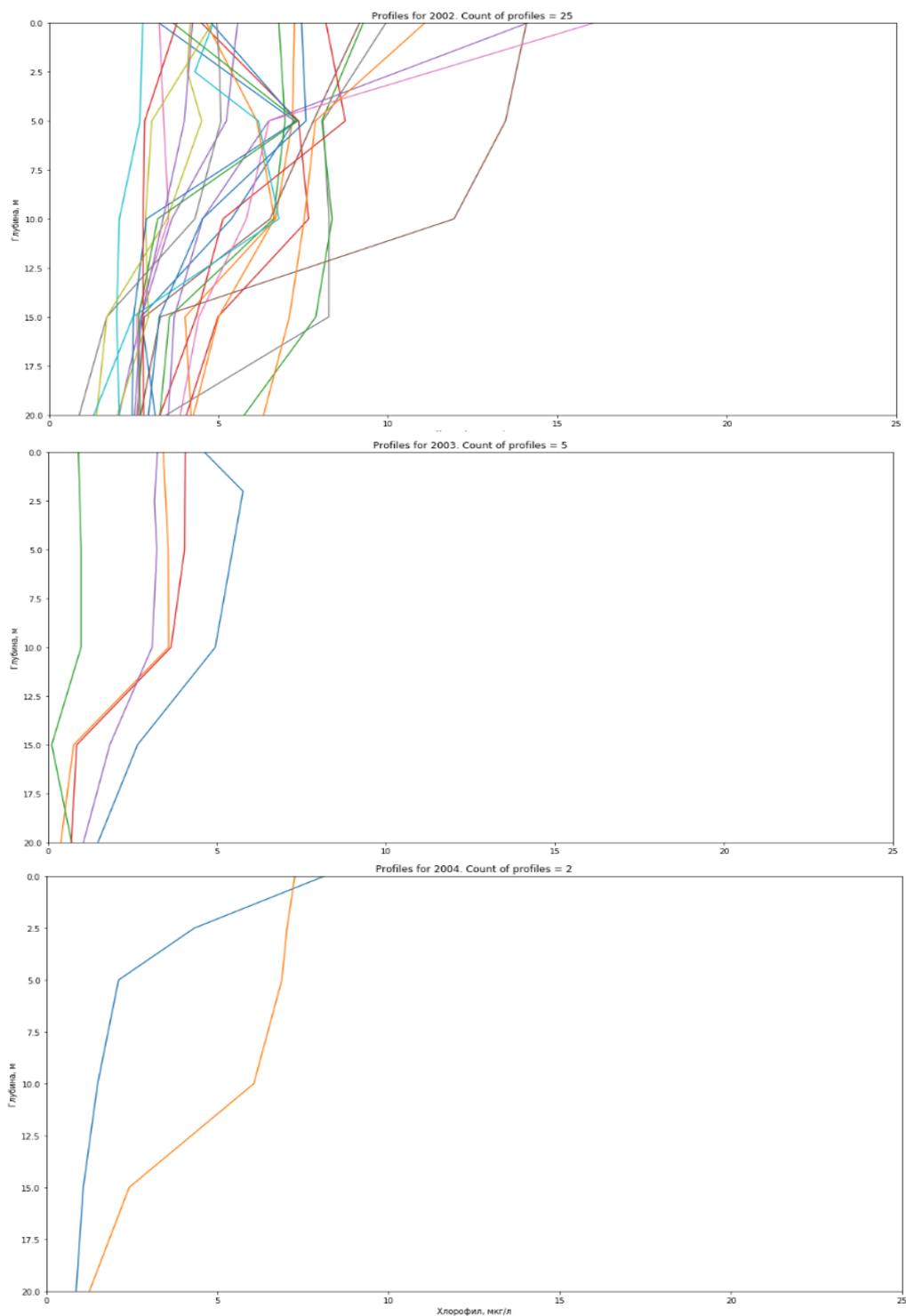


Рисунок 13.1. Исходные профили 2002-2004 гг

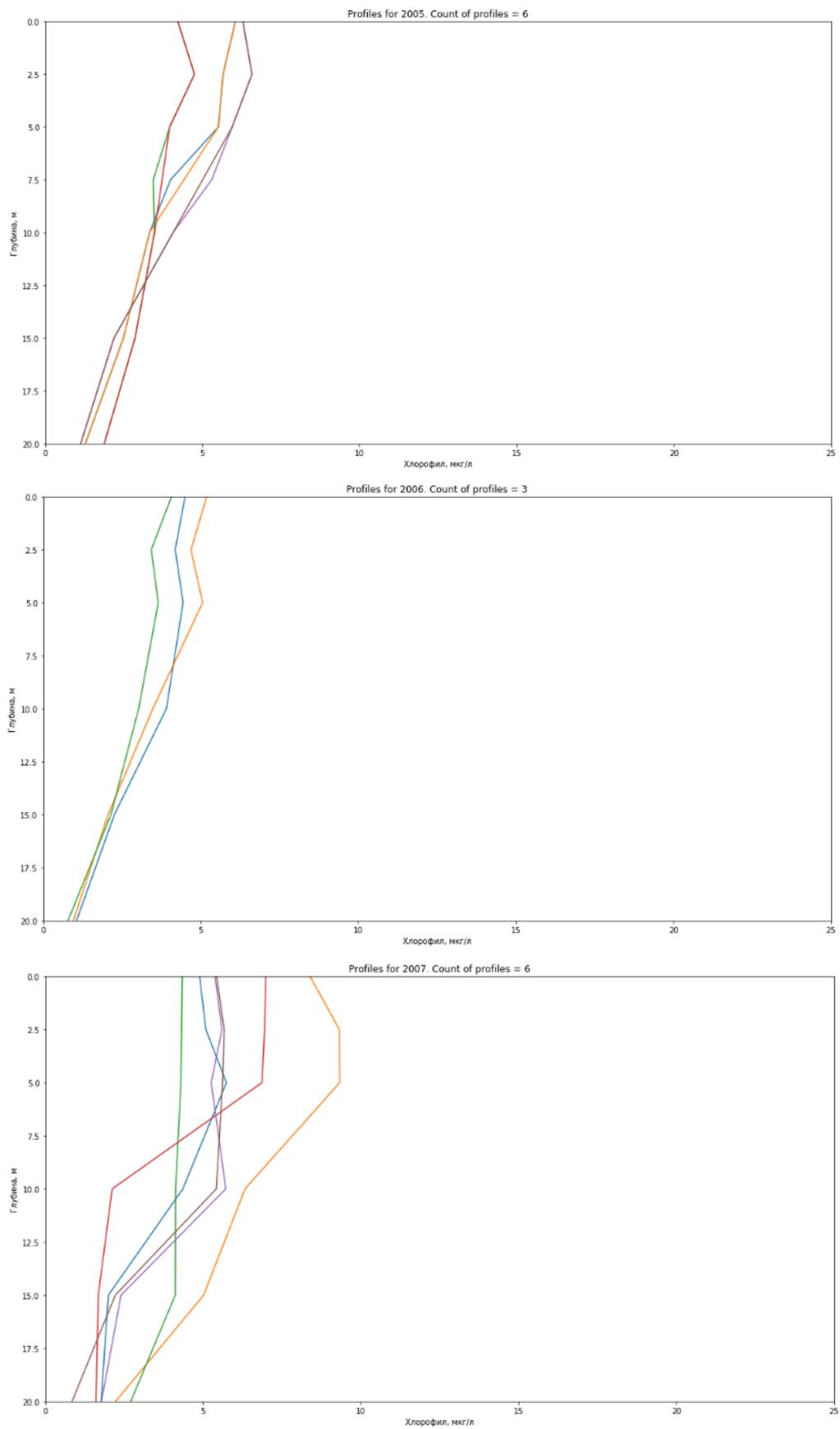


Рисунок 13.2. Исходные профили 2005-2007 гг

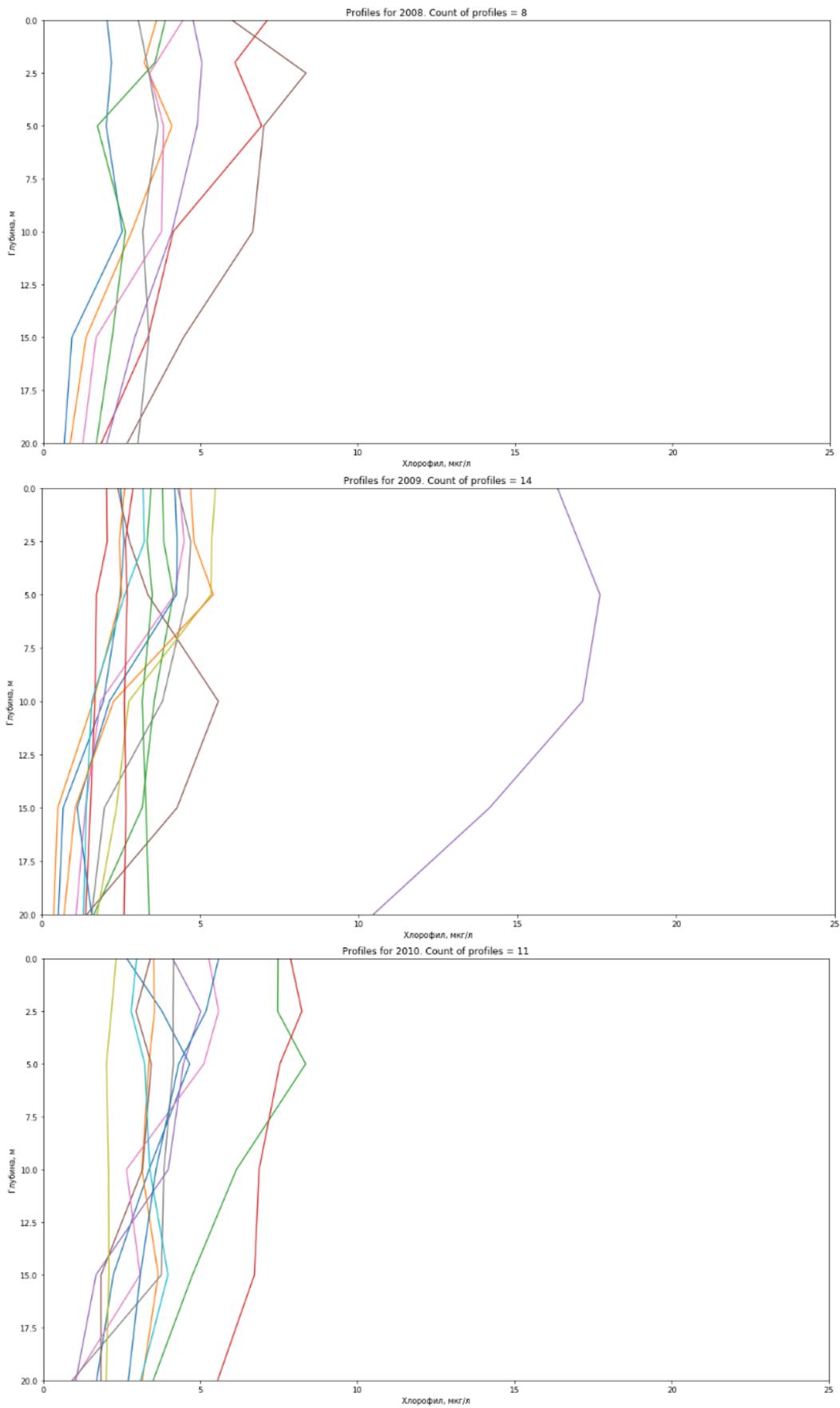
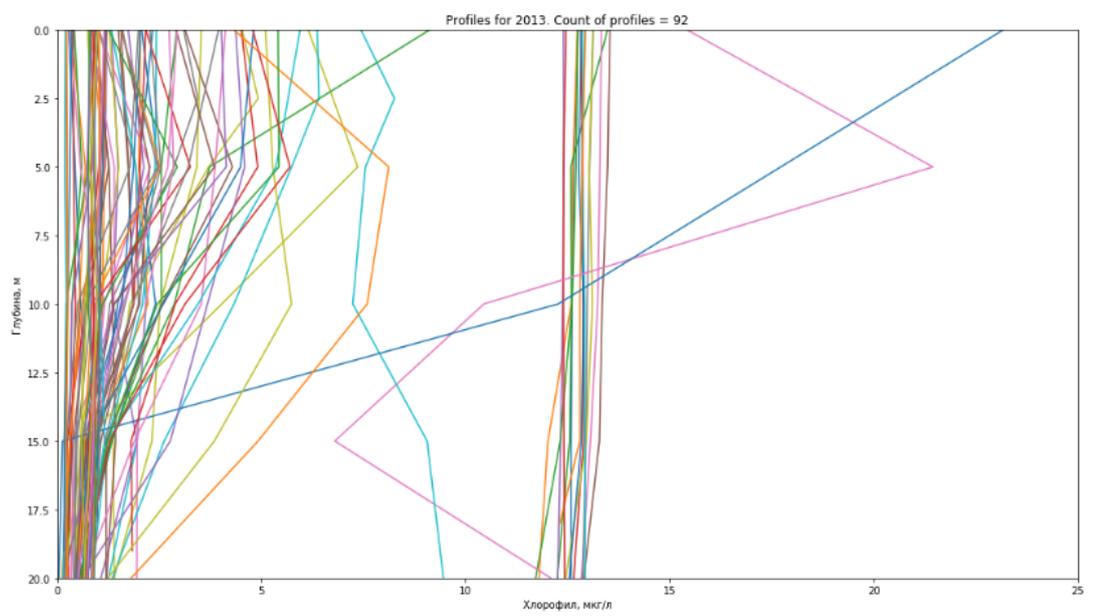
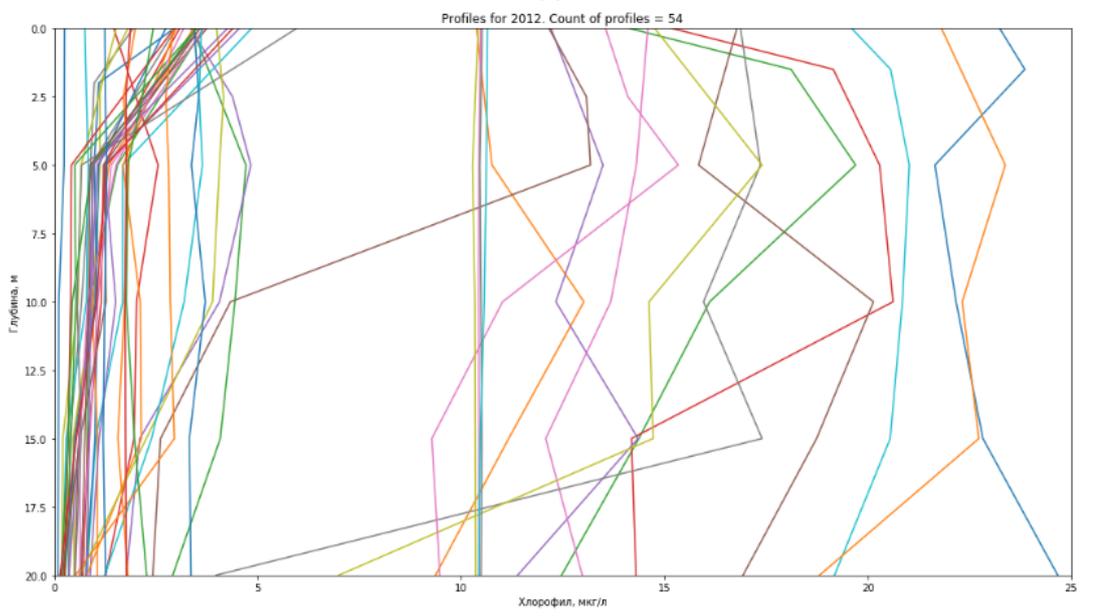
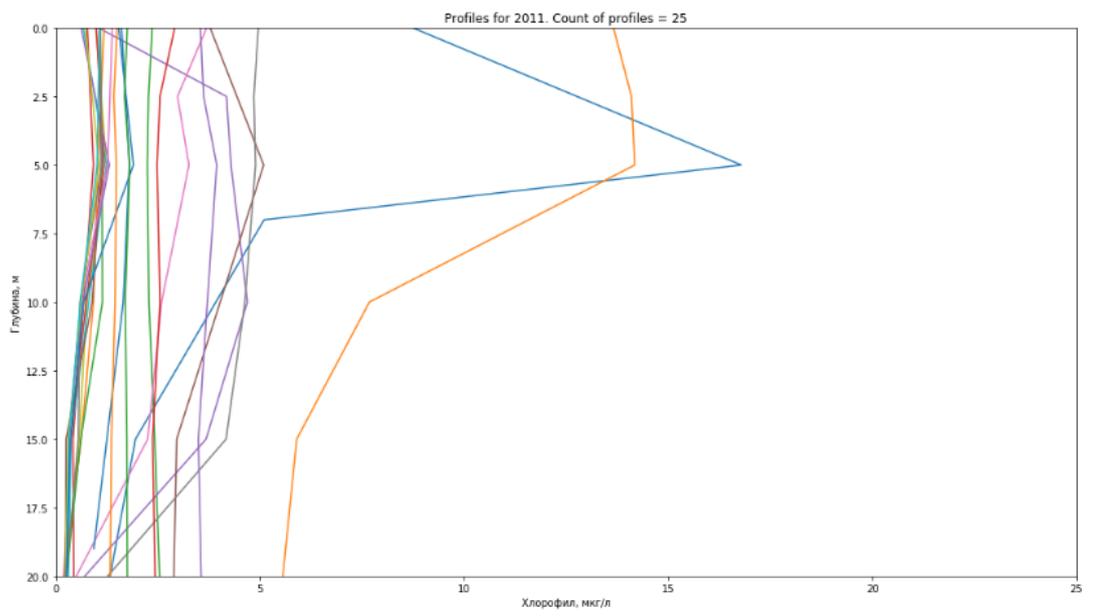


Рисунок 13.3. Исходные профили 2008-2010 гг



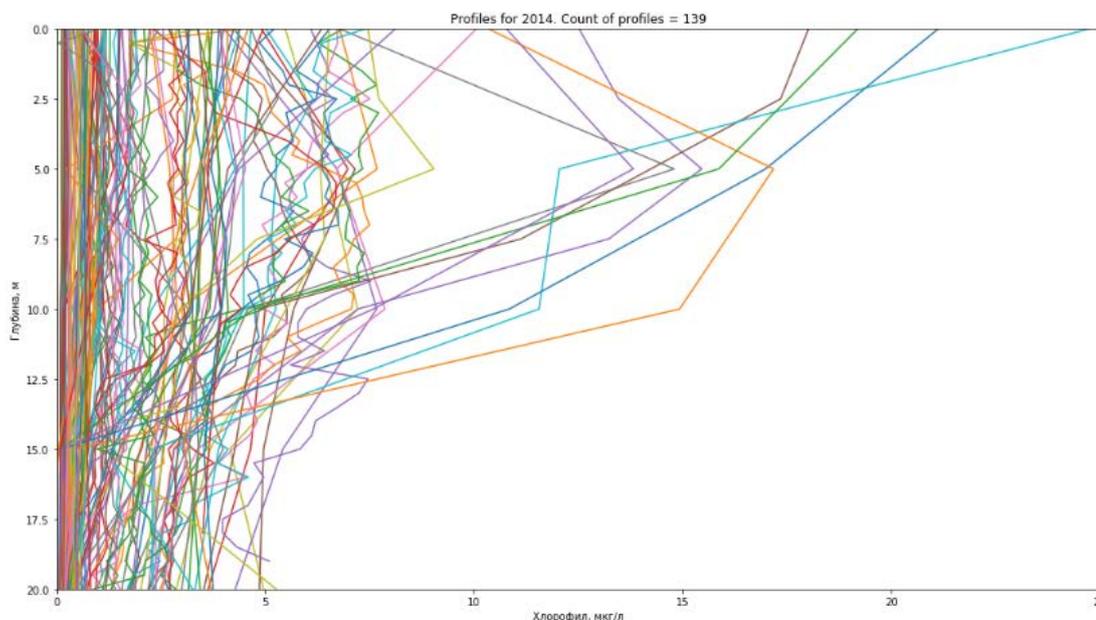


Рисунок 13.4. Исходные профили 2011-2014 гг

На Рисунках 13.1-13.4 визуализированы исходные профили. Можно заметить, что большая часть данных сосредоточена в 2012 (54 профиля), 2013 (92 профиля), 2014 году (139 профилей из 383). С 2002 по 2011 год профилей не много, максимальное количество в 2002 и 2011 годах (по 25 значений). Каждый год содержит различные профили: с «пиком» значений, хлорофилла на разных глубинах.

2.2. Параметрическое моделирование

Процесс моделирования с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами называется параметрическим моделированием. С момента появления систем автоматизированного проектирования появилась возможность осуществлять параметризацию, что произошло в 1989 году. Сущность процесса можно описать так: создается математическая модели с заданными параметрами. Эти параметры будут отображать как распределяются характеристики и какое влияние на процесс они оказывают.

Для подробного изучения некоторых процессов, которые происходят в океане, и в атмосфере, требуется огромное количество данных. В качестве примера можно взять жизнедеятельность фитопланктона, которая является фундаментальной в процессе функционирования водной экосистемы. То, как развивается фитопланктон в морских экосистемах уже не один год является предметом интереса различных исследователей. Получить достоверную и надежную информацию о фитопланктоне достаточно сложно из-за пространственной неоднородности и быстрой изменчивости состояния водной среды.

Спутниковая информация содержит данные о концентрации хлорофилла-*a*, мутности воды, освещенности, температуре, и ряде других характеристик поверхностного слоя океана. Но точность этой информации не так велика. Применение математических моделей дает возможность в полной мере использовать доступную информацию о фитопланктоне и изучить суть процесса, даже при недостаточном количестве данных.

Параметризация дает возможность оценить процент содержания хлорофилла в толще воды, который обеспечивает наблюдаемые концентрации на поверхности. Важным моментом является качество полученной модели. Для этого есть необходимость в сравнении с натурными данными. Для восстановления профилей в данном исследовании важен учет значения на поверхности, глубине залегания максимальных и минимальных концентраций хлорофилла-*a*, вертикальном градиенте.

2.3. Параметризация профилей

Чтобы получить более конкретное представление того, как изменяется хлорофилл-*a*, исходные профили важно привести к некоторому унифицированному виду. Параметризация, которую в 1988 году предложил Платт в статье «Phytoplankton and Thermal Structure in the Upper Ocean:

Consequences of Nonuniformity in Chlorophyll Profile» может быть использована для этой цели. В то время не было автоматизированной возможности определять максимальное значение хлорофилла, и параметризация Платта предполагала вариант решения проблемы восстановления вертикального распределения хлорофилла-а по нескольким параметрам (B_0 , Z_{max} , h , σ). [10]

В 1993 году исследователи Matsumura и Shiomoto [10] произвели улучшение качества модели, добавив вертикальный градиента концентрации хлорофилла (S), в формуле 2.1. он определен вторым слагаемым. Исходя из этого, расчетная формула выглядит следующим образом [10]:

$$\text{Chl}(z) = B_0 + S \times Z + \frac{h}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(Z-Z_{max})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2.1)$$

где $Chl(z)$ является концентрацией хлорофилла (мг / м³) на глубине Z (м), B_0 - фоновая концентрация хлорофилла на поверхности моря (мг / м³), S это вертикальный градиент концентрации хлорофилла (мг/ м³/м), h – общий хлорофилл выше фона (мг/м²), σ - стандартное отклонение Гауссова распределения, контролирует толщину максимального хлорофилла в слое (м), а Z_{max} - глубина залегания максимума хлорофилла (м).

Идеальная модель распределения хлорофилла в интерпретации Matsumura и Shiomoto учитывает: общий градиент вертикального распределения, фоновую концентрацию хлорофилла, общее превышение хлорофилла над фоновым значением, стандартное отклонение.

Зона максимального градиента располагается в поверхностном слое и выражена одним максимумом (Рисунок 13).

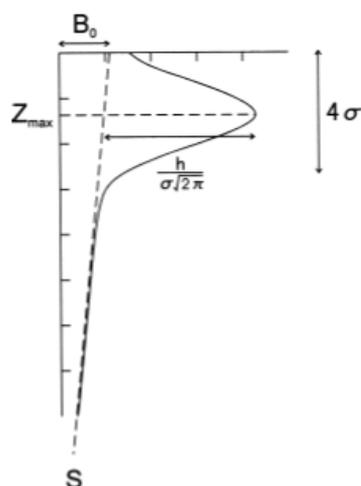


Рисунок 13. Модель вертикального распределения хлорофилла, согласно Matsumura и Shiomoto [10]

Модель Платта применялась долгие годы для исследования различных бассейнов. Мильян-Нуньес использовал эту модель в Калифорнии, где она продемонстрировала свою полезность. [10]

2.4. Кластерный анализ

Кластерный анализ представляет из себя многомерную статистическую процедуру, выполняющую сбор данных, содержащих информацию о выборке объектов, и затем упорядочивающую объекты в сравнительно однородные группы.

Спектр применения кластерного анализа весьма широк и используется в различных областях. Задачей кластерного анализа является: разработка классификации и исследование схем группировки объектов. Данные должны описываться сходным набором характеристик или признаков. Каждый объект в свою очередь описывается расстояниями до всех остальных объектов пространства (матрица расстояний между объектами). Затем определяется степень сходства объектов выборки между собой в метрическом пространстве.

Подобное разбиение выборки на группы помогает упростить дальнейший анализ данных и отдельно анализировать каждый кластер. Интерес представляют, как крупные группы кластеров, так и нетипичные профили, которые не вписываются в другие кластера. Существуют различные методы кластеризации.

В целях данного исследования было использовано 4 метода кластеризации:

- иерархическая кластеризация
- DBSCAN (Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise)
- Спектральная
- k-means.

Иерархическая кластеризация — совокупность алгоритмов упорядочивания данных, использующих разделение крупных кластеров на более мелкие или объединение мелких в более крупные, визуализация которых обеспечивается с помощью графов. Алгоритмы упорядочивания данных указанного типа исходят из того, что некое множество объектов характеризуется определённой степенью связности. Предполагается наличие вложенных групп (кластеров различного порядка). Соответственно, выделяют разделительную (дивизивную) и агломеративную (объединительную) кластеризации.

В агломеративной кластеризации сначала каждый объект исходного множества рассматривается как отдельный кластер, затем находятся два объекта, расстояние между которыми минимально, и объединяются в один и т. д. Данная процедура продолжается до тех пор, пока все объекты не будут собраны в единственный кластер.

В дивизивной кластеризации исходное множество данных поначалу рассматривается как один кластер, затем он разделяется на два, те в свою очередь еще на два и т. д. до тех пор, пока каждый из них не будет состоять

из единственного объекта. В результате образуется иерархическое дерево кластеров, и есть возможность выбрать конфигурацию, подходящую к решаемой задаче.

DBSCAN - плотностной алгоритм пространственной кластеризации с присутствием шума, оперирует плотностью данных. Алгоритм был предложен Мартином Эстер, Хансом-Питером Кригелем в 1996 году для решения задачи разбиения данных на кластеры произвольной формы. Каждый кластер внутри характеризуется плотностью объектов, которая заметно выше, чем плотность снаружи кластера. Для каждой точки кластера её соседство заданного радиуса должно содержать не менее некоторого числа точек, которое задаётся пороговым значением.

Спектральная кластеризация использует спектр (или по другому собственные значения матрицы сходства данных) для осуществления понижения размерности перед кластеризацией в пространствах меньшей размерности. Матрица состоит из количественных оценок относительной схожести каждой пары точек в данных.

Метод k-средних – это метод кластерного анализа, целью которого является разделение наблюдений на кластеры, так, чтобы каждое значение относилось к тому кластеру, к центру (центроиду) которого оно ближе всего.

Наиболее информативными способами кластеризации себя показали иерархическая и k-средних.

Кластеризация данных осуществлялась на языке программирования Python 3.6. Использовались библиотеки:

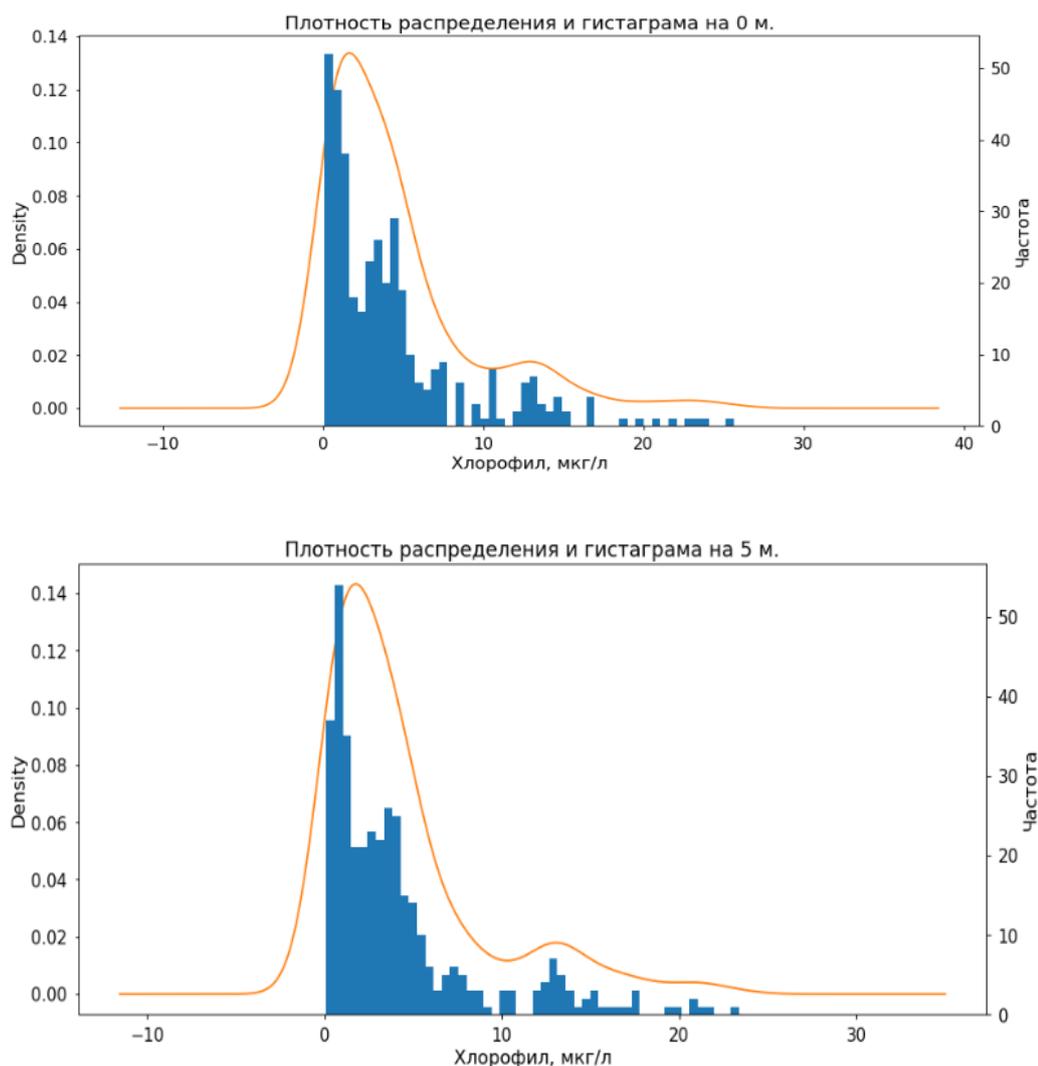
- Pandas, numpy – для манипуляции данными и матричных вычислений.
- Sklearn и scipy – для кластеризации и научных вычислений.
- Matplotlib, seaborn – для визуального представления.
- Basemap – для визуализации на карте.

3. Анализ пространственно-временной изменчивости хлорофилла-а

3.1. Работа с исходными данными

Была построена гистограмма распределения плотности хлорофилла-а на 0, 5, 10, 20 метрах. На рисунке 3.1. можно увидеть, что на поверхности и пяти метрах в основном преобладают незначительные концентрации до 3 мкг/л. На 10 – 20 метрах преобладают значения от 3 до 10 – 15 мкг/л.

Плотность распределения концентрации по горизонтам говорит о том, что профили разделяются на 2 крупных класса (2 моды), 3 класс присутствует, но профилей, попадающих в него значительно меньше, чем в первые два класса.



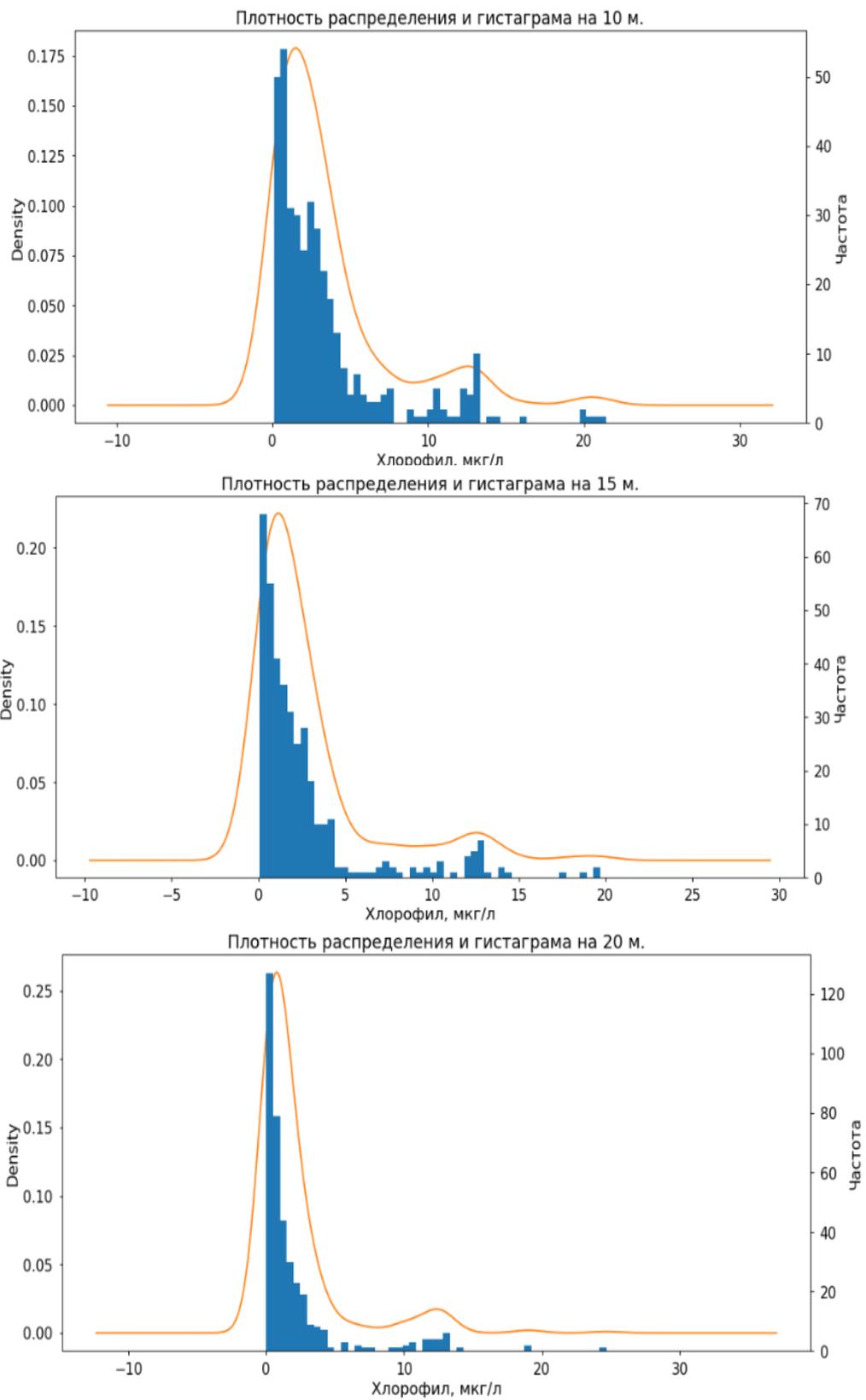


Рисунок 3.1. Плотность распределения и гистограмма значений хлорофилла на стандартных горизонтах

Один из подходов объединения данных в кластеры – это метод «локтя» (Рисунок 3.2). Метод «локтя» рассматривает характер изменения разброса итерации с минимальным значением, с увеличением числа групп. Объединив все наблюдения в одну группу, мы получим наибольшую внутри кластерную дисперсию, которая будет снижаться до 0 при оптимальном количестве классов. Строится функция, отражающая изменение суммы внутри кластерных вариаций данных от количества кластеров. Подходящее число кластеров такое, где отмечается наибольшее изменение этой функции. Согласно методу «локтя», оптимальное количество кластеров равно 7.

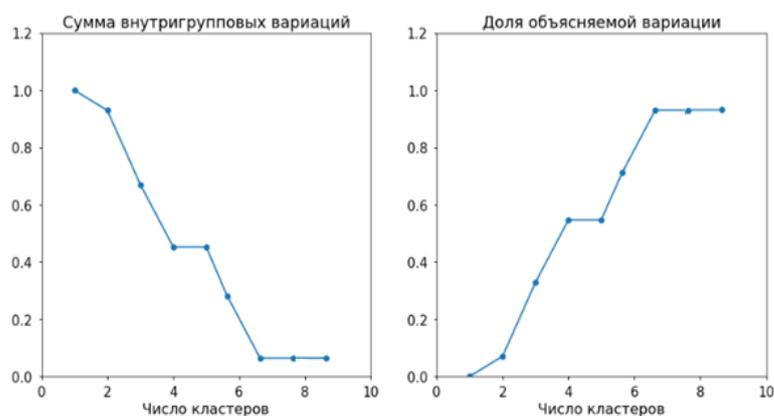


Рисунок 3.2. Визуализация методом «локтя»

Далее, по формуле Matsumura и Shiomoto (формула 2.1) строим восстановленные профили. В качестве примера, на Рисунке 3.3 - профили за 2014 год, на который приходится большая часть данных.

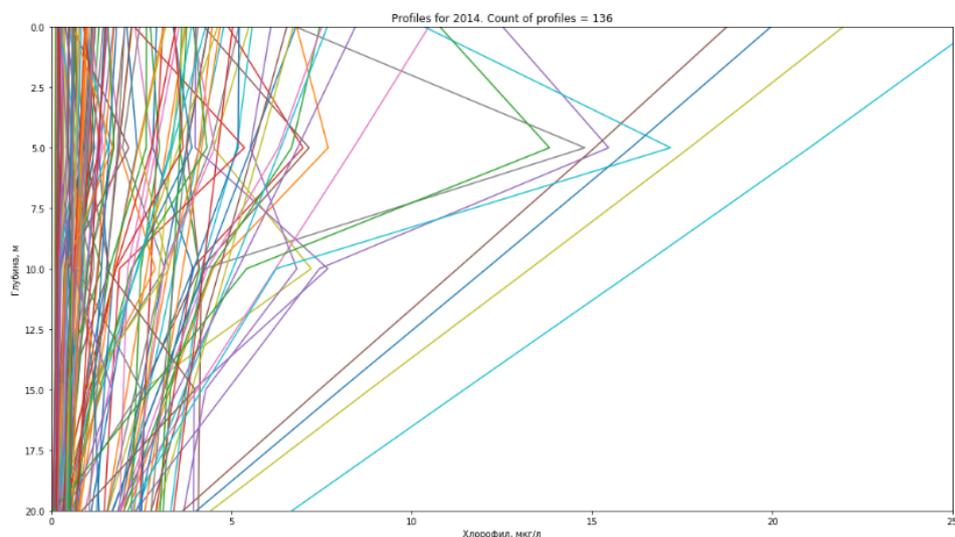


Рисунок 3.3. Восстановленные по Matsumura и Shiomoto профили

3.2. Иерархическая кластеризация

Выделим однородные группы объектов исходя из представлений о близости элементов между собой на основе метода иерархической кластеризации. Данные являются набором количественных признаков (то есть точек многомерного факторного пространства) на основе формулы Matsumura и Shiomoto, это: концентрация хлорофилла-а на поверхности (B_0), вертикальный градиент концентрации хлорофилла-а (S), общий хлорофилл выше фона (h), толщина максимального хлорофилла в слое (σ), глубина залегания максимума хлорофилла (Z_{max}).

Элементы имеющие близкие значения количественных признаков характеризуются малым Евклидовым расстоянием между друг другом и похожи между собой. Следующим шагом элементы объединяются в группы. Расстояние между двумя кластерами – это минимальное расстояние между элементами, принадлежащими им.

С помощью метода главных компонент размерность данных была снижена до двух главных компонент, на которые проецировался результат кластерного анализа (Рисунок 3.4). Задача метода главных компонент – определить в многомерном пространстве данных такие направления, которые максимально характеризуют изменчивость данных. Основная ось метода та, проекция данных на которую дает максимальную вариацию, вторая ось определяется аналогичным образом. Главные компоненты остаются неизменными независимо от количества кластеров. Далее выбираем вариант разбиения, где кластеры оптимальным образом разделены в факторном пространстве и проекция это отражает.

При разбиении на 7 классов (по методу локтя), иерархическая кластеризация разбивает данные таким образом, что наибольшее количество профилей попадает в 3, 6, 7 класс (Рисунок 3.5.1 - Рисунок 3.5.3).

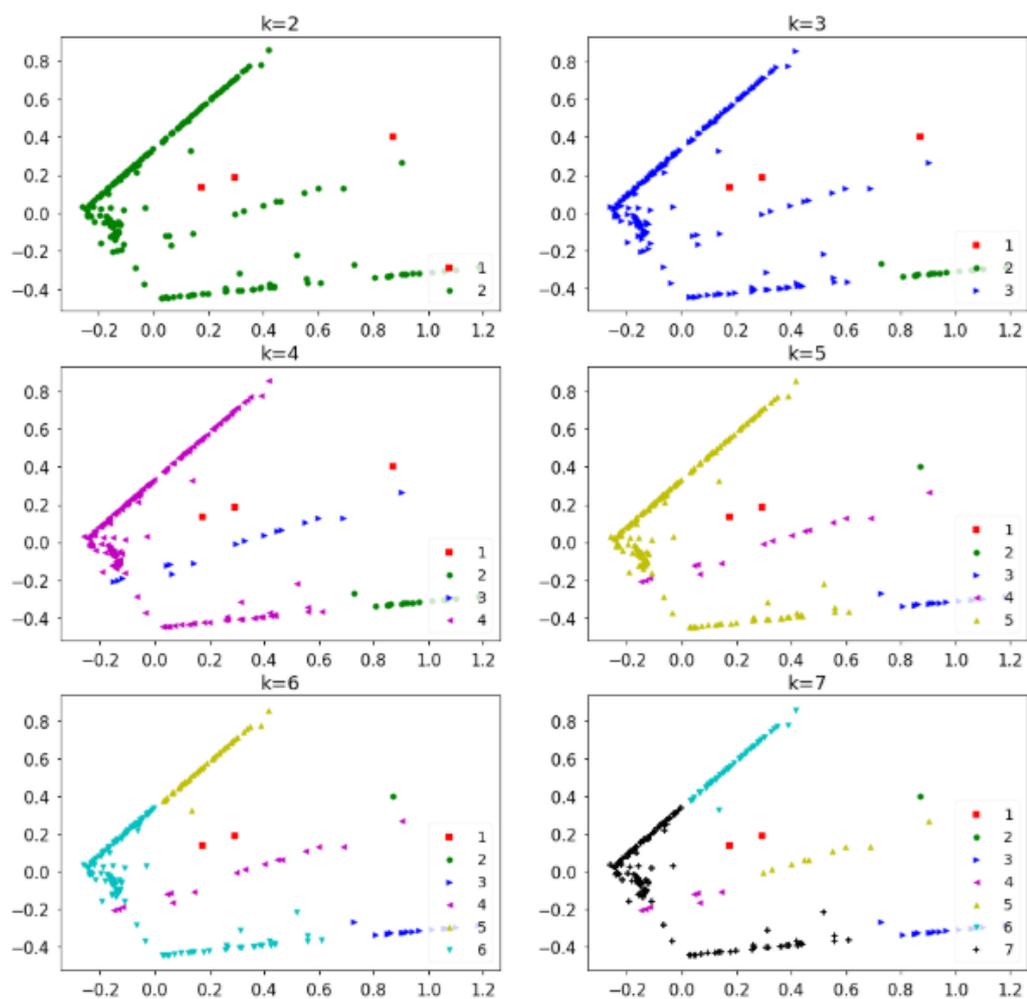


Рисунок 3.4. Проекция на главные компоненты при разном количестве кластеров.

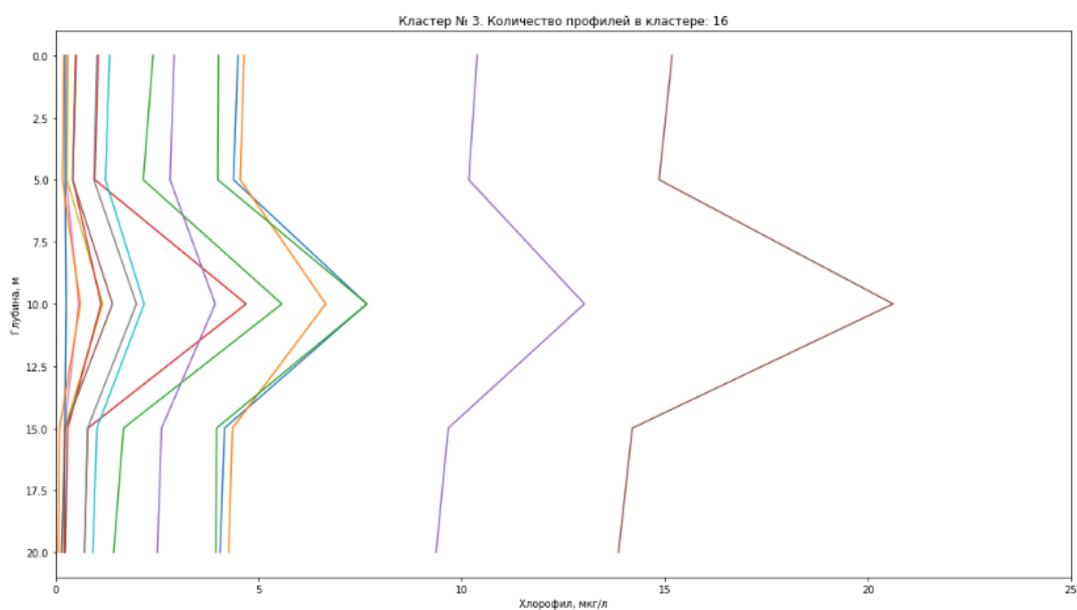


Рисунок 3.5.1. Восстановленные профили хлорофилла-*a*, кластер №3

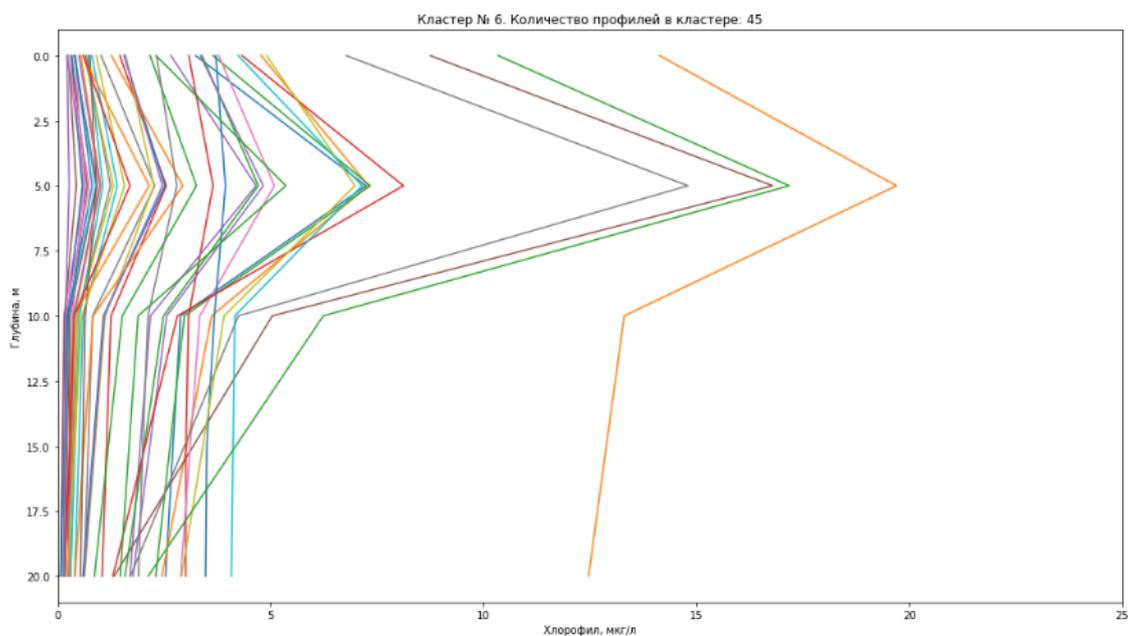


Рисунок 3.5.2. Восстановленные профили хлорофилла-*a*, кластер №6

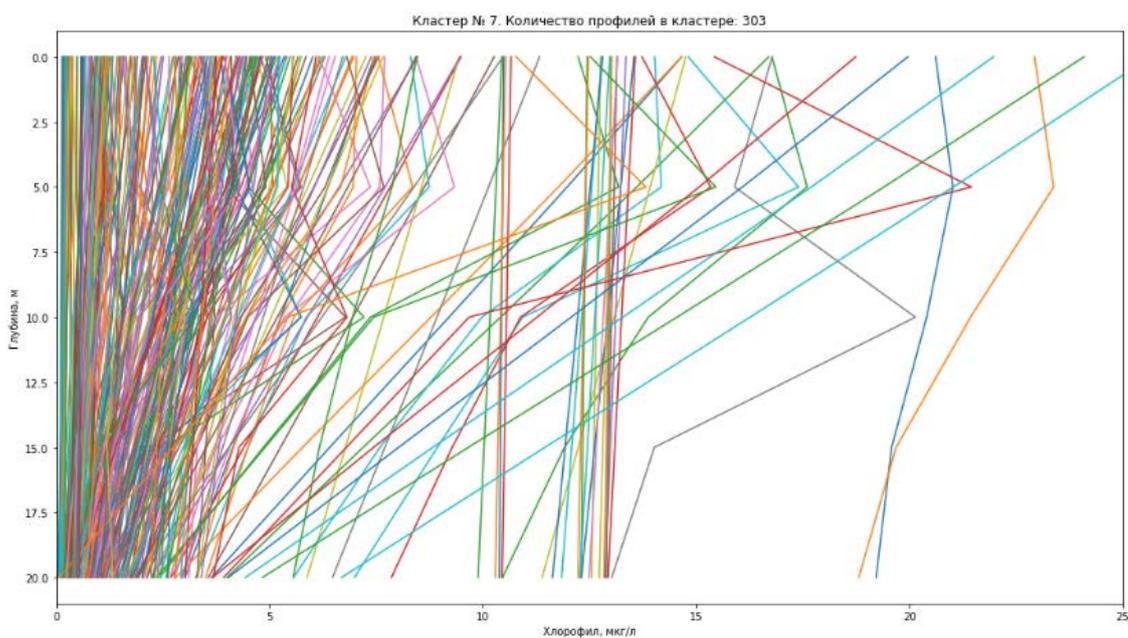


Рисунок 3.5.3. Восстановленные профили хлорофилла-*a*, кластер №7

Рисунок 3.4.1 описывает кластер №3, который включает в себя профили с максимальным значением на 10 метрах. Кластер 6 (Рисунок 3.5.2) описывает профили с максимальным значением на 5 метрах. Кластер 7 (Рисунок 3.5.3.) описывает большую часть данных, 303 профиля из 383 и включает в себя профили с различным распределением хлорофилла-*a*. Оставшиеся 19 профилей распределены в 1, 2, 4, 5 классе. Таким образом,

можно сделать вывод, что иерархическая кластеризация разбивает данные не самым удачным образом, объединяя большую часть различных профилей в один кластер.

3.3. Кластеризация методом k-средних

Целью метода k-средних является разделение m наблюдений (из пространства R^n) на k кластеров. Каждое наблюдение относится к тому кластеру, к центру (центроиду) которого оно ближе всего. Количество кластеров задается заранее. В качестве меры близости используется Евклидово расстояние (Формула 3.1)

$$\rho(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_p - y_p)^2}, \text{ где } x, y \in R^n \quad (3.1.)$$

Если мера близости до центроида определена, то для разбиения объектов на кластеры сводится к определению центроидов этих кластеров. На первом этапе центроиды кластеров выбираются случайно или по определенному правилу (например, центроиды, максимизирующие начальные расстояния между кластерами).

Относим наблюдения к тем кластерам, чье среднее (центроид) к ним ближе всего. Каждое наблюдение принадлежит только к одному кластеру, даже если его можно отнести к двум и более кластерам.

Затем центроид каждого i -го кластера перевычисляется по следующему правилу:

$$\mu_i = \frac{1}{s_i} \sum_{x^{(j)} \in S_i} x^{(j)}$$

Таким образом, алгоритм k-средних заключается в перевычислении на каждом шаге центроида для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге.

Алгоритм останавливается, когда значения μ_i не меняются: $\mu_i^{\text{mar } t} = \mu_i^{\text{mar } t+1}$

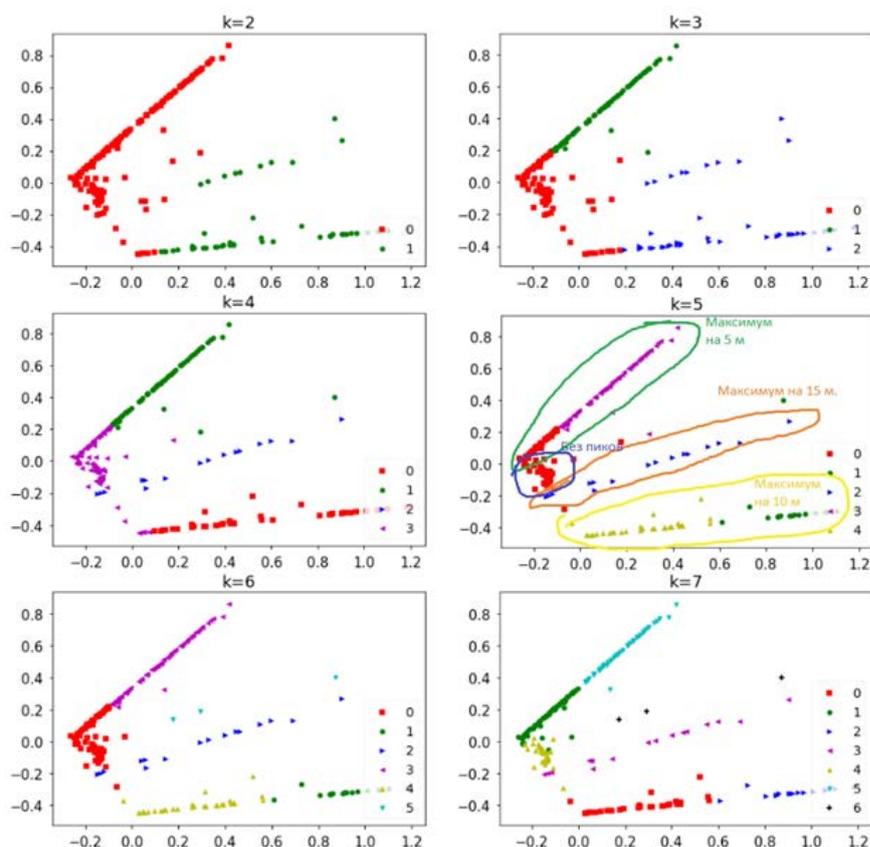


Рисунок 3.6. Проекция на главные компоненты методом *k*-средних

Число кластеров в алгоритме было задано равным 7, которое разделяло данные таким образом, что в каждый кластер попадали данные со схожим хлорофиллом-*a* по глубине. Визуализация профилей показала, что некоторые классы, объединяющие кластеры с похожим распределением, можно объединить (Рисунок 3.6), в частности 1 и 5, а также 0 и 2 класс.

№ кластера	% данных описываемых кластером	№ кластера	% данных описываемых кластером после объединения
0	8%	0	12%
1	18%	1	30%
2	4%	3	4%
3	4%	4	53%
4	53%	6	1%
5	12%		
6	1%		

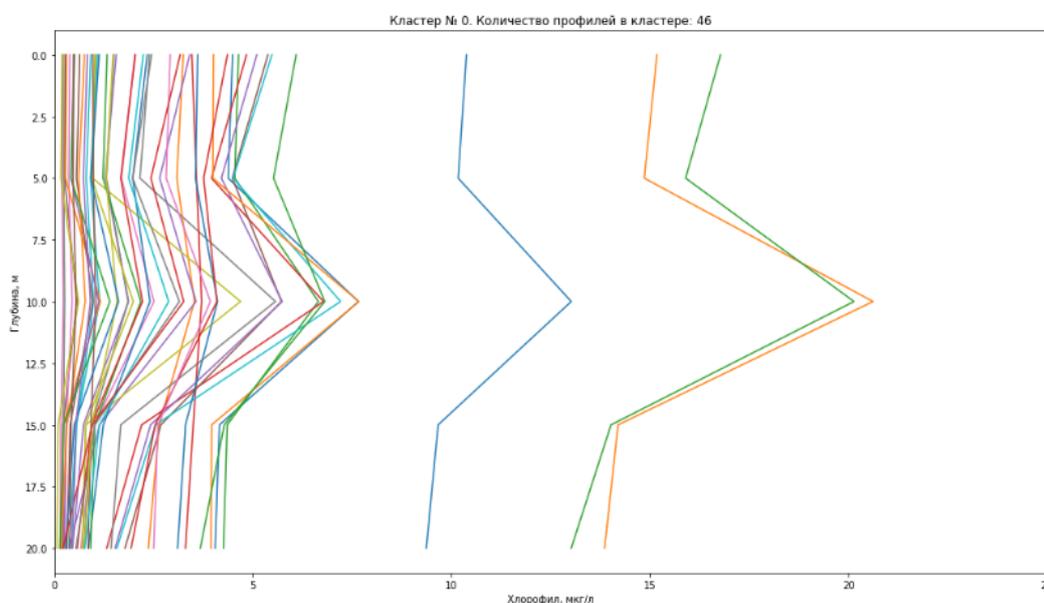
Таблица 3.1. Процент данных в каждом кластере до и после объединения кластеров

Из Таблицы 3.1. видно, что после объединения кластеров, можно выделить три крупных кластера, описывающих 95% данных. Это кластер № 0, 1, 4.

	средний максимум	средний минимум	среднее значение
0	3.93918	1.87199	2.73496
1	4.844	1.7096	3.08711
3	3.69562	1.65403	2.69875
4	4.96668	2.28281	3.62595
6	12.2233	9.23401	10.5375

Таблица 3.2. Описательная статистика полученных после объединения кластеров

Для кластера 0 среднее значение хлорофилла-а 2,73 мкг/л, среднее максимальное значение 3,94 мкг/л, среднее минимальное 1,87 мкг/л. Для кластера 1 среднее значение хлорофилла-а 3,08 мкг/л, среднее максимальное значение 4,84 мкг/л, среднее минимальное 1,71 мкг/л. Для кластера 4 среднее значение хлорофилла-а 3,62 мкг/л, среднее максимальное значение 4,96 мкг/л, среднее минимальное 2,28 мкг/л. В 6 кластер входит 3 профиля, которые характеризуются повышенными значениями. В кластер 3 входит 16 профилей, со средними значениями близкими к значениям 0 кластера (Таблица 3.2). Визуализируем полученные профили для каждого кластера.



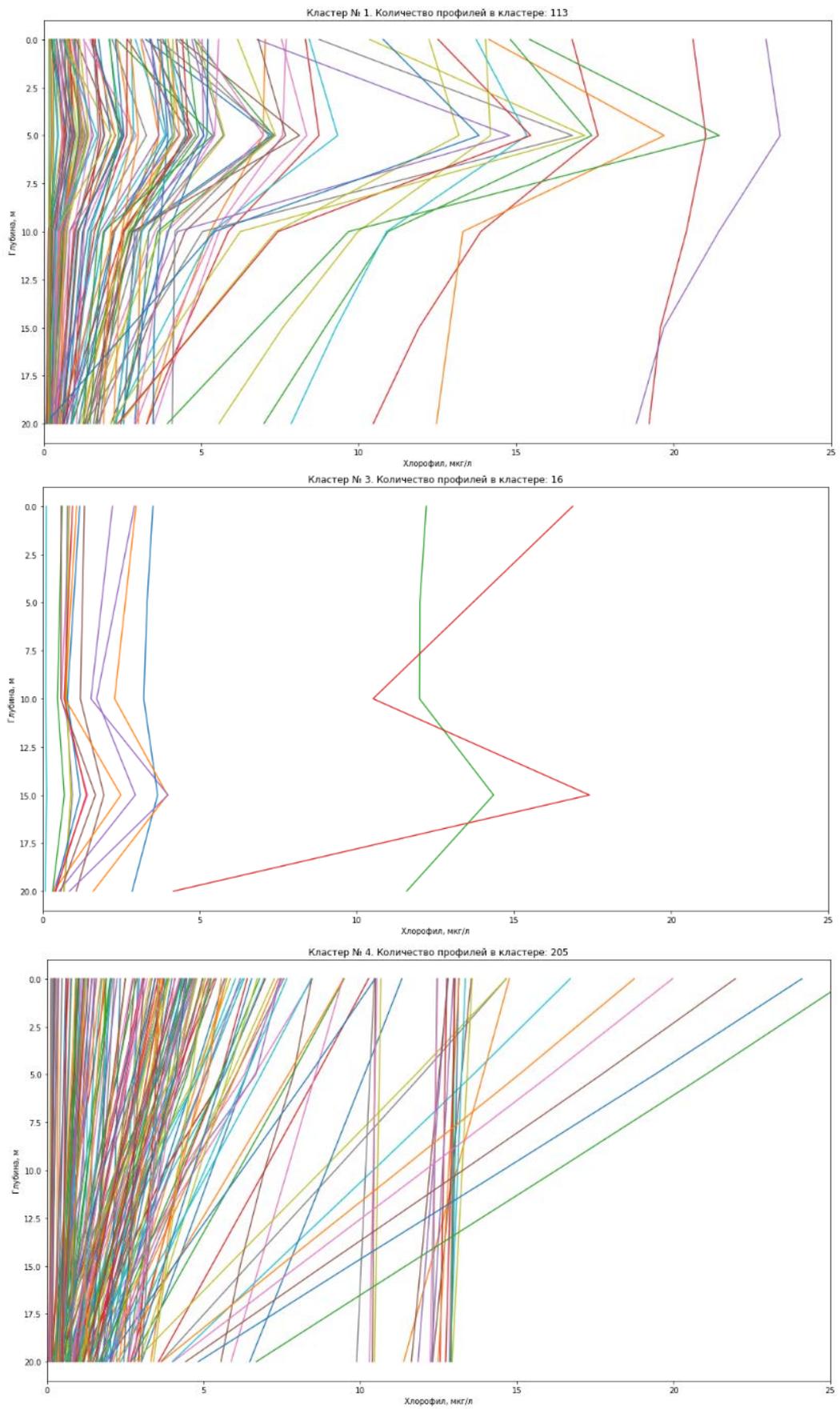


Рисунок 3.7. Визуализация профилей, полученных по кластеризации к-средних

Из Рисунка 3.7 видно, что вертикальное распределение концентрации хлорофилла-а подразделяется на 4 типа. Тип А – максимальное значение хлорофилла-а находится в приповерхностном слое (5 метров). Тип В – максимальное значение вблизи поверхности моря (10 метров). Тип С – максимальное значение ниже поверхностного слоя моря (15 метров). Тип D – отсутствует значительный градиент.

Кластер №1 относится к типу распределения А, характеризующимся наличием выраженного подповерхностного максимума на глубинах 3-5 метров. Кластер №0 относится к типу распределения В, характеризующимся интенсивным перемешиванием, с выраженным максимумом на 10 метрах. Кластер №3 относится к типу распределения С, с максимальным значением на 15 метрах. Средние концентрации в данном классе не превышают 3,69 мкг/л, но присутствуют 2 профиля с высоким поверхностным значением хлорофилла-а 12 мкг/л и 17 мкг/л. Максимум составляет 14 мкг/л и 18 мкг/л, соответственно. Кластер №4 относится к типу распределения D, который появляется при сильном перемешивании в поверхностном слое и равномерном распределении биогенных веществ по глубине.

Полученные кластеры были нанесены на географическую карту (Рисунок 3.8). Поскольку кластеры накладываются друг на друга, имеет смысл визуализировать каждый кластер на карте отдельно.

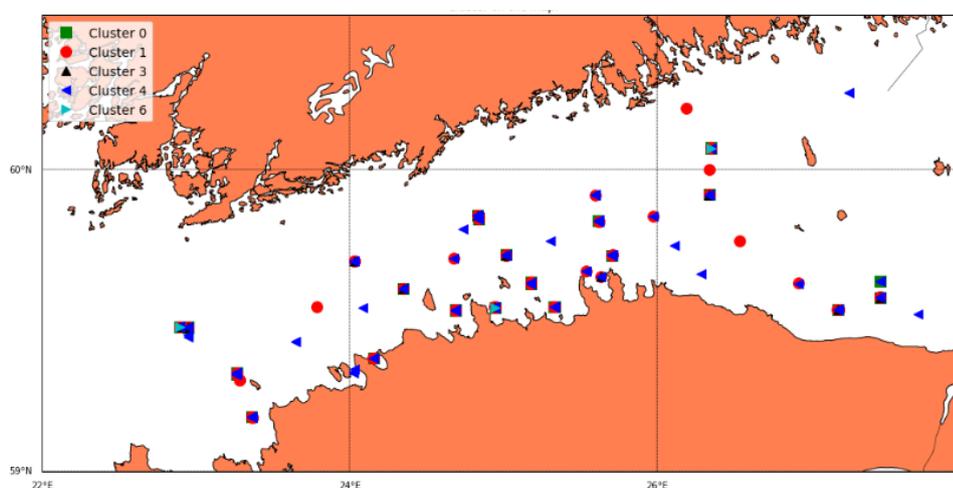


Рисунок 3.8. Распределение всех кластеров на карте

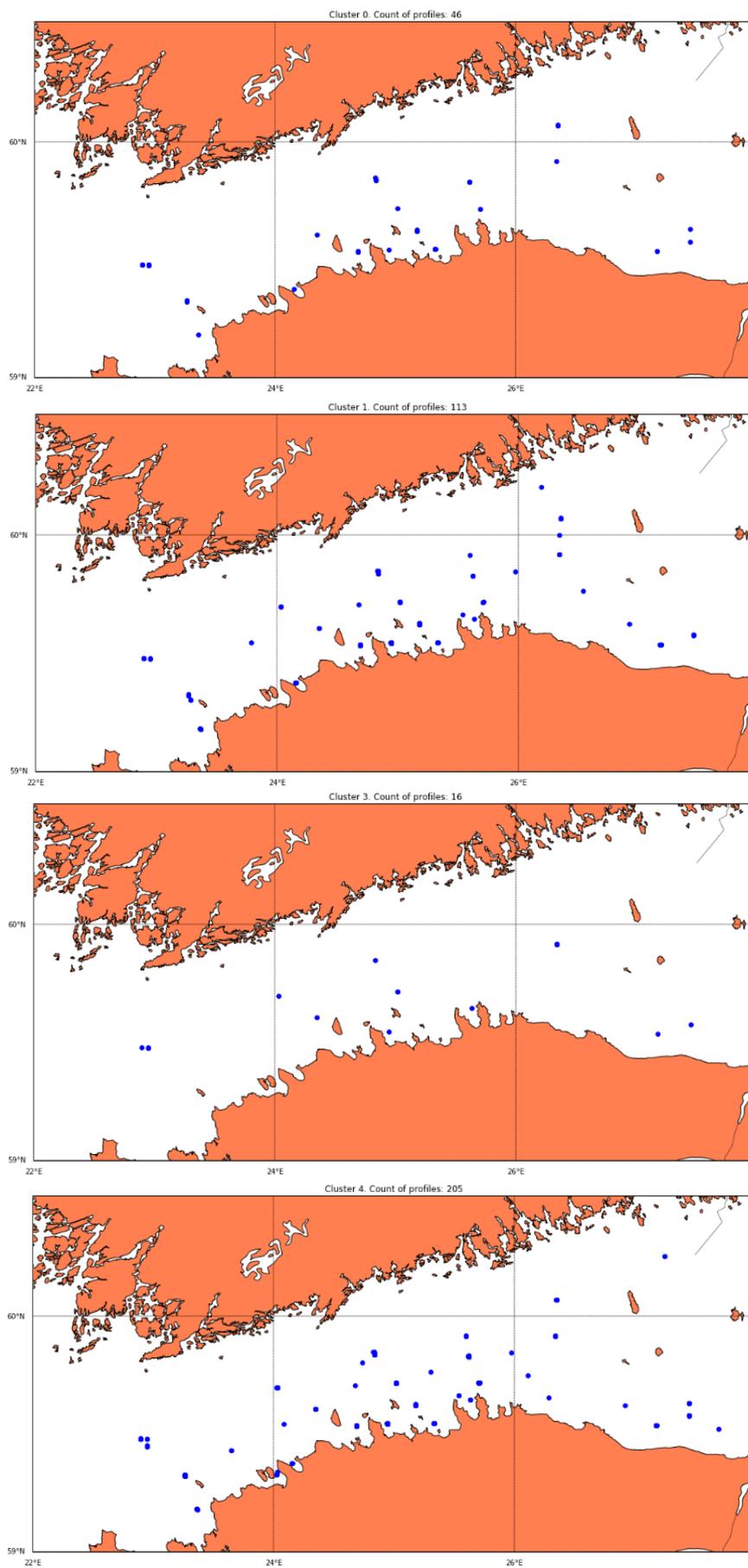


Рисунок 3.9. Распределение кластеров на карте по-отдельности

Из Рисунка 3.9 видно, что данные, попавшие в различные кластера были собраны практически на одних и тех же станциях, составляющих, по всей видимости маршрут ежегодных наблюдений за Финским заливом.

3.4. Анализ распределения хлорофилла-а

Для дальнейшего анализа нанесем полученные кластеры на временную шкалу. Рисунок 4 показывает количество кластеров различного типа в каждом месяце.

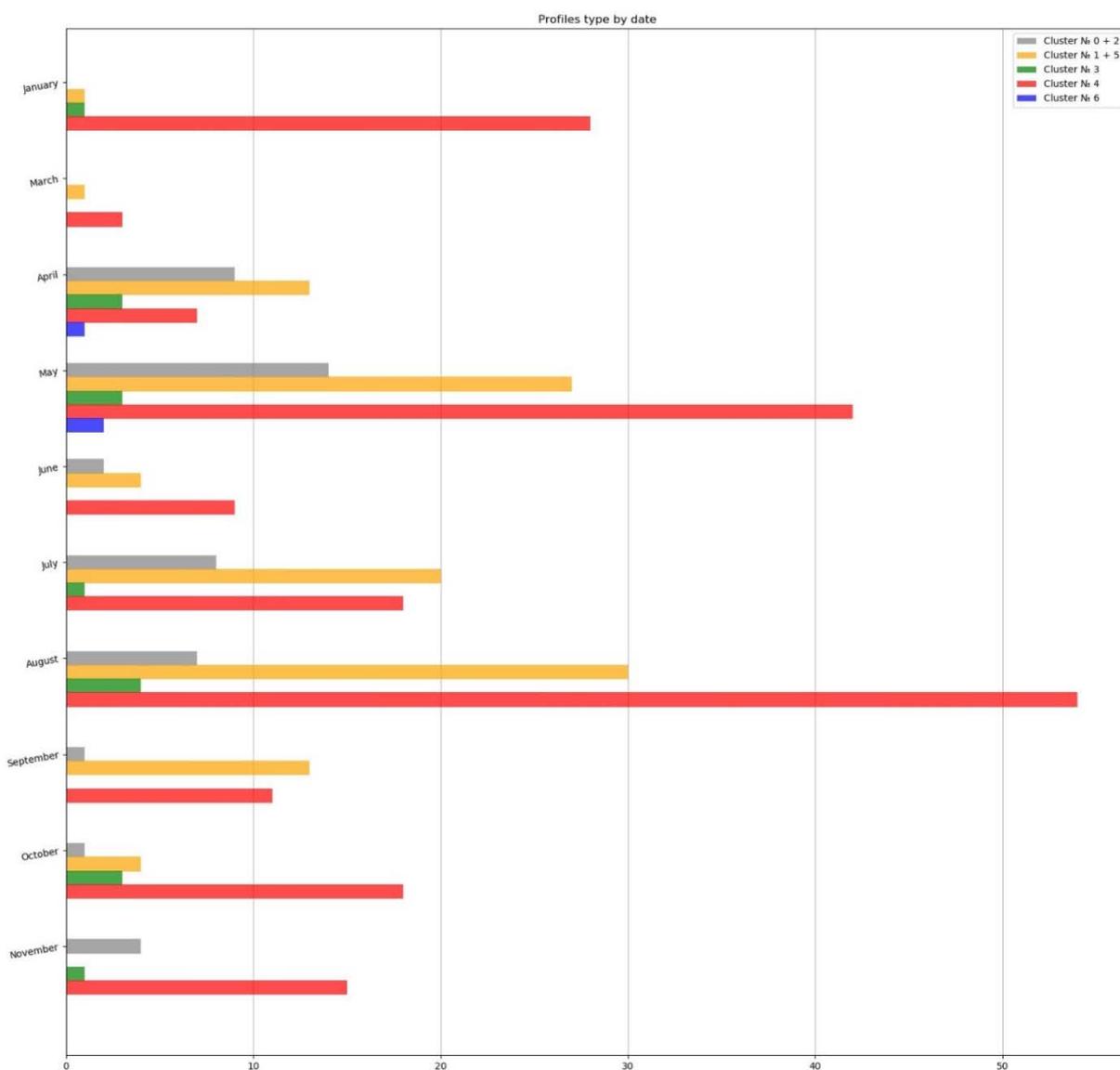


Рисунок 4. Временная шкала с профилями (по месяцам)

Кластер №1, обозначенный на рисунке желтым цветом, присутствует весь год, кроме ноября. Максимальное количество профилей типа распределения А, приходится на май, июль, август. В июне и сентябре происходит обеднение поверхностного слоя вод биогенами, поэтому фитопланктона в приповерхностном слое становится меньше. В апреле же биогенов еще недостаточно.

Кластер №0, обозначенный на шкале серым цветом, соответствует типу распределения В, максимальное количество данных профилей присутствует в апреле, мае, июне, июле и августе. То есть в весенне-летний период, когда стоит теплая, маловетренная погода и формируется устойчивый термоклин.

Профили кластера №3 на шкале обозначены зеленым. Максимальное количество данных соответствующих типу распределения С - в апреле-мае, августе и октябре.

Самый многочисленный кластер №4, обозначен на временной шкале красным и соответствует типу распределения D. Максимальное число профилей данного типа в январе, мае, августе и октябре, то есть равномерное распределение по вертикали хлорофилла присуще в той или иной степени каждому сезону: зима, весна, лето, осень.

На рисунке 4.1. посмотрим, какое количество кластеров преобладает на примере 2014 года, имеющего наибольшее количество данных.



Рисунок 4.1. Временная шкала за 2014 год с профилями по месяцам

Все 4 типа распределения профилей есть в мае, июле и августе. В январе отсутствуют профили кластера №0, для зимнего периода характерна низкая биомасса фитопланктона, поэтому в основном присутствуют профили с равномерным распределением хлорофилла по глубине. В апреле и июне нет данных по кластеру №3. В сентябре профили распределяются согласно кластерам №1 и №4. Ноябрь – отсутствуют профили типа распределения А (кластер №1), для поздней осени свойственно выравнивание температуры по вертикали и перемешивание вод, поэтому в основном присутствуют профили типа D. По причине выноса биогенных элементов из глубинных слоев, так же есть профили типа В, С.

Для исследования влияния абиотических факторов на формирование вертикального профиля, с сайта ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) были взяты данные температуры у поверхности воды и ветра за год. Для анализа зависимости между данными каждого кластера и температурой была построена диаграмма рассеяния (Рисунок 5.1). Аналогичная диаграмма была построена для скорости и направления ветра (Рисунок 5.2.).

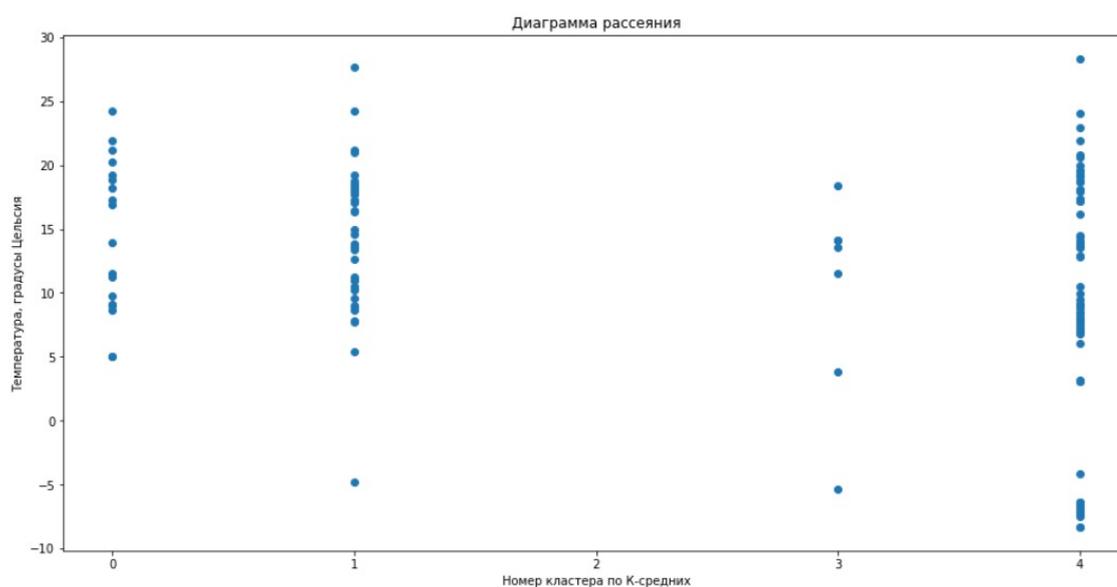


Рисунок 5.1. Диаграмма рассеяния для температуры

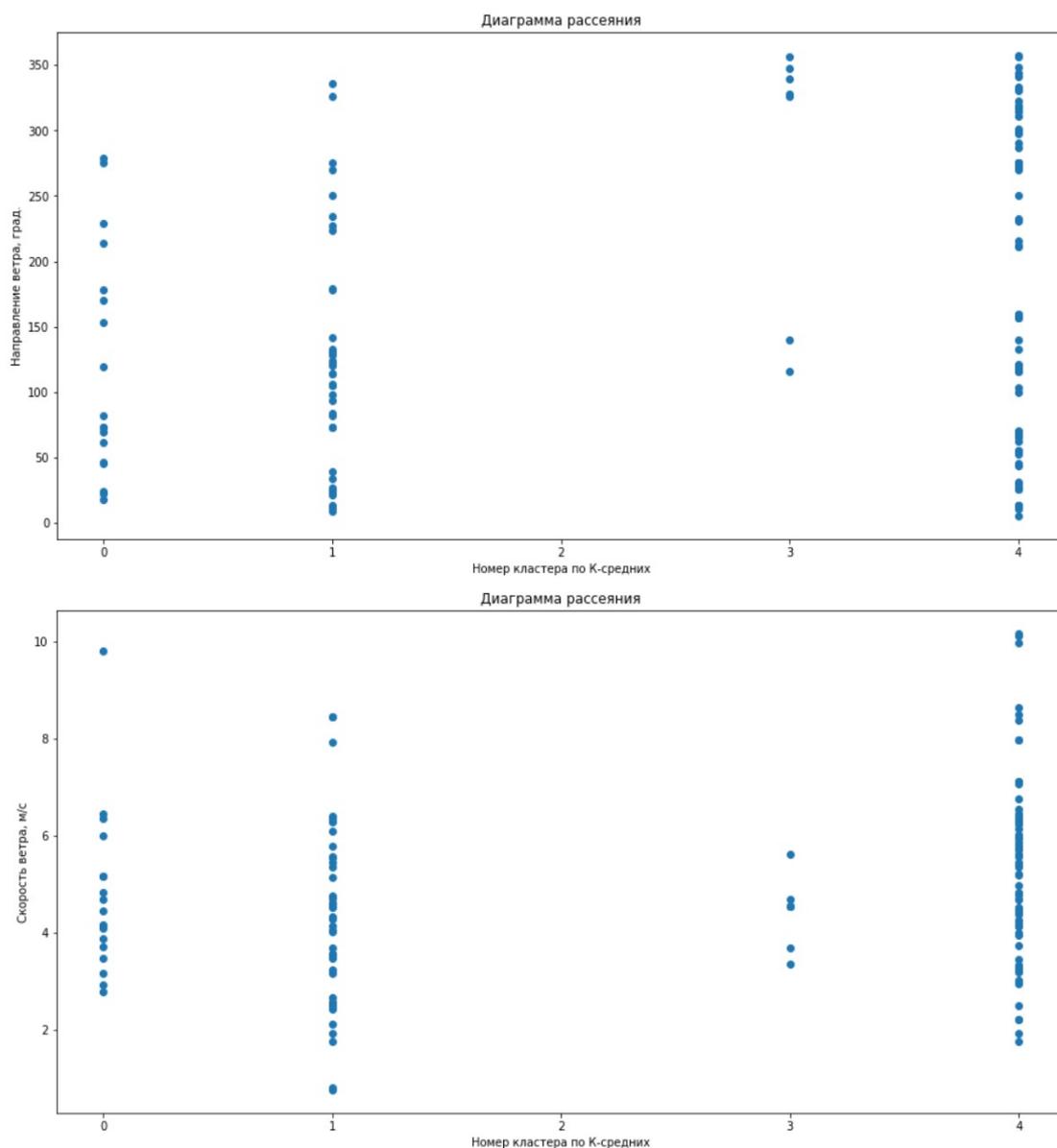


Рисунок 5.2.

Диаграмма рассеяния для скорости и направления ветра

	0	5	10	15	20	kmean	wind_velocity	wind_direct	temperature
0	1.000000	0.938763	0.956990	0.932851	0.762754	0.256727	-0.271599	-0.133150	-0.054333
5	0.938763	1.000000	0.892610	0.874421	0.719555	0.122351	-0.345814	-0.141626	-0.050100
10	0.956990	0.892610	1.000000	0.953993	0.858112	0.144073	-0.275284	-0.158207	-0.086749
15	0.932851	0.874421	0.953993	1.000000	0.915132	0.244784	-0.255970	-0.156004	-0.121533
20	0.762754	0.719555	0.858112	0.915132	1.000000	0.178250	-0.195526	-0.237693	-0.191476
kmean	0.256727	0.122351	0.144073	0.244784	0.178250	1.000000	0.183350	0.155497	-0.108390
wind_velocity	-0.271599	-0.345814	-0.275284	-0.255970	-0.195526	0.183350	1.000000	0.089514	-0.030614
wind_direct	-0.133150	-0.141626	-0.158207	-0.156004	-0.237693	0.155497	0.089514	1.000000	0.235230
temperature	-0.054333	-0.050100	-0.086749	-0.121533	-0.191476	-0.108390	-0.030614	0.235230	1.000000

Таблица 4. Корреляционная матрица

Диаграмма рассеяния температуры показывает, что в 0 кластере положительные значения температуры. Для этого кластера максимальные значения хлорофилла-а находятся на глубине 5 метров, а профили охватывают весенне-летний период. В остальных кластерах присутствуют профили за осенний и зимний периоды, с отрицательными значениями температуры. Максимальная скорость ветра, до 10 м/с, в 4 кластере, который характеризуется равномерным распределением хлорофилла-а по глубине. Для кластеров 0 и 1 максимальная скорость ветра 8-10 м/с. Ветер оказывает воздействие на приповерхностный водный слой, перемешивая биогенные вещества.

Для проверки наличия корреляционной связи между переменными, была построена корреляционная матрица. Из Таблицы 4 можно заметить, что температура с профилями имеет относительно небольшую корреляцию -0,11. Скорость ветра имеет более высокую корреляцию (0,18), чем направление ветра (0,15), но в целом не оказывает сильного влияния.

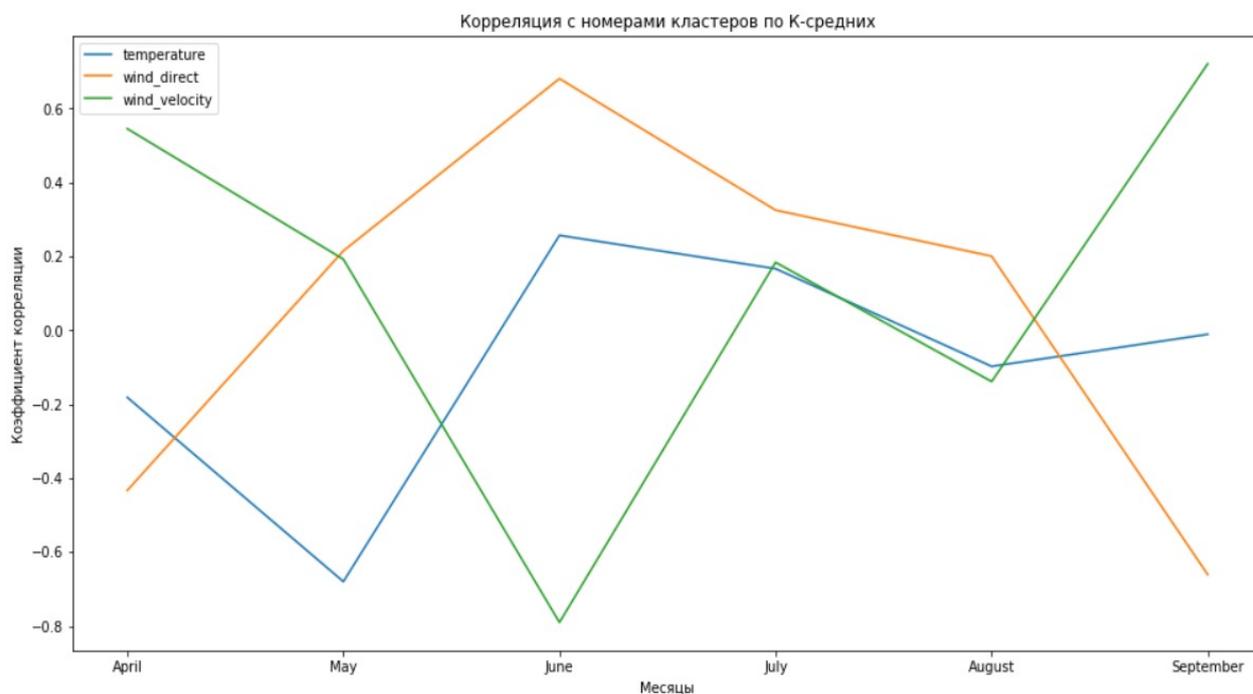


Рисунок 5.3. Корреляция абиотических факторов с кластерами

Из Рисунка 5.3. видно, что коэффициент корреляции абиотических факторов имеет различное значение в зависимости от месяца. Так для температуры (0,25) и направления ветра (0,68) он принимает максимальное значение в июне. При этом в июне минимальное значение корреляции скорости ветра (-0,79), максимальное в апреле (0,54) и сентябре (0,72). Минимальное значение корреляции для температуры в мае (-0,68).

3.5. Анализ спутниковых данных

Данные для анализа были взяты с сайта Ocean Color. MODIS (или спектрорадиометр с умеренным разрешением) является ключевым инструментом на борту спутников Terra (EOS AM) и Aqua (EOS PM). Terra MODIS и Aqua MODIS просматривают всю поверхность Земли каждые 2 дня, получая данные в 36 спектральных диапазонах. [11]

Для анализа количества хлорофилла-а на поверхности за 2014 год были выбраны снимки в безоблачные дни. Спутниковые снимки представлены в формате NetCDF. С помощью программы Panoply были извлечены необходимые для расчета хлорофилла-а переменные (Rrs_547, Rrs_531) и координаты. Panoply – это приложение разработанное NASA для отображения массивов данных из netCDF, HDF, GRIB.

Далее в программной среде Python по формуле (3.1) были рассчитаны значения хлорофилла-а на поверхности.

$$Chl = 10^{-0,5+19,8*xChl-42,7*xChl^2} \quad (3.1)$$

$$\text{где } xChl = \log_{10} \frac{Rrs_{547}}{Rrs_{531}} \quad (3.2)$$

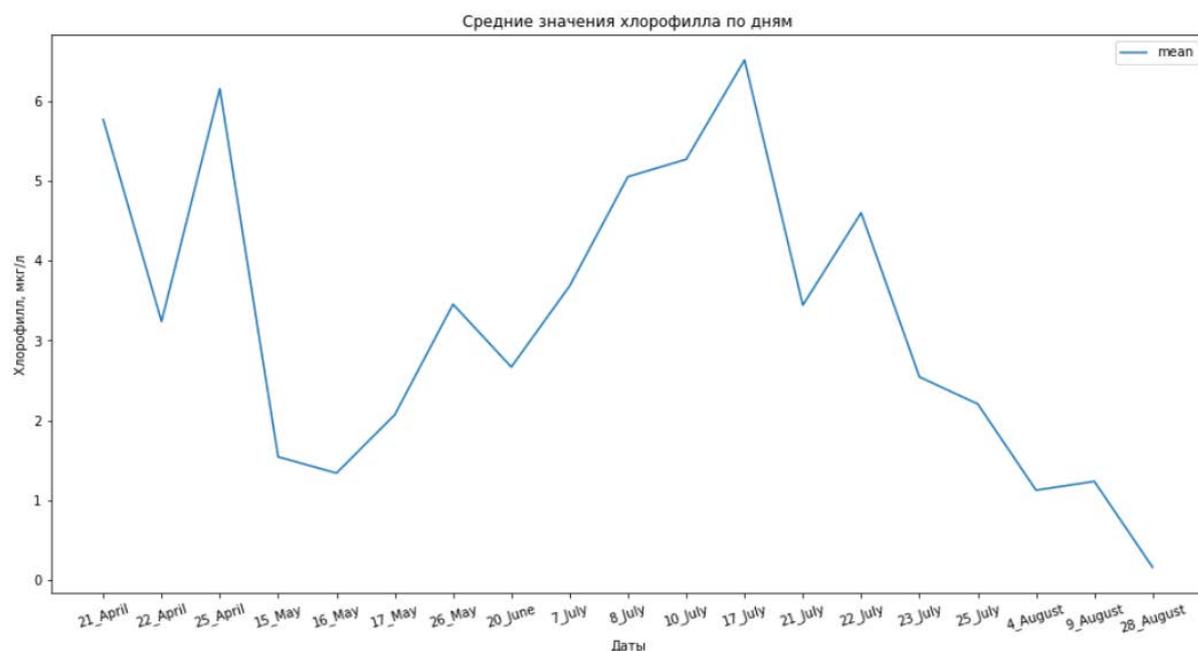


Рисунок 5.4. Изменчивость средних значений концентрации хлорофилла-а по спутниковым данным

Рисунок 5.4 показывает средние значения хлорофилла-а за выбранный период. Высокие концентрации на поверхности присутствуют в апреле и июле, составляя более 6 мкг/л. В мае и августе, концентрация снижается, биогенные вещества исчерпываются в поверхностном слое в результате активного роста фитопланктона, хлорофилла-а на поверхности становится значительно меньше (0,5 – 1,5 мкг/л).

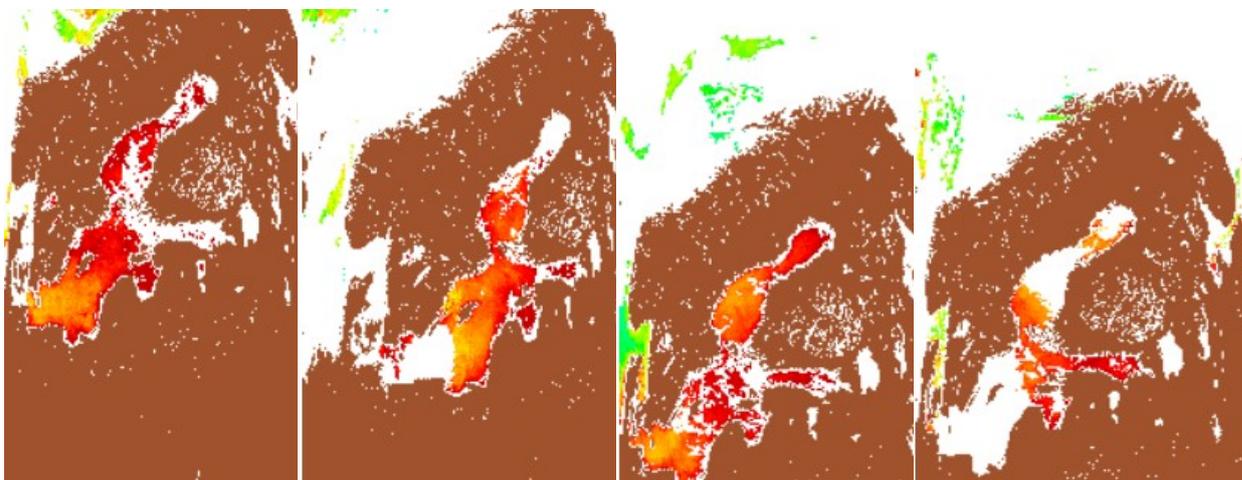


Рисунок 5.5. Спутниковые снимки: апрель, май, июль, август

Как видно из Рисунка 5.5. наиболее эвтрофирована центральная часть Балтийского моря и Финский залив. Ботнический залив сильно эвтрофирован в апреле и июле. Если посмотреть снимки за год, Финский залив сильно эвтрофирован круглый год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение пространственно-временного распределения хлорофилла-а по спутниковым и контактными измерениям является важной океанологической задачей и имеет практическое и научное значение. Анализ пространственно-временной изменчивости показал, что существуют различные типы формирования вертикальных профилей хлорофилла-а, которые образуются под влиянием множества факторов.

В ходе выполнения работы:

- 1) Были рассчитаны и построены вертикальные профили по контактными данным, с помощью формулы Matsumura и Shiomoto.
- 2) Проведена кластеризация профилей различными способами и получено 4 типа кластеров, отличающиеся максимальным значением хлорофилла-а на различных глубинах.
- 3) Проведен анализ распределения концентрации хлорофилла-а в зависимости от времени года.
- 4) Рассчитаны корреляционные зависимости от влияния адиабатических факторов
- 5) Получены спутниковые данные, с помощью которых были рассчитаны поверхностные концентрации хлорофилла-а для анализа степени эвтрофированности Балтийского моря и Финского залива.

Полученные 4 типа вертикального распределения профилей, с различным максимальным значением, встречаются в течение всего года. Исследованные абиотические факторы определяют до 20% вариативности вертикального распределения хлорофилла, но не являются главными в формировании вертикальной структуры распределения хлорофилла-а.

Спутниковая информация обладают рядом недостатков, в частности это отсутствие большей части данных в виду высокой облачности

Балтийского региона. Получение контактных измерений является дорогостоящим процессом и охватывает малую часть акватории. Наилучшим решением является совмещение этих способов получения данных.

Распределение концентрации хлорофилла-а носит ярко выраженный сезонный характер. Максимальные концентрации достигаются в апреле, июле и октябре. Средние значения, полученные в весенне-летний период выше осенне-зимних. Тенденция роста концентрации хлорофилла-а, несмотря на работы по снижению экологической нагрузки на Финский залив имеет связь с различными абиотическими факторами, изменениями в экосистеме, строительными и промышленными работами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Эвтрофикация и меры борьбы с ней [Электронный ресурс]. – свободный режим доступа: http://allformgsu.ru/publ/ehkologija/ehvtrofikacija_i_mery_borby_s_neju/23-1-0-137- русский язык. – (дата обращения: 25.05.2018)
- [2] James E. Cloern Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem// -2001.-с.224-230.
- [3] Еремина Т.Р. - Балтийское море в настоящем и будущем – климатические изменения и антропогенное воздействие [Текст]. –СПб., Изд-во «Лема», 2016. –с.34-51.
- [4] Scott W. Nixon - Coastal Marine eutrophication: a definition social causes and future concerns. -1995.-с.3-10
- [5] М.Е. Виноградов, С.С. - Лаппо Новые идеи в океанологии [Текст].- РАН, Изд-во «Наука», 2004
- [6] Helcom map and data service [Электронный ресурс]. – свободный режим доступа: <http://maps.helcom.fi/website/mapservice/index.html>- английский язык. – (дата обращения: 27.05.2018)
- [7] Hobro - Long-term monitoring of phytoplankton// -1979.-с.12
- [8] Borgsiak - Изучение фиксации азота в Балтийском море.- 1981.- с.27
- [9] Hallfors – Niemi.-1981.-с.5
- [10] Chlorophyll Biomass off Sanriku, Northwestern Pacific, Estimated by Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) and a Vertical Distribution Model. - National Research Institute of Far Seas Fisheries, Orido 5-7-1, Shimizu, Shizuoka 424-8633, Japan. - Received 4 January 1998; in revised form 17 June 1998; accepted 17 June 1998

[11] Ocean Color Data [Электронный ресурс]. – свободный режим доступа: <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>- английский язык. – (дата обращения: 12.06.2018)