



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Исследование пространственно-временной изменчивости полей
фитопланктона Баренцева моря»

Исполнитель: Мухамадиева Аделя Радолевна

Руководитель: к. ф.-м. н., Фролова Наталия Сергеевна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

«10» июня 2024 г.

г. Санкт-Петербург

2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАРЕНЦЕВА МОРЯ	5
ГЛАВА 2. ОКЕАНОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАРЕНЦЕВА МОРЯ ...	10
2.1 Гидрологическая структура	10
2.2 Термохалинные характеристики	12
2.3 Гидрохимические характеристики	16
ГЛАВА 3. ФИТОПЛАНКТОННОЕ СООБЩЕСТВО	22
3.1 Видовая структура фитопланктона Баренцева моря	25
3.2 Основной показатель «цветения»: хлорофилл «а»	26
ГЛАВА 4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	29
4.1 Интерактивная система Giovanni	30
4.2 База данных Copernicus	31
4.3 Статистические методы	32
ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФИТОПЛАНКТОНА	33
5.1 Внутригодовая и сезонная изменчивость концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря по данным сервиса Giovanni	33
5.2 Пространственная изменчивость фитопланктона в Баренцевом море	41
5.3 Результаты распределения концентрации хлорофилла «а» в Баренцевом море по данным реанализа	48
Заключение	73
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	76

Введение

Актуальность работы. Фитопланктонные популяции играют очень важную роль в процессах фотосинтеза, круговоротах вещества и энергии в водоемах. Фитопланктон или также известный как микроводоросли, похож на наземные растения тем, что они содержат хлорофилл «а» и нуждаются в солнечном свете, чтобы жить и расти. Большая часть фитопланктона обладает плавучестью и курсирует в верхней части океана, где солнечный свет проникает в воду. В сбалансированной экосистеме фитопланктон обеспечивает пищей широкий спектр морских существ, включая креветок, улиток и медуз. Когда происходит избыток питательных веществ, фитопланктон может выйти из-под контроля и образовать вредное цветение водорослей Harmful algal blooms (HABs). Этот процесс может производить чрезвычайно токсичные соединения, которые оказывают вредное воздействие на рыб, моллюсков, млекопитающих, птиц и даже людей.

Выбор Баренцева моря был обусловлен его статусом как одного из самых чистых, нетронутых и продуктивных морей Арктики. Оно является важнейшим районом морского рыболовства и нефте- и газодобычи.

В связи с этим изучение изменчивости первичной продукции (фитопланктона) в водах Баренцева моря является важной задачей, поэтому очень важно дать правильную оценку пространственно-временной изменчивости состояния фитопланктона в данном регионе.

Цель и задачи исследования. Цель работы – оценка пространственно-временной изменчивости состояния фитопланктона Баренцева моря.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Поиск и применение существующих спутниковых данных о концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности в области исследуемого региона.

2. Проведение анализа сезонной и межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла «а».

3. Оценка пространственно-временной изменчивости состояния фитопланктона.

Практическая значимость. Концентрации хлорофилла «а» имеет важное практическое значение для экологического мониторинга, оценки биологической продуктивности и промыслового потенциала Баренцева моря. Результаты исследования могут быть использованы рыбохозяйственными организациями с целью проведения мониторинга продуктивности, биомассы фитопланктона, уровня трофности, состояния и качества вод, а также оценки тенденций изменения этих показателей.

Материалы и методы. Работа выполнялась с использованием дистанционного метода и контактно оптического измерения. В работе использованы спутниковые данные оптического диапазона спектрорадиометров MODIS-Aqua и данные из базы Copernicus за период с 1993 года по 2020 гг.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Баренцево море является окраинным морем Северного Ледовитого океана и расположен между параллелями $81^{\circ}52'$ и $66^{\circ}44'$ с.ш. и между меридианами $16^{\circ}30'$ и $68^{\circ}32'$ в.д. Площадь поверхности моря составляет 1,4 тыс. км², объем воды 316 тыс. км³, средняя глубина 222 м, максимальная глубина 600 м. В Баренцевом море расположено много островов, в числе которых крупнейшие полярные архипелаги — Шпицберген (61 тыс. км²), служащий границей Баренцева моря на западе, Земля Франца-Иосифа (16 тыс. км²) — на севере, Новая Земля (83 тыс. км²) — на востоке. Крупнейшие одиночные острова — Колгуев (3497 км²) и Медвежий (178 км²). Небольшие острова в основном сгруппированы в архипелаги, расположенные вблизи материка или более крупных островов, например Горбовы, Гуляевские Кошки и пр. Большое количество островов — одна из географических особенностей моря [1]. Шпицберген — полярный архипелаг, состоящий из трех крупных островов — Западный Шпицберген, Эдж, Северо-Восточная Земля — и множества более мелких. Море отделено от Карского моря Карским проливом и архипелагом Новая Земля. Белое море и Печорское море — это две части Баренцева моря. Белое море — это южный рукав Баренцева моря, отделяющий Кольский полуостров от материковой части России. Печорское море расположено в юго-восточной части Баренцева моря.

Климат. Климат Баренцева моря, по классификации Б.П. Алисова, согласно которой выделяют климатические пояса, исходя из условий общей циркуляции атмосферы [1], относится к субарктическому и арктическому. Граница между арктической и субарктической климатическими зонами проходит по положению арктического атмосферного фронта, расположенного летом примерно вдоль параллели 67° с. ш. Отличительными чертами климата Баренцева моря являются чередование полярного дня и ночи, низкий радиационный баланс, наличие ледяного покрова в северной

части моря. Лето (июль—август) короткое со средней температурой воздуха 4,8 °С над акваторией и прилегающей сушей, пасмурное, с преимущественно северо-восточными ветрами, зима относительно теплая. Средняя температура воздуха в холодный период года (с ноября по апрель) достаточно высокая для северных широт и составляет –10,4 °С, что объясняется влиянием теплых морских течений и поступлением теплого воздуха из Атлантики в результате циклонической деятельности. Зимой преобладают юго-западные ветры с высокими скоростями — с порывами до 40–50 м/с. Средние значения скорости ветра в Баренцевом море зимой составляют 4–10 м/с, летом — 3–7 м/с. В зимний сезон наблюдаются максимальные скорости ветра, в среднем составляющие 30–35 м/с, что связано с усилением циклогенеза в зимнее время по сравнению с теплым периодом года [15, 16]. Ветры с восточной составляющей и большой скоростью (50 м/с) фиксируются на арх. Новая Земля. Годовое количество осадков составляет 500 мм в западной и 300 мм в северной частях моря. Количество атмосферных осадков уменьшается с запада на восток при удалении от зон циклонической активности, и с юга на север с уменьшением температуры воздуха, а следовательно, и с уменьшением его влагосодержания.

Рельеф и границы. Дно моря представляет собой сложнорасчлененную подводную равнину с волнистой поверхностью, несколько покатой к западу и северо-востоку. Наиболее глубокие районы, в том числе и максимальная глубина моря 600 м, расположены в его западной части. Для рельефа дна моря в целом характерно чередование крупных структурных элементов — подводных возвышенностей и желобов, пересекающих его в разных направлениях, а также существование многочисленных мелких (3–5 м) неровностей на глубинах менее 200 м и террасовидных уступов на склонах [1]. При средней глубине моря 222 м разность глубин в открытой части достигает 400 м. Наиболее значимые впадины и прогибы Баренцева моря: желоба Франц-Виктория и Святой Анны на севере, возвышенность Персея на северо-востоке, Зюйдкапский желоб и

Шпицбергенская банка на западе, Медвежинский и Норвежский желоба на юго-западе, Центральная впадина, Гусиная банка и Новоземельский желоб на юго-востоке и Центральная возвышенность.

В российской классификации морей считается, что морские границы Баренцева моря проходят на западе вдоль линии мыс Южный (арх. Шпицберген) – о. Медвежий – мыс Нордкап, на востоке – по западному побережью островов Вайгач и Новая Земля и далее по линии мыс Желания (арх. НЗ) – мыс Кользат (о. ГрэмБелл арх. ЗФИ), на юге – по побережью Европы и линии между мысами Святой Нос (Кольский полуостров) и Канин Нос (северо-западная оконечность полуострова Канин), на севере – по северной окраине островов архипелага ЗФИ Грэм-Белл, Ева-Лив, Рудольфа, Артура, Земля Александры и далее от мыса Мэри – Хармсуорт (о. Земля Александры) на остров Виктория, затем на остров Белый и далее на мыс ЛиСмит, расположенный на о. Северно-Восточная Земля арх. Шпицберген [Атлас, 1980, 1985; Добровольский, Залогин, 1982] . Следует заметить, что в западной литературе существуют и несколько другие определения условных линий, по которым проходят морские границы Баренцева моря.

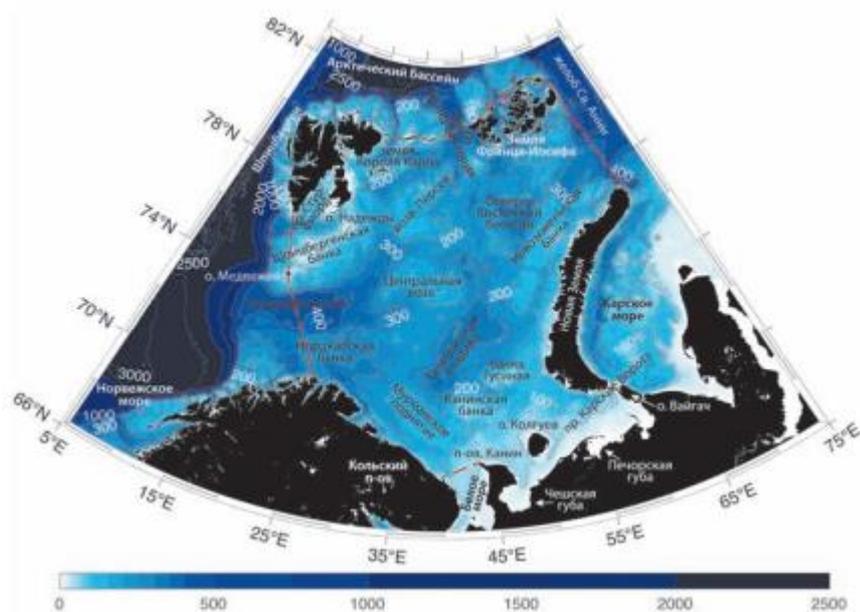


Рисунок 1 -Рельеф дна и официальные границы Баренцева моря (красный пунктир)

Солнечная радиация. Солнечная радиация является основным источником энергии для термодинамических процессов, происходящих в

атмосфере и гидросфере. Акватория Баренцева моря расположена за полярным кругом, поэтому здесь наблюдаются низкие высоты Солнца, существуют явления полярного дня и полярной ночи. Вследствие этого наблюдаются большие внутригодовые изменения суммарной солнечной радиации в условиях безоблачного неба. В годовом ходе средняя суточная суммарная солнечная радиация при облачном небе изменяется от 0 в декабре и январе до 17,8 МДж/м² в июне [3]. Баренцево море является одним из наиболее облачных районов Арктики, в связи с чем действительная продолжительность солнечного сияния невелика. В апреле наблюдается основной годовой максимум продолжительности солнечного сияния, дополнительный максимум проявляется в июне—июле и связан с продолжительностью полярного дня.

Максимальные значения радиационного баланса достигаются в прибрежной континентальной зоне. В среднем за год радиационный баланс на всей акватории моря положительный и составляет 0–2 МДж/м² и отрицательный — на архипелагах Шпицберген и Новая Земля. Солнечная энергия в диапазоне длин волн 400–700 нм, доступная для фотосинтеза (фотосинтетически активная радиация, ФАР), влияет на развитие компонентов морской биоты, контролирует рост фитопланктона.

Животный мир. Баренцево море поддерживает самое высокое биоразнообразие морского дна, которое включает некоторые из крупнейших в мире глубоководных коралловых рифов и прибрежные леса водорослей. Коралловые рифы и леса водорослей служат важными местами для кормления, размножения и ухода за богатой и разнообразной морской флорой и фауной. В море водится около 150 видов рыб. Некоторые из известных видов рыб такие как мойва, норвежско-арктическую треска, лосось, сельдь и сом. В Баренцевом море также обитает одна из крупнейших колоний морских птиц, и в летние месяцы здесь обитает около 20 миллионов морских птиц, принадлежащих к 40 различным видам. К известным видам морских птиц относятся кайра толстоклювая, серебристая и морская чайка,

арктическая крачка, хохлатый баклан, тупики, люрики. В его окрестностях также обитает около 12 видов китов, пять видов дельфинов, шесть видов тюленей, моржей, выдр, белых медведей и песцов

ГЛАВА 2. ОКЕАНОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАРЕНЦЕВА МОРЯ

2.1 Гидрологическая структура

Гидрологический режим Баренцева моря отличается большим разнообразием. Температура воды является одним из важнейших элементов гидрологического режима. Она характеризует распространение теплых атлантических вод на акватории моря, которые существенным образом влияют на ледовые и климатические условия региона. Максимальные значения температуры воды наблюдаются в течение всего года в юго-западной части моря. Пределы годовой изменчивости температуры воды повсеместно и на всех горизонтах сравнительно невелики: так, на поверхности в юго-западной и в северной частях моря она не превышает 5–6 °С и только на юго-востоке достигает 10°С. По мере увеличения глубины сходство поверхностных и глубинных полей температуры сохраняется [1].

В формировании режима участвуют воды различного происхождения и с различными свойствами. Так, в Баренцевом море выделяют четыре основных типа и несколько подтипов водных масс:

— атлантические воды (подтип атлантические трансформированные воды) с повышенной температурой и соленостью, поступающие с Норвежским течением из Северной Атлантики, переходящим в Нордкапское течение, а в глубинных слоях приходящие также с севера из Центрального Арктического бассейна;

— арктические воды с отрицательной температурой и пониженной соленостью, поступающие как поверхностные воды из Центрального Арктического бассейна;

— прибрежные воды (подтипы: норвежские, мурманские, беломорские, печорские, новоземельские) со значительной амплитудой годового хода температуры и пониженной соленостью, образующиеся под действием материкового стока и опресненных прибрежных течений и поступающие из

Белого моря и с прибрежным Норвежским течением вдоль берегов части Скандинавского полуострова, принадлежащей Норвегии, которое, достигнув прибрежной зоны г. Мурманска, переходит в Мурманское течение (часть Прибрежного течения).

— баренцевоморские воды с низкой температурой и высокой соленостью, образующиеся в пределах моря в результате перемешивания атлантических водных масс, приходящих извне, и их трансформации под влиянием внешних условий.

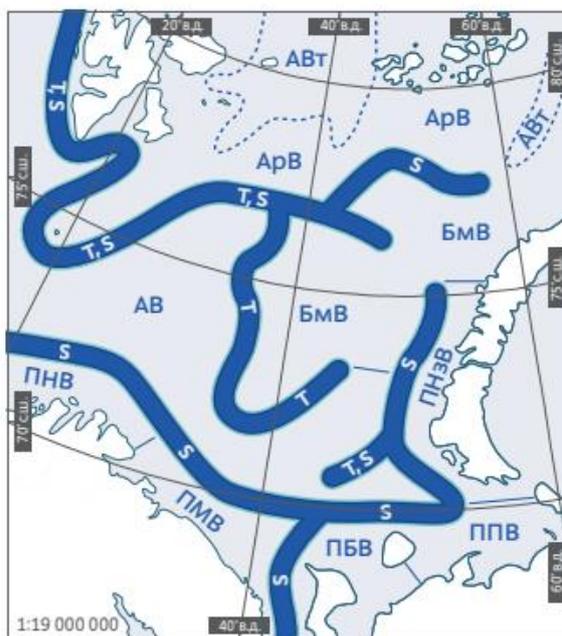


Рисунок 2 - Фронтальные зоны и основные типы водных масс на акватории Баренцева моря: фронтальные зоны — температурная (Т), халинная (S), термохалинная (Т, S); водные массы — атлантическая (АВ), подтип атлантической трансформированной водной массы (АВт), арктическая (АрВ), баренцевоморская (БМВ), подтип прибрежной норвежской водной массы (ПНВ), подтип мурманской водной массы (ПМВ), подтип прибрежной беломорской водной массы (ПБВ), подтип прибрежной печорской водной массы (ППВ), подтип новоземельской прибрежной массы (ПНЗВ) (по [8]). Пунктирной линией обозначены промежуточные водные массы

Годовой приток атлантических вод составляет примерно 74 тыс. км³ [1], что на два порядка превышает составляющие пресноводного баланса. Суммарный речной сток в Баренцево (около 263 км³/год) и Белое (около 215 км³/год) моря равен приблизительно 478 км³/год (около 318 мм в пересчете на толщину слоя моря), разность между осадками и испарением — примерно 118 км³/год (около 79 мм на толщину слоя), результирующий леодообмен

Баренцева моря с окружающими морями и островами (исключая площадь Белого моря) в пересчете на объем воды примерно $134 \text{ км}^3/\text{год}$ или около 95 мм на толщину слоя.

Так, в определении гидрологического баланса Баренцева моря пресноводный сток с материка играет второстепенную роль по сравнению с водообменом с другими морскими зонами, однако он проявляется с четким сезонным ритмом, усиливаясь в периоды паводков. Максимальный объем речного стока фиксируется в конце весны из-за таяния ледников и снега в реках, в то время как минимум наблюдается зимой и осенью, когда основную подпитку рек обеспечивают дожди и подземные воды. Речной поток в море невелик, и его большая часть концентрируется в юго-восточной части, где он оказывает значительное влияние на гидрологические условия, известные как Печорское море. Средний расход воды в реке Печора достигает 130 км^3 в год.

2.2 Термохалинные характеристики

Температура воды в поверхностном слое

Температура воды в целом характеризуется понижением с юго-запада на северо-восток и с юга на север на всех глубинах в течение года [2]. Крупномасштабные особенности полей температуры воды объясняются совместным влиянием радиационных и адвективных факторов. В теплый период (август—сентябрь) температура поверхностных вод меняется в диапазоне $3\text{--}13 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2) и близка к температуре воздуха [3]. В северной части моря температура близка к температуре замерзания. Летние максимумы поверхностной температуры в северной части моря достигают $4 \text{ }^\circ\text{C}$ к северу от 78° с. ш. и $7 \text{ }^\circ\text{C}$ к северу от 76° с. ш. На юго-востоке моря возможно летнее повышение температуры до $15 \text{ }^\circ\text{C}$ в открытой части и до $23 \text{ }^\circ\text{C}$ в Печорской губе. Минимальная температура в юго-восточной части моря даже в сентябре, когда отсутствие льда гарантировано, может быть до $3\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$ в открытой части и до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ у побережья арх. Новая Земля. В зимний период температура на юго-западе моря меняется в диапазоне $3\text{--}6 \text{ }^\circ\text{C}$, в юго-

восточной части моря ограничена температурой замерзания. Придонные температуры близки к минимальным зимним поверхностным, их изменения в годовом ходе незначительны. Осенью поверхность моря охлаждается вслед за температурой воздуха, температура воды начинает медленно понижаться до 5–6 °С на юго-западе и до 1–3 °С в центре моря. Начиная с 76° с. ш. и далее к северу она принимает отрицательные значения. При дальнейшем охлаждении температура воды на поверхности соответствует зимнему типу распределения.

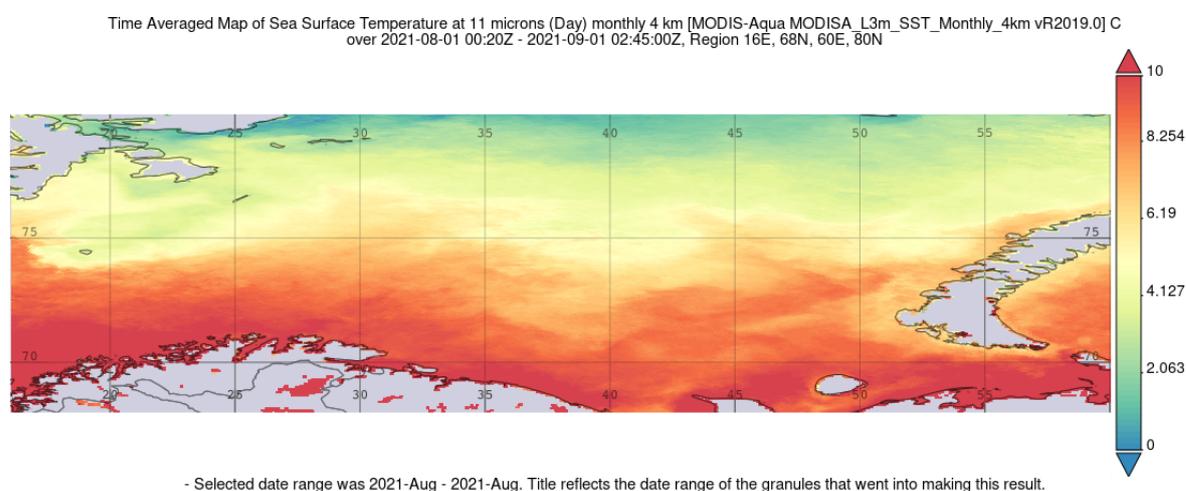


Рисунок 3 - Максимальное распределение температуры поверхности моря в период с 2021.04 – 2021.08 гг (август)

Распределение температуры воды по вертикали

Распределение температуры в толще воды в значительной мере зависит от распространения теплых атлантических вод, от охлаждения в результате зимней вертикальной конвекции, распространяющейся на значительную глубину, и от рельефа дна моря. В связи с этим изменение температуры воды с глубиной в разных районах моря происходит по-разному. Однако общая особенность для всех районов такова: с глубиной, по мере того как убывает влияние летнего прогрева, диапазон возможных колебаний температуры становится меньше, придонные температуры близки к минимальным зимним поверхностным, а их изменения в годовом ходе незначительны.

Зимой низкая температура воды отмечается во всей толще, весенний прогрев распространяется до горизонтов 10–12 м, глубже температура резко

понижается до дна (рис.3). Летом толщина верхнего прогретого слоя увеличивается до 15–18 м, температура с глубиной понижается и только в мелководной прибрежной полосе на крайнем юго-востоке моря придонные значения температуры могут повышаться до 5–8 °С [3]. Максимальные вертикальные градиенты температуры в этой части моря летом бывают весьма значительны — 0,4 °С/м, а к востоку от Печорской губы даже 1 °С/м.

Соленость вод

Химический состав воды в основном бассейне Баренцева моря близок к среднему уровню солености в океане. Небольшие отклонения от этого уровня наблюдаются в юго-восточной части моря, где впадают крупнейшие реки, а также в Мурманском (Прибрежном) течении, которое также ощущает влияние стока с материка. Пространственная изменчивость солености в большей части акватории Баренцева моря обычно незначительна. Самые высокие значения солености — около 35,0‰ — наблюдаются в атлантических водах (максимальное значение до 35,3‰). В отдельных участках моря (например, около архипелагов Шпицберген и Новая Земля) на дне зарегистрированы значения солености до 35,1‰ и даже 35,2‰. В северной части соленость не превышает 35,0‰, а в юго-восточной — 34,0‰. Самый низкий уровень солености отмечается летом на поверхности в близлежащих районах из-за влияния стока с материка и активного таяния льда, минимальным значением солености летом считается 30,0‰.

Соленость в поверхностном слое

Наибольшая соленость на поверхности моря (около 35,0‰) отмечается в юго-западной части в районе Нордкапского желоба, в проникающих в Баренцево море атлантических водах [2] и принимает максимальные значения в зимний период. Весной в прибрежной полосе у Мурманского берега и в акватории между п-овом Канин и о. Колгуев за счет увеличения материкового стока соленость начинает понижаться, однако уже на расстояниях 5–10 км от берега соленость даже на крайних южных станциях стандартных разрезов обычно не бывает ниже 34,0‰. Летом за счет

уменьшения притока атлантических вод, превышения осадков над испарением и продолжения поступления пресных вод за счет речного стока соленость в юго-западной части уменьшается до 34,5‰. В северной части моря зимой характерные значения солености на поверхности увеличиваются в направлении с севера на юг от 34,0 до 34,7‰.

В верхнем слое северо-восточной части моря влияние оказывают как менее соленая арктическая вода, так и измененная атлантическая, которая, потеряв тепло в Баренцевом море, все же сохраняет свою высокую соленость (34,7–35,0‰). При начале таяния льда, что происходит на границе атлантических и арктических вод, здесь образуется тонкий слой с немного пониженной соленостью в пределах 33,5–34,5‰.

Распределение солености по вертикали

В различных областях моря соленость меняется по вертикали по-разному из-за влияния атлантических и пресноводных вод, образования или разрушения ледового покрова, а также особенностей рельефа дна. Наиболее устойчивый и равномерный вертикальный профиль солености наблюдается на юго-западе, где преобладают атлантические воды. Зимой соленость здесь практически одинакова на всей глубине воды и составляет около 35,0‰. В июне начинается формирование верхнего слоя с низкой соленостью, достигая пика в июле-августе. Зимой в северной части моря основная масса воды состоит из относительно пресной арктической воды. Соленость здесь слегка повышается с глубиной от 34,5 до 34,7 ‰ и значительно увеличивается в глубоких слоях (где присутствует атлантическая вода) до 35,0‰. В апреле-мае с началом оттаивания льда начинается формирование слоя с низкой соленостью, который сначала имеет толщину около 5 м, а затем увеличивается до 15-20 м в течение лета и ранней осени. Этот слой всегда хорошо перемешан. Он отделен от глубоких вод достаточно резким границей — сезонным галоклином, толщина которого меняется от 5 м в начале весны до 15 м осенью. С появлением льда начинается процесс

осолонения, что приводит к вертикальному перемешиванию и разрушению сезонного галоклина.

В северо-восточной части основной характер вертикального профиля солености зимой характеризуется двумя выраженными слоями: верхним с соленостью около 34,5–34,6‰ и нижним с соленостью более 34,7‰.

В юго-восточной части моря, включая Печорскую губу, отмечается высокая пространственная изменчивость солености. В зимне-весенние месяцы соленость на всех горизонтах близка к характерной для других районов моря, соленость постепенно возрастает до 32,0 – 33,0‰, а ее горизонтальные и вертикальные градиенты сглаживаются.

2.3 Гидрохимические характеристики

Расположение Баренцева моря в высоких широтах существенно влияет на сезонный режим его гидрохимических процессов. В связи с полной отсутствием солнечной радиации в полярные ночи и ее постоянным присутствием в полярные дни, значительно отличаются фотосинтетическая активность зимой и летом. Этот процесс активизируется с апреля, и к концу летнего периода формируется ярко выраженная поверхностная структурная зона в вертикальном распределении химических свойств, отличающаяся повышенным содержанием растворенного кислорода, превышающего относительное содержание в 100%, повышением показателя кислотности (рН) и снижением концентрации биогенных элементов, таких как кремний, минеральный фосфор и нитратный азот.

Зимой процесс фотосинтеза замедляется, а осенне-зимнее конвективное перемешивание приводит к выравниванию вертикального распределения химических свойств.

Растворенный кислород

Кислородный режим Баренцева моря формируется за счет продукционно-деструкционных процессов, динамических процессов и газообмена с атмосферой. Зимой, когда вода перемешана и фотосинтез замедлен, наибольшее влияние на содержание растворенного кислорода

оказывают температура и соленость. В результате, минимальные значения кислорода поверхностных вод отмечаются в теплых атлантических водах (около 7,0 мл/л) в этот сезон, а максимальные — в юго-восточной части моря (около 8,0 мл/л), где соленость низкая из-за речного стока. В зимний сезон поверхностные воды имеют недостаточное содержание кислорода: на открытой воде содержание составляет около 96–97%, а в областях, покрытых льдом, чуть ниже — до 90% к концу зимы.

Весной, происходит интенсификация фотосинтеза из-за увеличения солнечной радиации, и содержание кислорода на поверхности начинает расти до 8,5 мл/л, а степень насыщения до 110–112%. Летом основное распределение растворенного кислорода в водах Баренцева и Карского морей является постепенное увеличение его абсолютного содержания в направлении с юго-запада на северо-восток. Минимальные концентрации в этот сезон (менее 7 мл/л) наблюдаются в юго-западной части Баренцева моря, а максимальные (более 8,5 мл/л) — в северной части морей, где активно происходит распреснение поверхностного слоя.

К началу сентября насыщение растворенным кислородом поверхностных вод все еще не опускается ниже 100%. В среднем осенью содержание растворенного кислорода изменяется от 10,0 до 11,5 мл/л. К концу сентября — началу октября происходит переход от летнего состояния к зимнему, и относительное содержание кислорода по всей акватории моря на поверхности составляет около 100%.

Показатель рН

Увеличение уровня щелочности в верхнем слое воды происходит благодаря процессу фотосинтеза, в результате которого углекислый газ извлекается из воды, что приводит к снижению кислотности воды. В верхнем слое в это время рН колеблется в пределах 8,10–8,15, а в более глубоких слоях наблюдается небольшое снижение до 7,95–8,05. Летом в северной части водоема отмечаются максимальные значения рН на поверхности, достигающие 8,30–8,50 и выше, что объясняется более активными

процессами продукции после таяния льда. Осенью, с уменьшением активности процессов продукции, значения рН снижаются до 8,20–8,25, а при образовании ледяного покрова на поверхности и прекращении газообмена с атмосферой — до 8,00–8,10 подо льдом.

Растворенный неорганический кремний

Основные источники растворенного неорганического кремния в море — это притоки атлантических вод и сток с материка. Распределение содержания кремния в Баренцевом море зависит от интенсивности биохимических процессов, таких как фотосинтез и окислительные процессы, а также от перемещения кремния с водными массами и зимнего вертикального конвективного перемешивания. Наибольшие средние концентрации кремния в поверхностном слое отмечаются зимой и составляют около 3,5–4,5 мкмоль/л благодаря процессам вертикального перемешивания, поддерживающим однородную структуру распределения кремния.

Начало цветения происходит в близлежащей части у Кольского полуострова. Летом содержание кремния на поверхности Баренцева моря невелико и составляет 0,7–2,1 мкмоль/л.

Наибольшее количество кремния выносит река Печора. В Печорской губе содержание кремния меняется от 17–35 мкмоль/л летом и осенью до 143 мкмоль/л в апреле. На границе губы с прилегающей частью Печорского моря летом и осенью обычно отмечается 3,5–7,5 мкмоль/л. Концентрация кремния увеличивается с глубиной по всей акватории моря, достигая около 5,3 мкмоль/л в придонном слое и 7,0–7,5 мкмоль/л в самых глубоких районах.

Минеральные соединения азота

Минеральные соединения азота, присутствующие в водах Баренцева моря, представлены в трех формах: аммонийной, нитритной и нитратной. Аммонийный и нитритный азот лучше усваиваются фитопланктоном, чем нитратный. Поэтому основной запас азота, необходимый для фитопланктона, формируется за счет аммонийного и нитритного азота, особенно при начале

фотосинтеза и появлении в воде продуктов метаболизма. Процесс первичного продуцирования поддерживается за счет присутствия этих форм азота даже при нулевых концентрациях нитратного азота. Зимой уровень аммонийного и нитритного азота минимален из-за замедления процесса продукции органического вещества. Содержание аммонийного азота в конце зимы составляет менее 0,5 мкмоль/л, а нитритного — около предела их обнаружения. Весной, с увеличением фотосинтеза, содержание азота в аммонийной и нитритной формах начинает возрастать, превышая 5 мкмоль/л.

Максимум аммонийного азота смещается в промежуточные слои и к концу осени достигает придонных горизонтов. Летом максимальное содержание нитритного азота отмечается в конце лета — начале осени, приуроченное к слою наибольшего скачка плотности, и достигает величин порядка 0,35–0,43 мкмоль/л.



Рисунок 4 - концентрация нитритов в приповерхностном слое морской воды (мкмоль/л)

Минеральный фосфор

На распределение минерального фосфора в Баренцевом море существенное влияние оказывают атлантические воды, процессы

фотосинтеза на поверхности и его накопление из органического вещества в глубинах воды. Максимальные концентрации минерального фосфора наблюдаются в марте, который считается самым холодным месяцем для Баренцева моря, достигая 0,8 мкмоль/л. В апреле активность фотосинтеза усиливается, что приводит к снижению концентрации минерального фосфора в поверхностном слое. Большая часть потребления биогенных элементов происходит в прибрежной зоне и на прикромочных глубинах. В сентябре, с уменьшением процессов продукции, содержание минерального фосфора незначительно возрастает до значения 0,3–0,4 мкмоль/л в разных областях моря. В придонных водах наблюдается увеличение содержания минерального фосфора от прибрежных и атлантических вод к арктическим. Наибольшее содержание минерального фосфора отмечается на самом дне моря, в его центральной и восточной частях на глубинах 250–300 метров, где концентрация достигает 1,2–1,3 мкмоль/л.

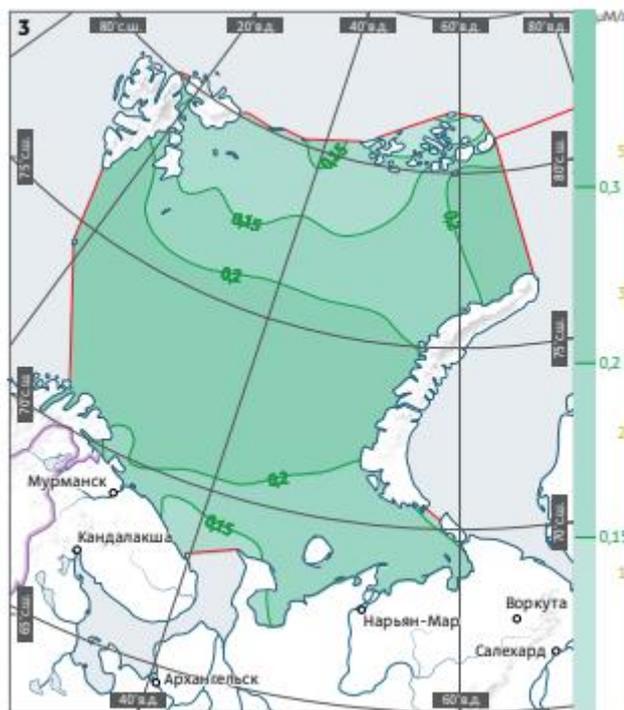


Рисунок 5 — концентрация фосфатов в приповерхностном слое морской воды (мкмоль/л)

Фотический слой

В области фотической зоны скорость проведения фотосинтеза значительно выше, чем в других слоях воды. Это происходит из-за избытка

солнечной энергии, которая служит источником питания для первичных производителей, таких как фитопланктон. Фактически, около 95% всего процесса фотосинтеза в океане происходит именно в фотической зоне. Поэтому, если мы спустимся глубже, за пределы фотической зоны, например, в зону компенсации, количество фитопланктона значительно уменьшится из-за недостатка солнечного света. Приблизительно 95% морских животных обитает именно в фотической зоне, которая простирается на глубину около 50 метров. В этой зоне обитает множество организмов, включая водоросли и микроорганизмы, такие как динофлагелляты, диатомовые водоросли, цианобактерии, кокколитофоры и криптомонады. Также здесь обитают зоопланктонные организмы, питающиеся в зоне света. Кроме того, встречаются nektony – животные, способные самостоятельно передвигаться, например, рыбы, кальмары и крабы, которые, несмотря на свои размеры и заметность, представлены в этой зоне в меньшем количестве по сравнению с другими группами.

Цвет и прозрачность воды варьируются в зависимости от местоположения. В центральной части моря можно наблюдать очаг высокой прозрачности, который сохраняется круглый год и достигает 20 метров. Вдоль западного берега Новой Земли прозрачность воды летом может достигать 36-37 метров. В прибрежных водах Кольского залива, Печорского моря и вблизи Белого моря прозрачность снижается из-за речного стока и вливания воды из других водоемов. Наиболее низкая прозрачность наблюдается у ледяных кромок, где концентрируется планктон, и составляет всего 6 метров.

Воды с высокой прозрачностью обычно имеют голубой оттенок, в то время как при низкой прозрачности вода приобретает зеленоватый цвет.

ГЛАВА 3. ФИТОПЛАНКТОННОЕ СООБЩЕСТВО

Сложная система тёплых и холодных течений, протяжённость фронтальных термохалинных зон, наличие берегового стока, особенности климата и гидрохимического режима создают уникальные условия для функционирования баренцевоморской экосистемы. Вместе с интенсивным развитием нефтегазового комплекса в регионе увеличивается антропогенная нагрузка на арктическую экосистему и появляется объективная необходимость сохранения и восстановления морских биологических ресурсов. Низкие температуры, особенности ледового режима, длительный период полярной ночи, лимитирующий фотосинтетические процессы, полярный день в летнее время — все эти факторы формируют уникальные условия существования живых организмов в высоких широтах и делают арктические морские экосистемы уязвимыми для внешнего вмешательства.

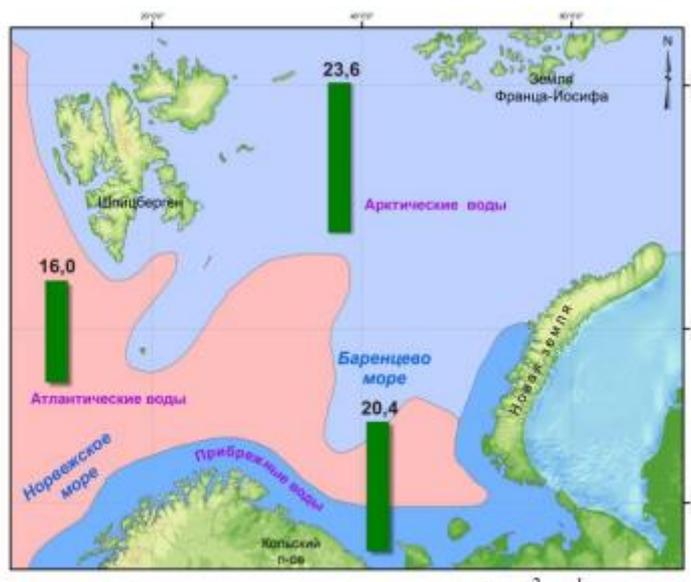


Рисунок 6- ПП в различных водных массах Баренцева моря (среднегодовые значения, в мгС×м-2 ×ч)
(по: Жизнь и условия..., 1985)

Сообщества первичных продуцентов играют важную роль в морских экосистемах. В окраинных шельфовых морях в создании первичного органического вещества (ОВ) принимают участие фитопланктон, микрофитобентос, ледовые микроводоросли и водоросли-макрофиты. Фитопланктон участвует в процессах круговорота вещества и трансформации

энергии в морской среде, а также являются первоначальным звеном в пищевой цепочке. Диатомовые водоросли, преобладающие в составе сообщества фитопланктона и микрофитобентоса Баренцева моря, служат кормовой базой для зоопланктонных организмов и бентосных беспозвоночных (моллюски, медузы, и т.д.), некоторых видов рыб (сельдь, сайка) и молоди рыб в прибрежной зоне. Годовая продукция фитопланктона в пелагиали сублиторальной зоны составляет 60 г С/м², микрофитобентос литорали синтезирует 30,5 г С/м², а сублиторали — 40 г С/м² в год [Кузнецов, Шошина, 2003]. При сравнении количественных характеристик микроводорослей в равнообъёмных биотопах бентали и пелагиали прибрежной зоны Баренцева моря было показано, что биомасса микрофитобентоса превышает биомассу фитопланктона приблизительно в 6 раз. В сообществе микрофитобентоса, в отличие от фитопланктона, угнетение фотосинтеза при низких уровнях освещённости наблюдается редко [Taylor, 1964; Gargas, 1971; Hunding, 1971]. Диатомовые водоросли бентического сообщества представлены в основном пеннатными формами. Они присутствуют в бентосных биоценозах в течение всего года [Кузнецов, Бондарчук, 1988]. Диатомеи фитобентоса литоральной и сублиторальной зоны, учитывая протяжённость береговой линии Баренцева моря, имеют большое значение для обеспечения питанием различных гидробионтов, особенно молоди рыб в прибрежных районах.

Сезонные особенности продукционных характеристик автотрофов в Баренцевом море остаются недостаточно изученными. Среди факторов, влияющих на уровень ПП (первичная продукция), выделяют длительность фотопериода и интенсивность освещения, концентрацию биогенных элементов, гидрологические параметры и адаптационную способность автотрофов. Уровень фотосинтетической активности в значительной степени зависит от освещённости. Географическое положение Баренцева моря в высоких широтах обуславливает сезонную динамику поступления солнечной радиации. Полуденная высота солнца в пределах Баренцева моря изменяется

от 0° в период зимнего до $42,5^\circ$ в период летнего солнцестояния [Яковлев, 1961]. Продолжительность дня варьирует от 0 часов в период полярной ночи до 24 часов в период полярного дня. Выраженные сезонные колебания значений суммарной солнечной радиации вызваны различиями в продолжительности светового дня и положением солнца над горизонтом в течение года (рис. 7) [Марти, Мартисен, 1969].

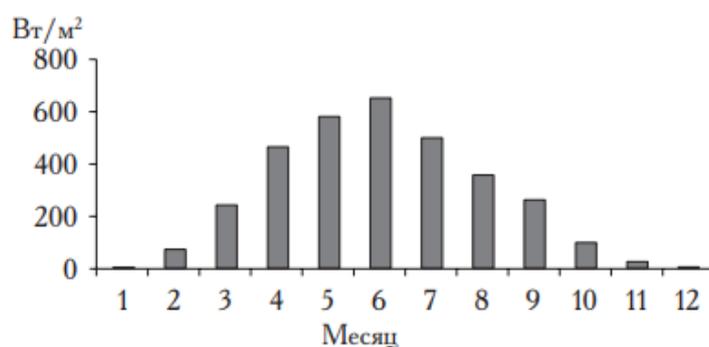


Рисунок 7- Годовая динамика суммарной солнечной радиации в прибрежной зоне Баренцева моря (70 с.ш.)

Уровень падающей солнечной радиации, необходимый для активации вегетации фитопланктона, составляет приблизительно $150\text{--}200$ кал/см² в сутки [Кузнецов, 1991]. Для Баренцева моря характерна пространственная неоднородность распределения ПП. Средняя продолжительность вегетационного периода фитопланктона составляет $150\text{--}180$ дней (с апреля по октябрь-ноябрь). У микрофитобентоса вегетационный период продолжительнее за счёт физиологических особенностей микроводорослей, формирующих состав сообщества в осенний и зимний период. У донных одноклеточных водорослей существует ряд адаптаций к длительному нахождению на глубине и низкой интенсивности освещения: низкий уровень метаболизма и незначительное снижение концентрации пигментов [Steele, Baird, 1968; Frenchand, Hargraves, 1980]. В афотической зоне литоральных осадков, где повышена концентрация первичного ОВ (органические вещества), бентосные микроводоросли способны переходить на гетеротрофное питание и продолжать динамично развиваться [Admiraal,

Peletier, 1979]. В развитии фитопланктона восточной части Баренцева моря выделяют весенний период, когда продукционные процессы преобладают над деструкционными. В пределах этого времени можно выделить два подпериода: ранневесенний (апрель) и собственно весенний (май — середина июня). В весенний период, на который приходится менее четверти годового цикла, синтезируется основная масса ОВ (до 40%).

3.1 Видовая структура фитопланктона Баренцева моря

Список видового разнообразия фитопланктона Баренцева моря включает в себя 640 таксонов [12]. По биогеографической характеристике около 45% баренцевоморского фитопланктона представляет собой виды арктического происхождения, около 35% — космополитного и около 20% — бореального.



Рисунок 8 - Распределение фитопланктонных сообществ Баренцева моря

Ввиду того, что Баренцево море является геоморфологически и гидрологически сложно расчлененным бассейном, его пелагиаль представляет собой совокупность отдельных водных масс, в каждой из которых формируется специфический тип пелагической экосистемы. На акватории Баренцева моря выделяются четыре типа вод: арктические, атлантические, баренцевоморские и прибрежные, взаимодействие которых и формирует общую антициклональную систему макроциркуляции Баренцева моря.

Таким образом, сообщества фитопланктона разделяются по глубинам и сезонной стратификации на четыре типа (рис. 8). Пелагические сообщества открытого моря:

1) субарктическая область — юго-западная и центральная часть Баренцева моря, занятая атлантическими и баренцевоморскими водными массами;

2) арктическая область, в которой отдельно выделяются сообщества северной глубоководной зоны, занятой арктическими и атлантической водными массами, и мелководной зоны Печорского моря с прибрежной водной массой. Прибрежные сообщества:

3) субарктическая область — побережье Кольского полуострова с прибрежной водной массой;

4) арктическая область — побережье восточной части Баренцева моря и арх. Шпицберген с арктической водной массой и арх. Новая Земля с баренцевоморской водной массой.

3.2 Основной показатель «цветения»: хлорофилл «а»

Распределение фитопланктона Баренцева моря обусловлено неоднородностью солености и температурного режима, а большие региональные различия в биологической продуктивности - неравномерным распределением минеральных питательных солей (особенно важно для диатомовых и сине-зеленых водорослей) (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1994). Важную роль в распределении фитопланктона по вертикали

играет свет. Верхние слои воды (0-15 м) всегда богаче фитопланктоном качественно и количественно, а также фотосинтезирующая деятельность водорослей, имеющая максимум в дневные часы приурочена именно к этим слоям. Причем фитопланктон верхнего слоя значительно богаче в прибрежных районах, чем в открытых (Калвека, 1983; Schiewer, 2008). В эстуариях, заливах и прибрежных районах вследствие гидрографических особенностей имеет место дополнительное поступление биогенных элементов в фотический слой, летом наблюдается интенсивное развитие сине-зеленых водорослей и более высокая продукция органического вещества фитопланктоном в отличие от открытой части Баренцева моря. В этих районах поступления речных и сточных вод также наблюдаются повышенные концентрации биогенных элементов, влияющих на уровень развития и продукцию фитопланктона (Nausch et al., 1999; Finni et al., 2001).

Весеннее "цветение" диатомовых водорослей, ориентированных на прохладную воду, и пенистых диатомовых водорослей в юго-восточной части Баренцева моря происходит в апреле в двух разных районах - на северном шельфе острова Колгуев в чистой воде и в восточной части Печорского моря в районе пролива Карские ворота в полыньях и водоемах в период годового льда, достигая максимума по количеству клеток и биомассе у кромки льда. "Цветение" локализуется на мелководье (в пределах 50 метров) в районах, где теплые атлантические водные массы смешиваются с прохладными прибрежными или арктическими водами и сопряжено с таянием льда. Каждая территория имеет свои специфические фитоценозы, особая структура которых определяется типом водной массы и наличием или отсутствием ледяного покрова. Регулярное летнее «цветение» потенциально токсичных сине-зеленых водорослей (*Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon* sp. и др.) отмечается во многих частях акватории Баренцева моря (например, в Кольском п-ове), как в прибрежных зонах, так и на открытых водах. *Aphanizomenon flos-aquae* продуцирует цитотоксины, вызывающие дерматиты и оказывающие воздействие на нервную систему рыб и человека

(Hallegraeff et al., 1995). *Nodularia spumigena* синтезирует гепатотоксин - печеночный яд нодуларин, который оказывает негативное влияние на плавниковых рыб и задерживает развитие икры (Burkholder, 1998).

Развитие фитопланктона в Баренцевом море носит ярко выраженный сезонный характер. Соответственно в Баренцевом море выделяют четыре сезона: биологическая зима, весна, лето и осень (Николаев, 1957), а также семь стадий годовой сукцессии фитопланктона: зимняя, весенний пик, начало лета, летний минимум, летний максимум, осенний период и поздняя осень (Нобро, 1979). В восточной части Баренцева моря выделяют весенний период, когда продукционные процессы преобладают над деструкционными. В пределах этого времени можно выделить два подпериода: ранневесенний (апрель) и собственно весенний (май — середина июня). Численность клеток в этот период набирает обороты и может колебаться в зависимости от видового состава от нескольких десятков до нескольких сотен кл/л. Далее летний период, характеризующийся специфическими абиотическими условиями и перестройкой пелагического сообщества. Как и в весеннем цикле, в нём условно выделяют два подпериода: раннелетний (середина июня — первая декада августа) и летний минимум (первая декада августа — начало сентября). Максимальная численность клеток пелагических водорослей не превышает в этот сезон 20 тыс. в литре. Осенью при условии выравнивания температуры водных масс по вертикали и началу перемешивания вод происходит вынос биогенных элементов из глубинного слоя в эвфотический, что обуславливает второй максимум развития диатомовых водорослей (Hallfors, Niemi, 1981). Численность клеток не превышает 2 тысячи в 1 литре. Зимний период характеризуется низкой биомассой фитопланктона и продуктивностью, незначительным видовым разнообразием. В этот период происходит накопление биогенных солей. Численность клеток не превышает тысячи в 1 литре, биомасса менее - 5 мкг

ГЛАВА 4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные данные:

➤ В работе были использованы данные среднемесячных значений температур, солености, хлорофилла «а», фосфатов, нитратов и кремния в точках с координатами: 1 точка – 68°63' с.ш., 54°68' в.д.; 2 точка - 67°04' с.ш., 41°80' в.д.; 3 точка - 69 °77' с.ш., 33°61' в.д.; 4 точка - 74 °55' с.ш., 33°02' в.д.; 5 точка - 77°91' с.ш., 46°35' в.д. (рис. 9). Период наблюдений составил 27 лет с 1993 по 2020 гг. Выбраны станции (1 точка, 4 точка и 5 точка), где наиболее характерные два пика цветения фитопланктона.

➤ Поля распределения среднемесячных значений температур, солености, хлорофилла «а», фосфатов, нитратов и кремния на поверхности моря были взяты из данных сервиса мониторинга морской среды Copernicus.

➤ Дискретность: 1 месяц и 1 год.

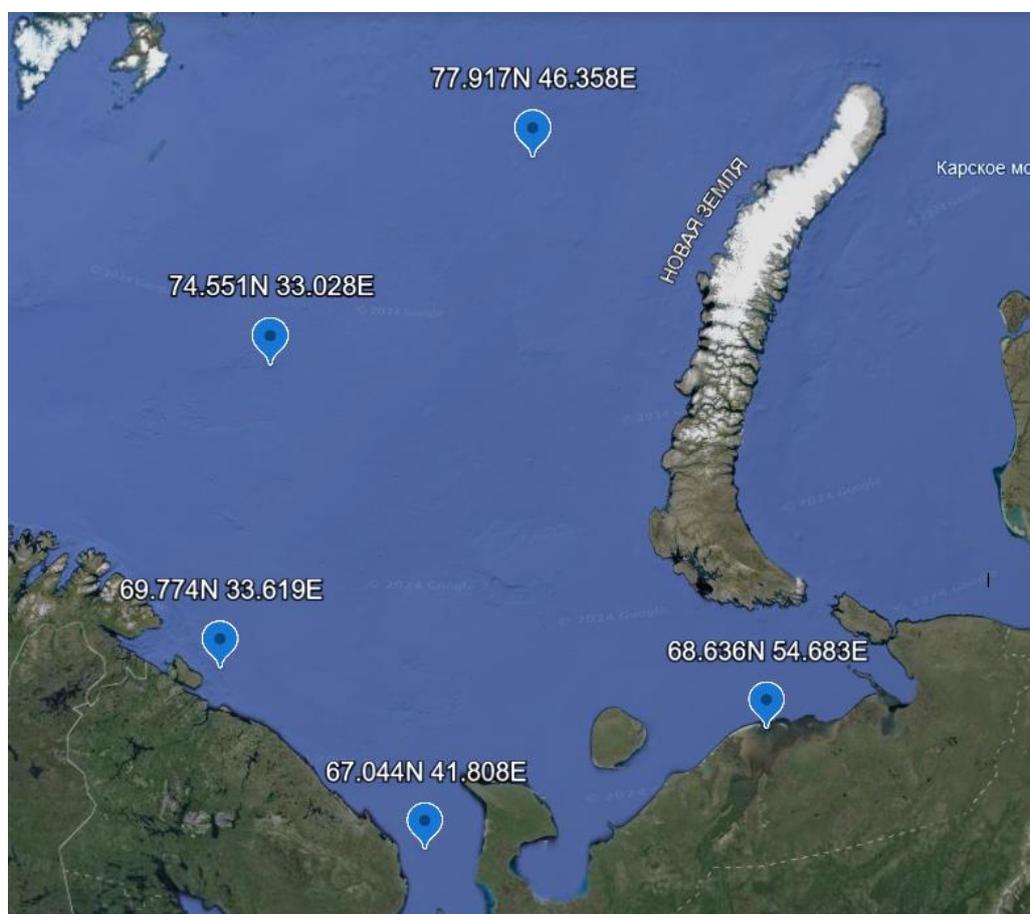


Рисунок 9 - Точки на карте исследуемого района

В дальнейшей работе с данными помогла интерактивная система Giovanni, где строила карты по температуре распределения на поверхности, так само распределение хлорофилла «а». А также база данных Copernicus, которая предоставляла данные о зондировании исследуемого объекта.

4.1 Интерактивная система Giovanni

Giovanni – это интерактивная система, которая предназначена для онлайн - визуализации данных, которые были получены различными датчиками.

Данная система дает возможность получить для анализа информацию многоспектральных сканирующих систем SeaWiFS и MODIS, с исходным пространственным разрешением 1 км и огрубленным 4 и 9 км. Эти данные получены путём преобразования результатов ежедневной съёмки поверхности Земли в файлы с осреднённым значением параметра за месяц для каждой ячейки Мирового Океана размером 9×9 км. По значениям яркости в голубой и зелёной зонах рассчитываются значения цветового индекса вод океана и на основе установленных *in situ* закономерностей – соответствующие им значения концентрации хлорофилла «а».

Значения цветового индекса вод океана рассчитываются по значениям яркости в голубой и зеленых зонах и на основе установленных *in situ* закономерностей – соответствующие им значения концентрации хлорофилла «а».

Средствами системы Giovanni для выбранной акватории исследования и заданного определённого временного интервала можно создать

- осредненные картографические изображения (Area Plot),
- графики зависимости параметра (концентрации хлорофилла) от времени (Time Plot),
- пространственно-временные диаграммы Novmoller.

Диаграмма Novmoller названа в честь шведского ученого метеоролога Ernest Novmoller, впервые предложившего её и оценившего её важность для пространственно-временного анализа в работе, опубликованной в 1949 г.

Novmoller диаграммы используются для визуализации данных и обнаружения изменений, как во времени, так и в пространстве. Возможны 2 основных варианта построения Novmoller диаграммы: по осям откладываются время и широта или время и долгота.

Для представления параметров океана (температуры поверхности моря, концентрации хлорофилла) в Giovanni предусмотрена возможность трёх вариантов выбора градации шкал:

1. Pre-defined – рекомендованные. Например, для концентрации хлорофилла, это – логарифмическая шкала, охватывающая весь диапазон изменчивости концентрации хлорофилла в Мировом океане в мг/м^3 .

2. Dynamic – динамические шкалы, градации которых изменяются в зависимости от минимального и максимального значений параметра в выбранном районе.

3. Customized – пользовательские – шкалы, в которых пользователь может ранжировать диапазон изменения концентрации хлорофилла или температуры, задав минимальное и максимальное значения.

Выходные результаты можно получить как в виде картографического изображения, так и в виде ASCII файла, где представлены цифровые значения параметра по сетке.

4.2 База данных Copernicus

Copernicus — это глобальная платформа, которая предоставляет доступ к разнообразным данным о состоянии Земли, включая данные о климате, окружающей среде, землепользовании, атмосфере и многом другом. Она создана Европейской Комиссией с целью обеспечить информацией для принятия решений в области устойчивого развития и охраны окружающей среды. Данные содержат обширный объем информации, собранной с помощью спутников, беспилотных летательных аппаратов и других средств мониторинга, и используется учеными, правительственными организациями, бизнесом и широкой общественностью.

База данных Copernicus включает в себя информацию о наблюдениях Земли из космоса, включая данные об изменениях климата, состоянии окружающей среды, природных бедствиях и многом другом. Она состоит из различных снимков со спутников, которые собирают информацию о поверхности Земли, атмосфере, океанах и т.д. Кроме того, в базу данных входят также результаты исследований и анализы, проводимые на основе полученных данных.

4.3 Статистические методы

В процессе работы использовались различные статистические методы:

1. Корреляционный анализ

Это статистический метод, который используется для оценки силы и направления связи между двумя или более переменными. Коэффициент корреляции может находиться в диапазоне от -1 до 1 [13].

2. Взаимная корреляция

Это способ измерения степени сходства между временным рядом и лаговой версией другого временного ряда [13].

3. Гармонический анализ Фурье

В основе процесса гармонического анализа находится идея о том, что любую последовательность можно с точностью до нуля разложить в спектр Фурье, другими словами, на ограниченное количество гармонических составляющих. Под гармоническими составляющими понимаются тригонометрические функции, обладающие периодами, кратными протяженности исходной последовательности, то есть каждая гармоника полностью укладывается в длине исходного ряда, будучи повторенной определенное количество раз [13].

4. Тренд временного ряда

Тренд указывает на наличие в изменениях исследуемой переменной долгосрочного колебания с периодичностью, значительно превышающей длительность рассматриваемого ряда данных [13].

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФИТОПЛАНКТОНА

5.1 Внутригодовая и сезонная изменчивость концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря по данным сервиса Giovanni

Во временном ходе температуры и хлорофилла «а» прослеживается четкая периодичность (рисунки 10,11). В целом, можно заметить, что высоким показателям хлорофилла способствуют низкие значения температуры. Температура воды Баренцева моря Северного Ледовитого океана колеблется от 1.5-2°C до 9 °С. Средняя температура Баренцева моря составляет около 5 °С.

2004, 2013, 2017, 2016, 2018, 2020 – годы с повышенными значениями температур

2003, 2004, 2013, 2016, 2018, 2020 – годы с максимальными концентрациями хлорофилла «а»

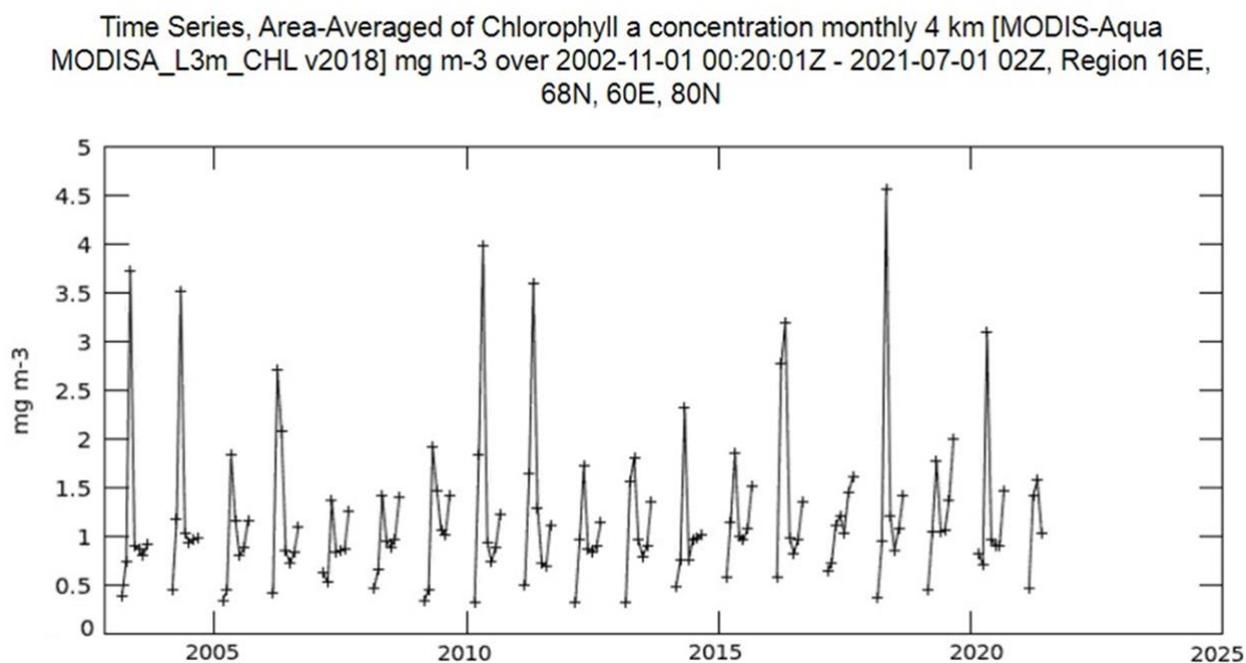


Рисунок 10 - Временная изменчивость осредненной по площади Баренцева моря концентрации хлорофилла за период с 2002.11 – 2021.07

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km
[MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-11-01 00:20:01Z - 2021-
07-01 02Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

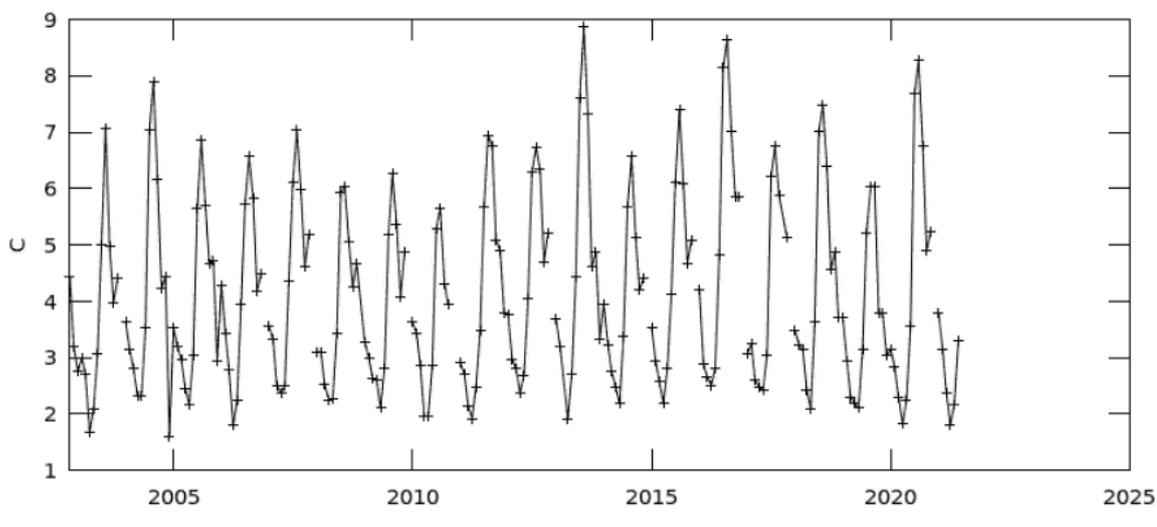


Рисунок 11 - Временной ход изменения температуры поверхности моря в период с 2002.11 – 2021.07

Анализ рисунков 12-29 за выбранные годы показал, что резко выраженный максимум концентрации хлорофилла «а», связанный с майским цветением фитопланктона, наблюдается почти ежегодно в мае порядка 3-3.5 мг/м³, и только в мае 2018 года это значение доходит до 4.5 мг/м³. Вторая волна цветения фитопланктона приходится на лето, но она значительно слабее первой весенней. В основном, летнее цветение заметно в узкой прибрежной полосе, где реки насыщают морскую воду питательными элементами.

Максимальные значения температуры поверхности моря наблюдаются в августе. Самое высокое значение температуры поверхности моря за весь период наблюдений зафиксировано в 2013 – около 9°C.

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2003-01-01 00:50:01Z - 2004-01-01 02:24Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

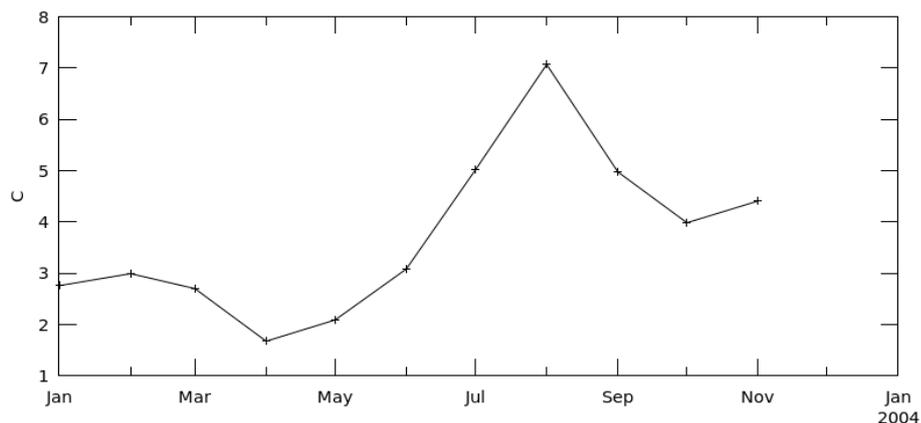


Рисунок 12 – Распределение температуры на поверхности в период с 2003.01-2003.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2003-01-01 00:50:01Z - 2004-01-01 02:24Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

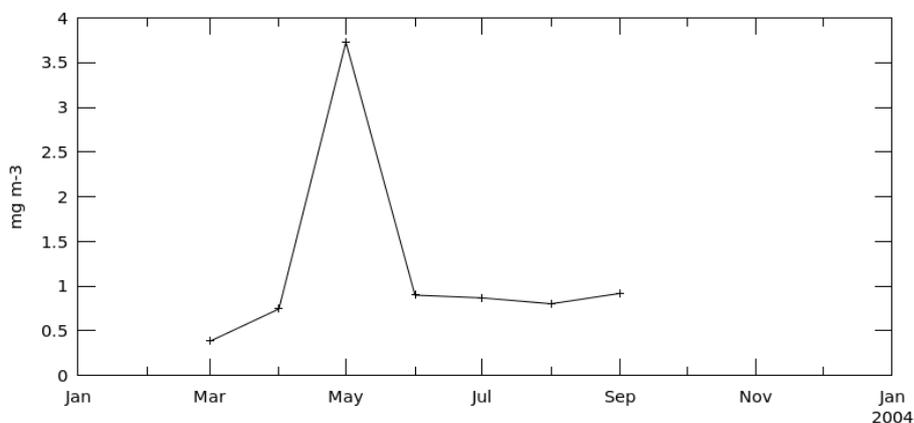


Рисунок 13 – Концентрация хлорофилла «а» в период с 2003.01-2003.12

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2004-01-01 00:20:01Z - 2005-01-01 02:34Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

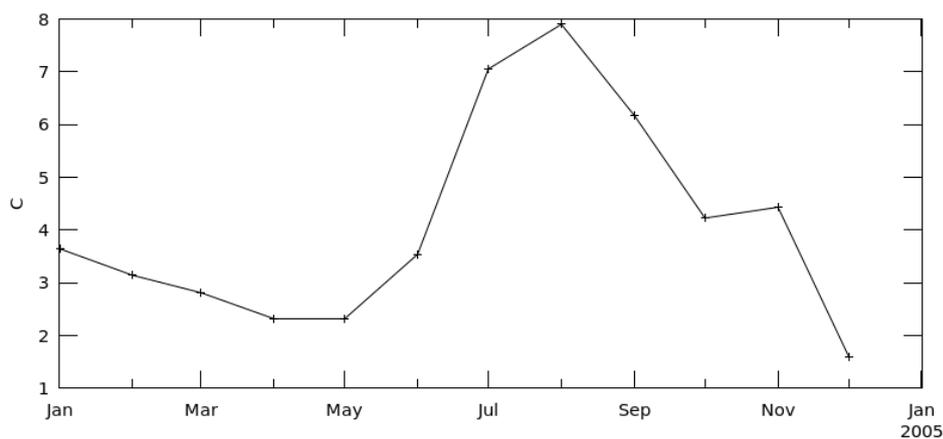


Рисунок 14 – Распределение температуры на поверхности в период с 2004.01 – 2004.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL_v2018] mg m-3 over 2004-01-01 00:20:01Z - 2005-01-01 02:34Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

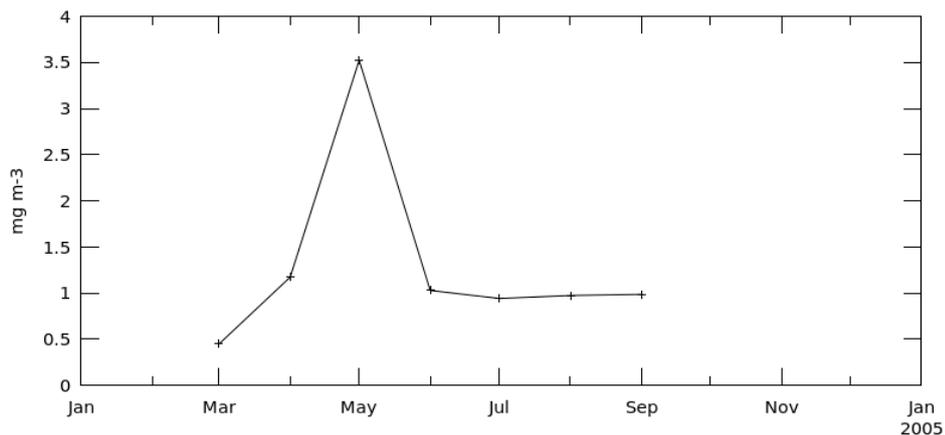


Рисунок 15 – Концентрация хлорофилла «а» в период с 2004.01 – 2004.12

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km_vR2019.0] C over 2010-01-01 00:25:01Z - 2011-01-01 02:09Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

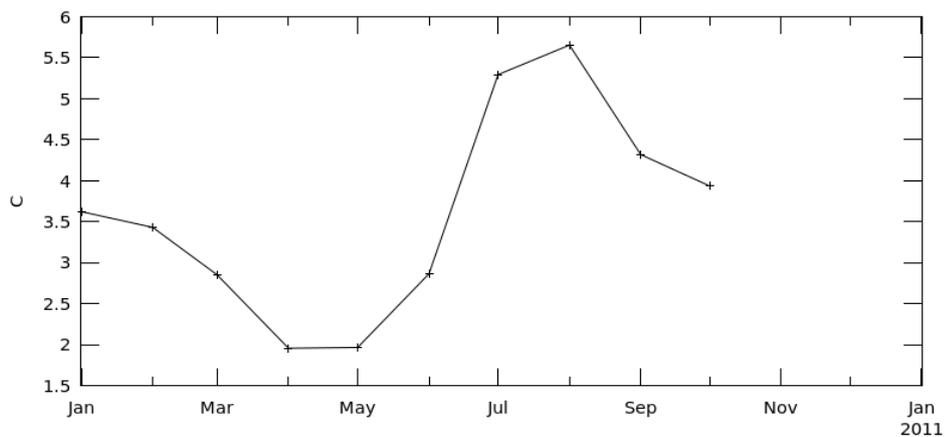


Рисунок 16 – Распределение температуры на поверхности в период с 2010.01- 2010.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL_v2018] mg m-3 over 2010-01-01 00:25:01Z - 2011-01-01 02:09Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

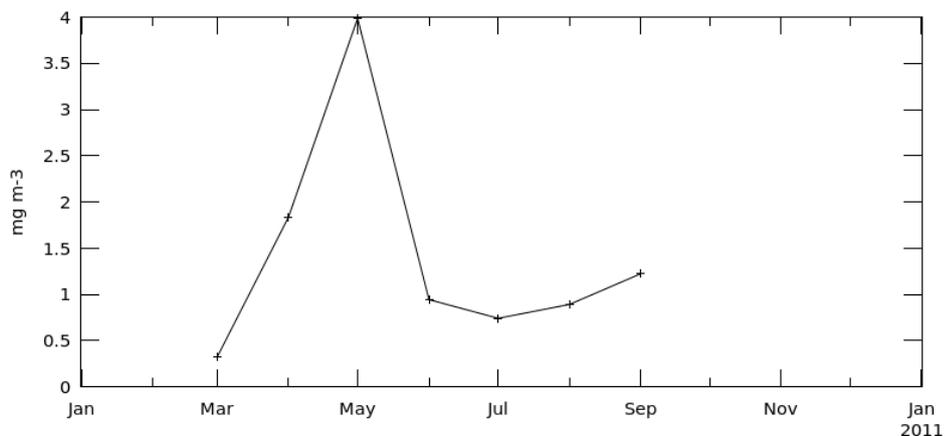


Рисунок 17 - Концентрация хлорофилла «а» в период с 2010.01- 2010.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2011-01-01 00:25:01Z - 2012-01-01 02Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

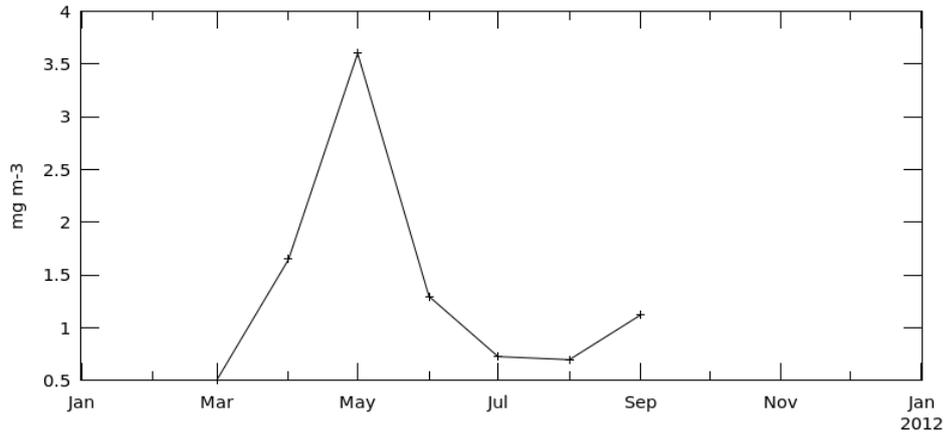


Рисунок 18 - Концентрация хлорофилла «а» в период с 2011.01 – 2011.12

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2011-01-01 00:25:01Z - 2012-01-01 02Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

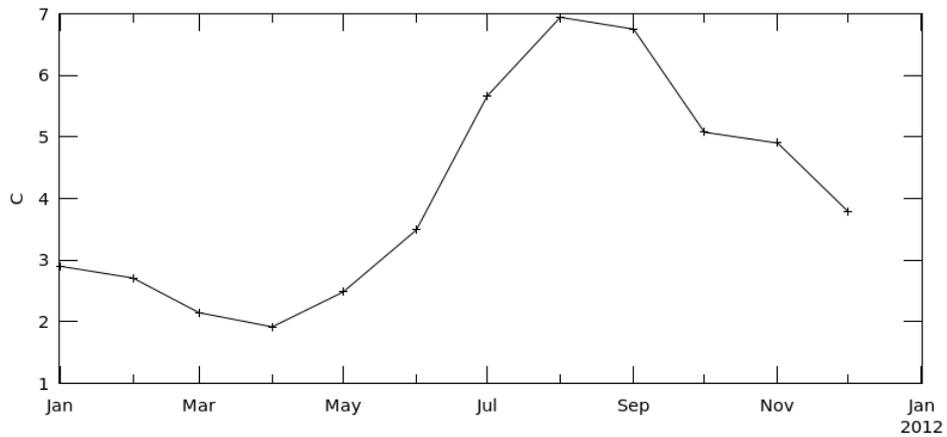


Рисунок 19 - Распределение температуры на поверхности в период с 2011.01 – 2011.12

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2013-01-01 00:10:01Z - 2014-01-01 02:44Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

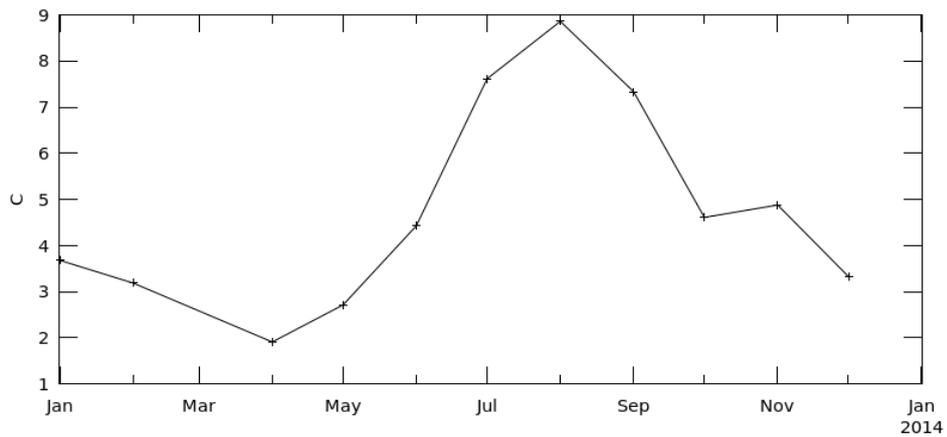


Рисунок 20 - Распределение температуры на поверхности в период с 2013.01 – 2013.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL_v2018] mg m-3 over 2013-01-01 00:10:1Z - 2014-01-01 02:44Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

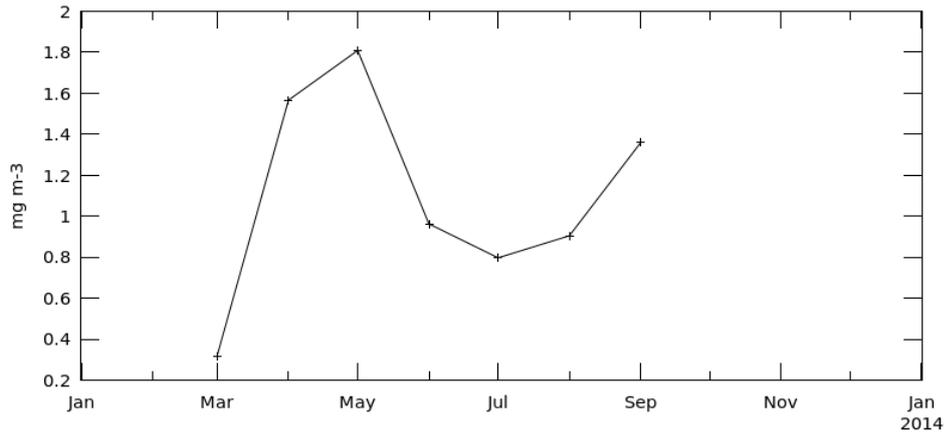


Рисунок 21 - Концентрация хлорофилла «а» в период с 2013.01 – 2013.12

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km_vR2019.0] C over 2016-01-01 00:15:01Z - 2017-01-01 02:09Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

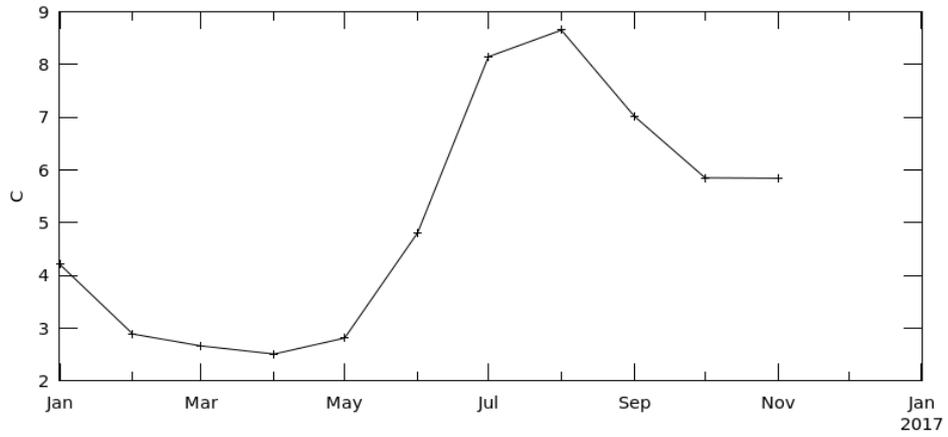


Рисунок 22 - Распределение температуры на поверхности в период с 2016.01 – 2016.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL_v2018] mg m-3 over 2016-01-01 00:15:01Z - 2017-01-01 02:09Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

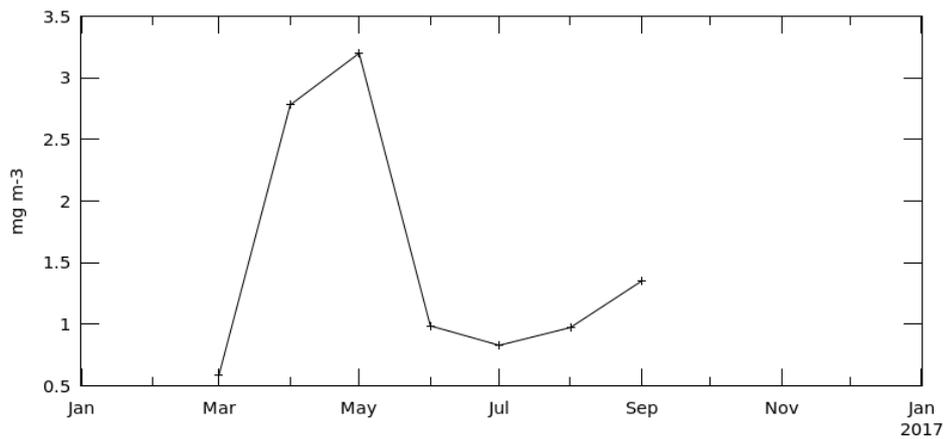


Рисунок 23 - Концентрация хлорофилла «а» в период с 2016.01 – 2016.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2018-01-01 00:00:01Z - 2019-01-01 02:34Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

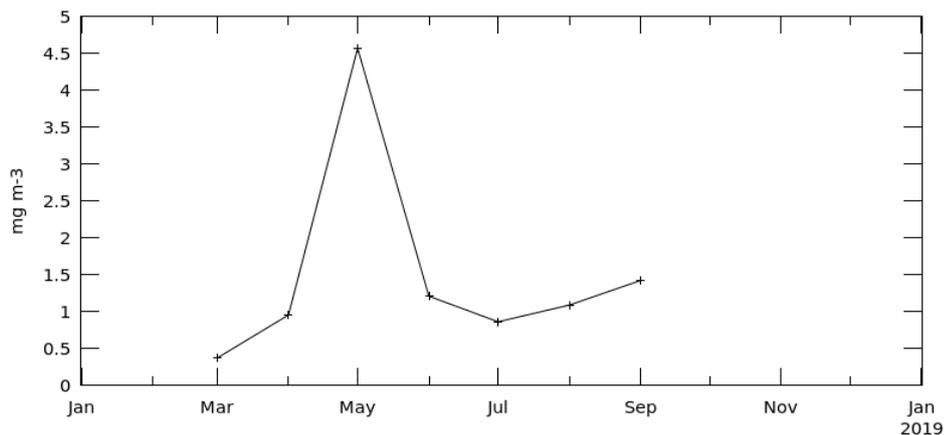


Рисунок 24 - Концентрация хлорофилла «а» в период с 2018.01 – 2018.12

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2018-01-01 00:00:01Z - 2019-01-01 02:34Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

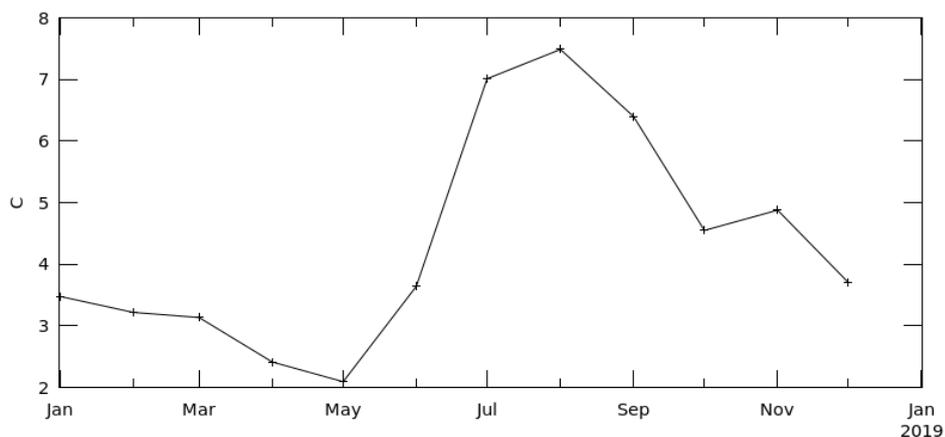


Рисунок 25 - Распределение температуры на поверхности в период с 2018.01 – 2018.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2020-Jan - 2021-01-01 02:19Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

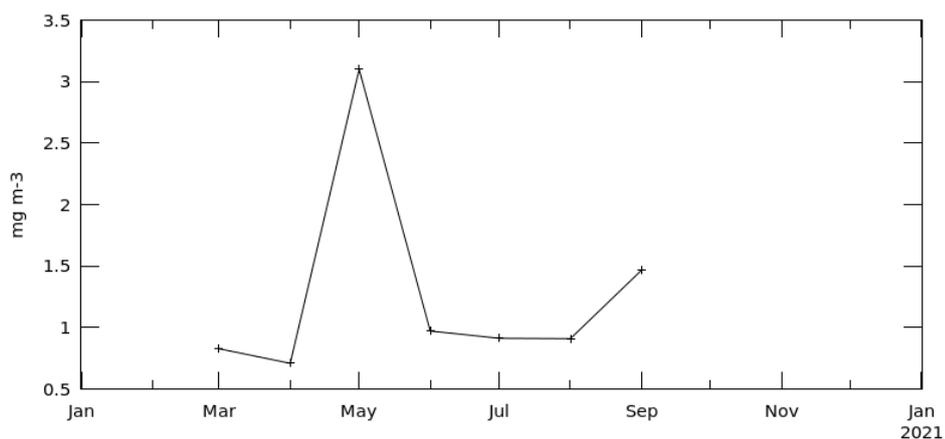


Рисунок 26 - Концентрация хлорофилла «а» в период с 2020.01 – 2020.12

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2020-Jan - 2021-01-01 02:19Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N

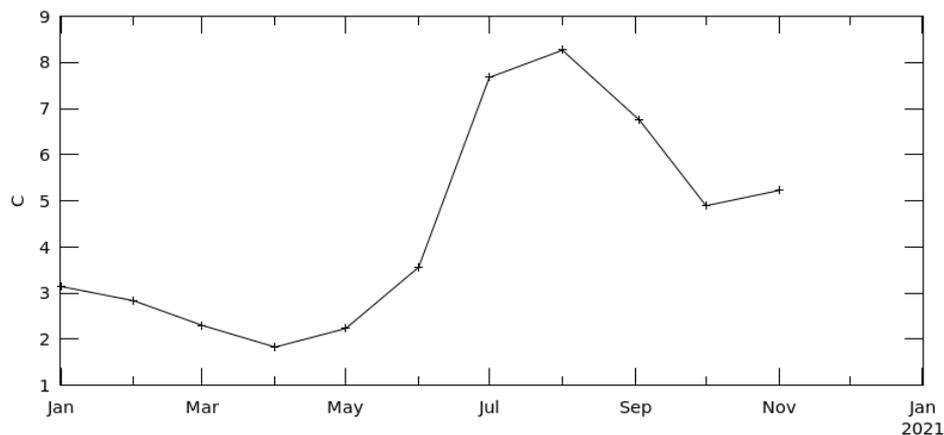


Рисунок 27 - Распределение температуры на поверхности в период с 2020.01 – 2020.12

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2021-01-01 00:10:01Z - 2021-Dec, Region 16E, 68N, 60E, 80N

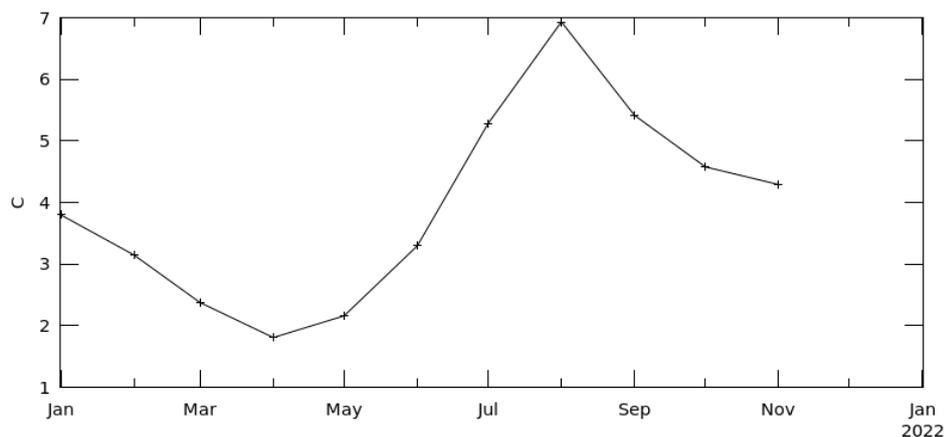


Рисунок 28 - Распределение температуры на поверхности в период с 2021.01 – 2021.12

Time Series, Area-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2021-01-01 00:10:01Z - 2021-Dec, Region 16E, 68N, 60E, 80N

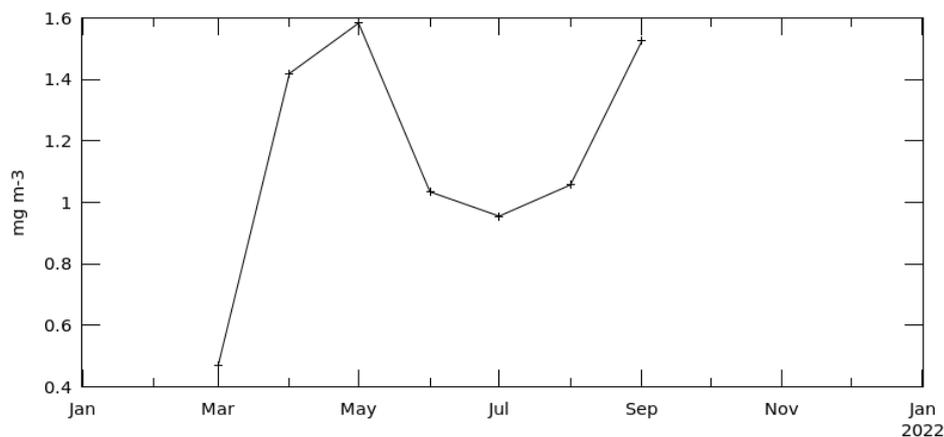


Рисунок 29 - Концентрация хлорофилла «а» в период с 2021.01 – 2021.12

5.2 Пространственная изменчивость фитопланктона в Баренцевом море

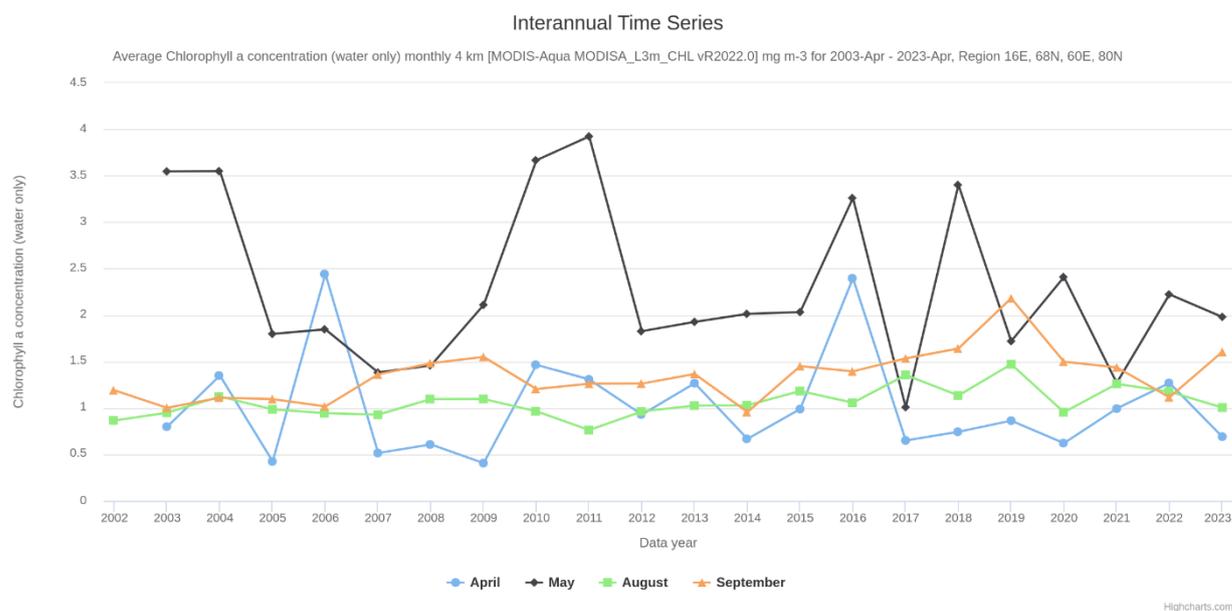


Рисунок 30 - Концентрация хлорофилла «а» осредненной по площади Баренцева моря за период с 2002 – 2021 гг.

На рисунке 30 отражается концентрация хлорофилла "а" в изучаемой области с 2002 по 2021 год, отметим, что самые высокие пики наблюдаются в мае - 2003, 2011, 2016, 2018, 2020 годах. В апреле пики наблюдаются в 2004, 2006, 2010, 2013, 2014 годах. В августе проявление пиков не так ярко выражено, как в сентябре с 2007 по 2009, 2019 годы.

Дальнейший анализ данных показывает, что концентрация хлорофилла "а" в изучаемой области имеет явно выраженный сезонный характер. Наблюдается устойчивая тенденция к увеличению содержания хлорофилла в мае, что может быть связано с началом весеннего периода и активным фотосинтезом растений. Апрель также выделяется высокими значениями концентрации хлорофилла, возможно, из-за повышенной активности фотосинтеза в это время года.

Сравнение данных за разные годы позволяет выявить интересные закономерности. Например, пики концентрации хлорофилла в августе наблюдались преимущественно в период с 2007 по 2009 годы, что может быть связано с конкретными климатическими условиями в эти годы. Сентябрь, в свою очередь, отличается несколько менее выраженными

пиками, но тем не менее заметным уровнем концентрации хлорофилла в определенные годы.

Важнейшим фактором, определяющим пространственное распределение биооптических характеристик, включая концентрацию хлорофилла «а», в Баренцевом море, является поступление с запада в виде поверхностных течений относительно теплых и соленых атлантических вод. Навстречу им с севера и северо-востока поступают более холодные и менее соленые арктические воды. В мае за эту границу можно условно принять изотерму 3 °С, в августе – 7 °С (рисунки 31 – 34).

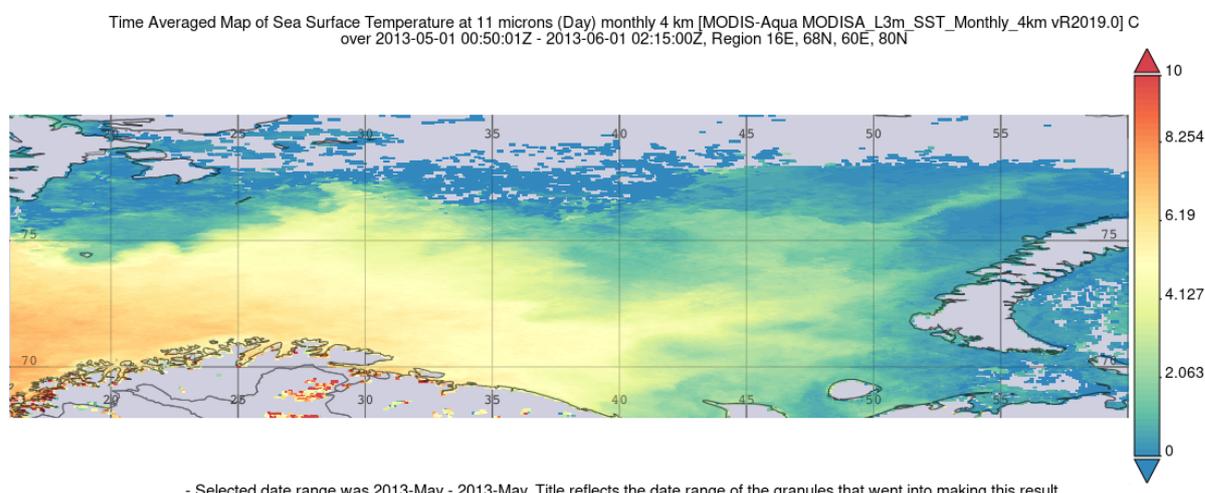


Рисунок 31 – Температура поверхности моря в мае 2013 г.

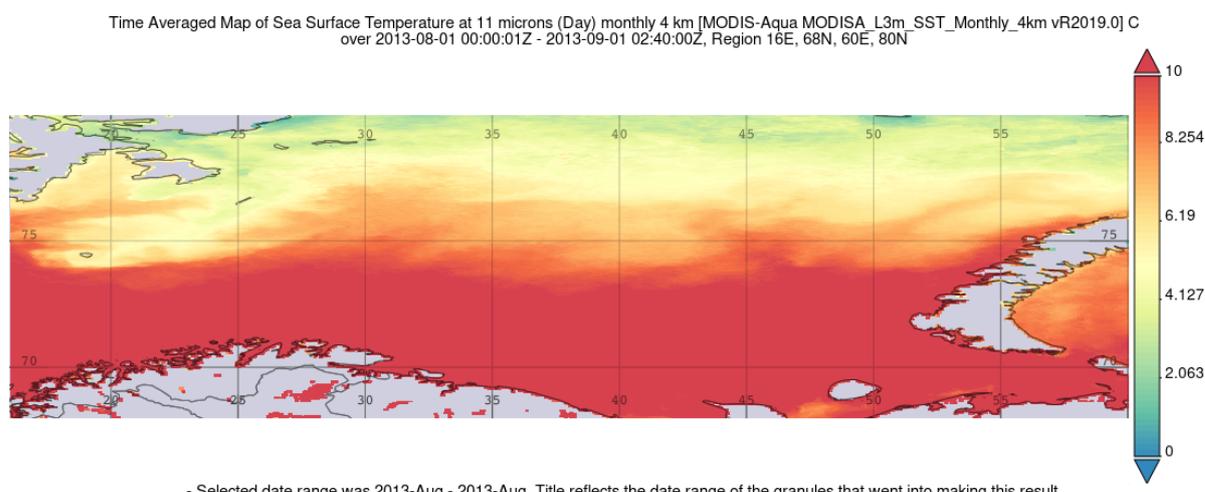
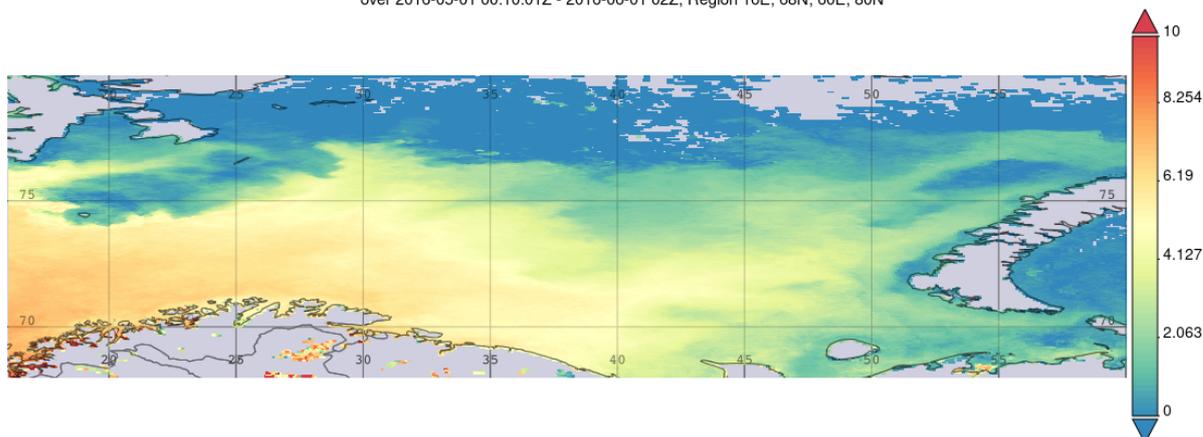


Рисунок 32 – Температура поверхности моря в августе 2013 г.

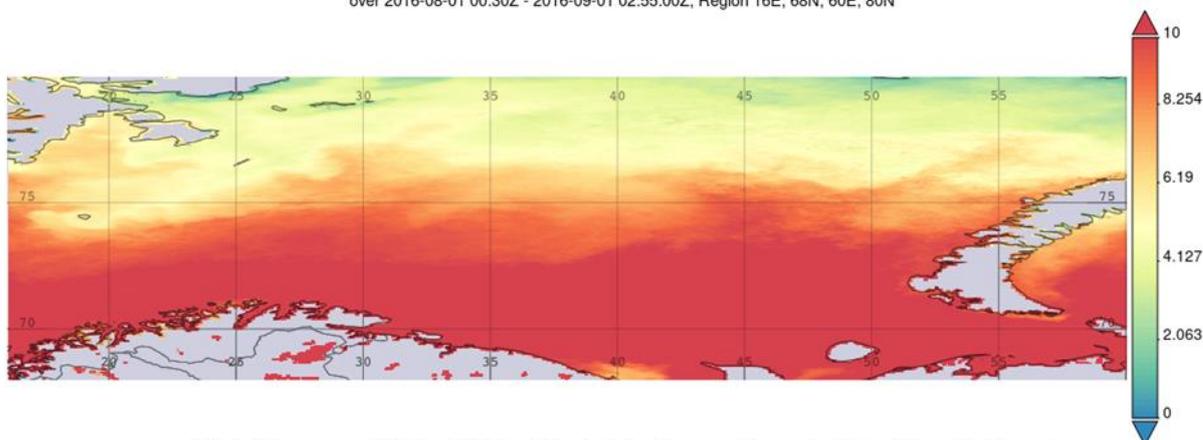
Time Averaged Map of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2016-05-01 00:10:01Z - 2016-06-01 02Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N



- Selected date range was 2016-May - 2016-May. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Рисунок 33 – Температура поверхности моря в мае 2016 г.

Time Averaged Map of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2016-08-01 00:30Z - 2016-09-01 02:55:00Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N



- Selected date range was 2016-Aug - 2016-Aug. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

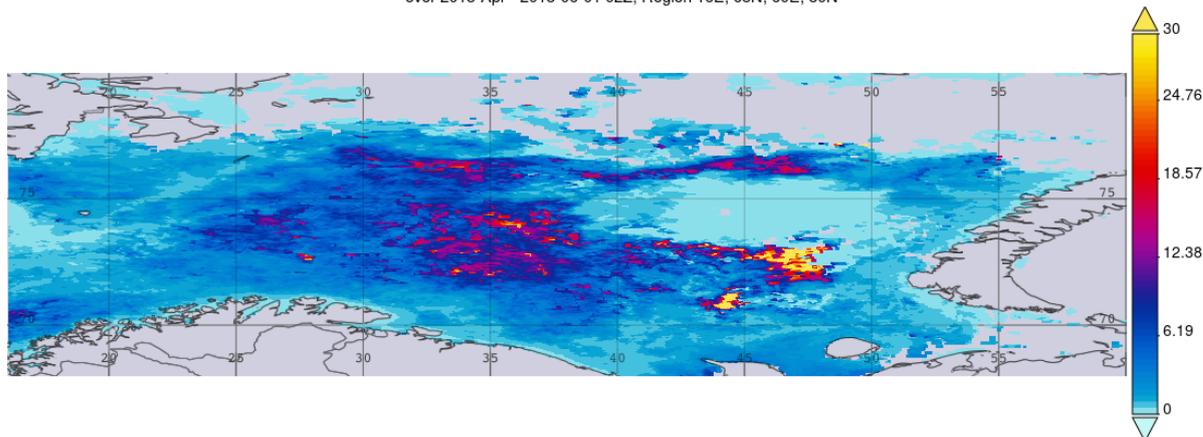
Рисунок 34 – Температура поверхности моря в августе 2016 г.

Карты пространственного распределения температуры поверхности в Баренцевом море, представленные на рисунках 31 – 34 для 2013 и 2016 г., демонстрируют, что повышенные температуры наблюдаются в августе. Это объясняется тем, что море нагревается в течение всего лета, а максимальный прогрев происходит в августе – сентябре, что подтверждается и графиками сезонной изменчивости температуры поверхности моря.

Карты пространственного распределения концентрации хлорофилла «а» в Баренцевом море, представленные на рисунках 35-37 и 39, демонстрируют, что повышенные концентрации хлорофилла «а» наблюдаются в мае в центральной части акватории, при этом интенсивность цветения отличается в разные годы. Спутниковый снимок, полученный за 09.

05. 2018 г., показывает, что цветение невозможно определить в комбинации каналов True Color («естественный цвет»).

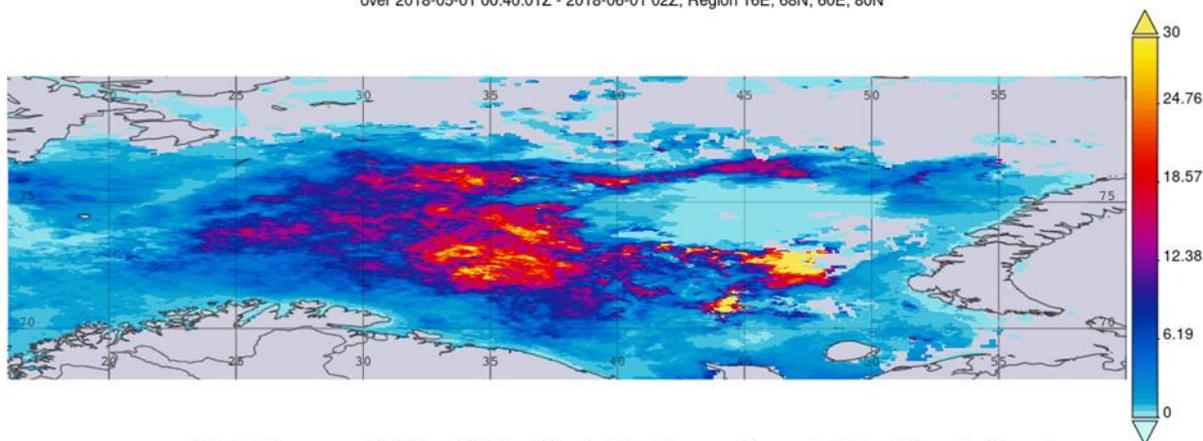
Time Averaged Map of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2018-Apr - 2018-06-01 02Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N



- Selected date range was 2018-Apr - 2018-May. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Рисунок 35 – Концентрация хлорофилла «а» в начале цветения (апрель 2018 г.)

Time Averaged Map of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2018-05-01 00:40:01Z - 2018-06-01 02Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N



- Selected date range was 2018-May - 2018-May. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Рисунок 36 – Концентрация хлорофилла «а» в разгар цветения (май 2018 г.)

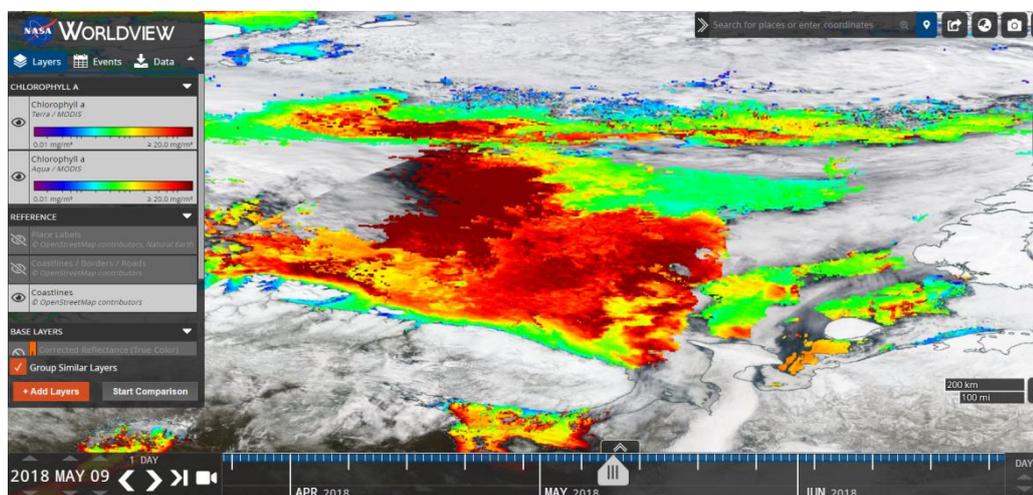
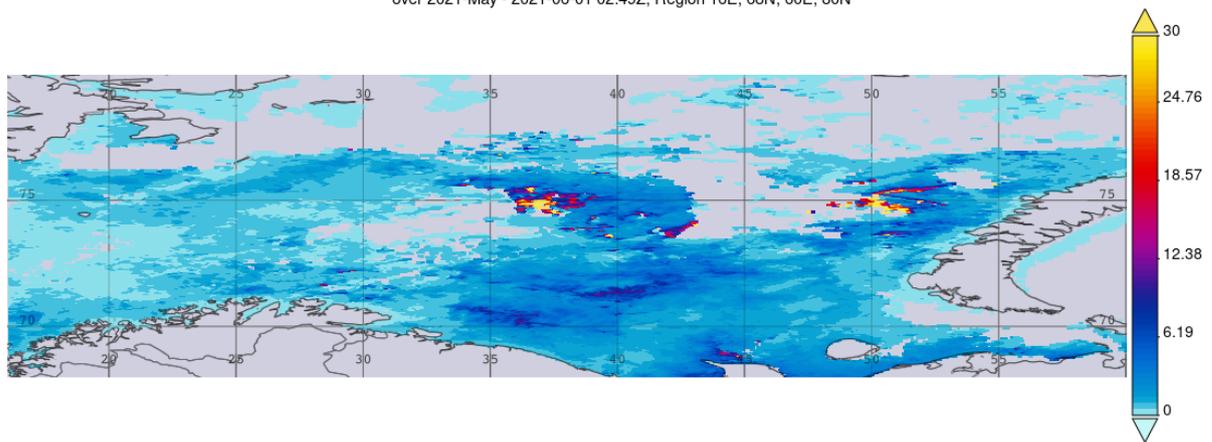


Рисунок 37 – Концентрация хлорофилла «а» в разгар цветения по данным сервиса WorldView (09.05. 2018 г.)



Рисунок 38 – Снимок в естественных цветах, полученный со спектрорадиометра MODIS (09.05. 2018 г.)

Time Averaged Map of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2021-May - 2021-06-01 02:49Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N



- Selected date range was 2021-May - 2021-May. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Рисунок 39– Концентрация хлорофилла «а» в разгар майского цветения, 2021 г.

Одним из наблюдаемых проявлений влияния теплых атлантических вод на экосистему баренцевоморского шельфа может служить возрастание частоты и продолжительности явлений массового развития кокколитофорид [11, с. 1]. Обычно цветения кокколитофорид более характерны для центральной части Баренцева моря в летний период (июль-сентябрь) [12, с. 31].

Цветение специфического вида фитопланктона, кокколитофорид приводит к резкому возрастанию мутности воды, которое происходит главным образом из-за рассеяния света кокколитами — отделенными от кокколитофорид известковыми чешуйками, составляющими оболочку клеток. Цветение кокколитофорид, вследствие их очень высоких

концентраций, представляет значительный интерес для изучения цикла углерода в толще моря в соответствующих районах. Кроме того, оно играет существенную роль в процессах осадкообразования. Эти обстоятельства определяют важность изучения пространственной и временной изменчивости распределения этого вида водорослей.

Снимок в естественном цвете был сделан 16 августа 2011 года спектрометрическим MODIS на спутнике Terra (рисунок 40).

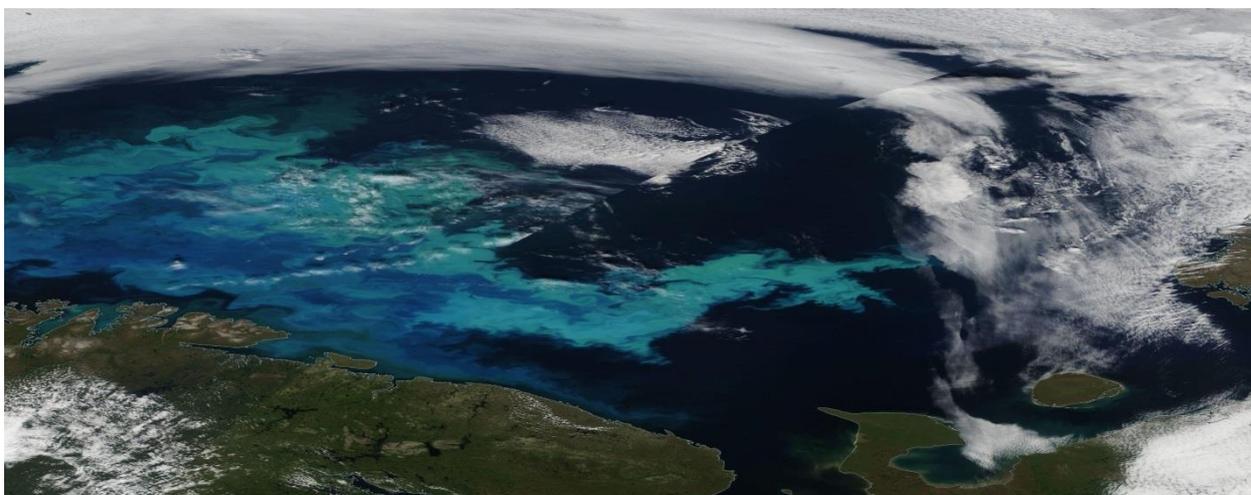
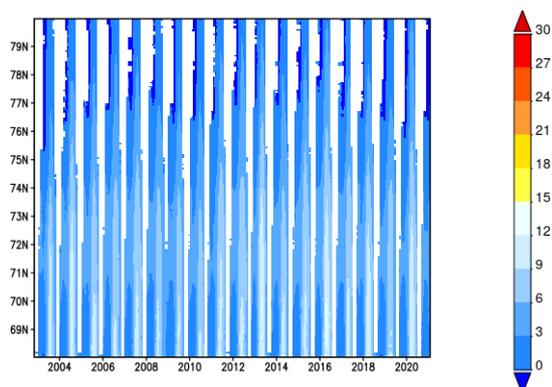


Рисунок 40 – Цветение кокколитофорид в Баренцевом море (август 2011 г.)

Молочно-голубой цвет моря на этом снимке вызван цветением кокколитофоридов (coccolithophores), микроскопического планктона, покрытого белыми пластинками из известняка. Вид кокколитофориды, в данном случае, *Emiliana huxleyi*, чье цветение может быть вызвано обилием света в период арктического лета. Цветовое разнообразие вызвано доминированием различных видов фитопланктона, особенно диатомовых водорослей (diatoms), дающих зеленые оттенки на снимке.

На рисунках 41, 42 приведены диаграммы Хофмоллера с ноября 2002 года по июль 2021 года при изменении параметра (в данном случае хлорофилла «а» и температуры поверхности моря) по широте.

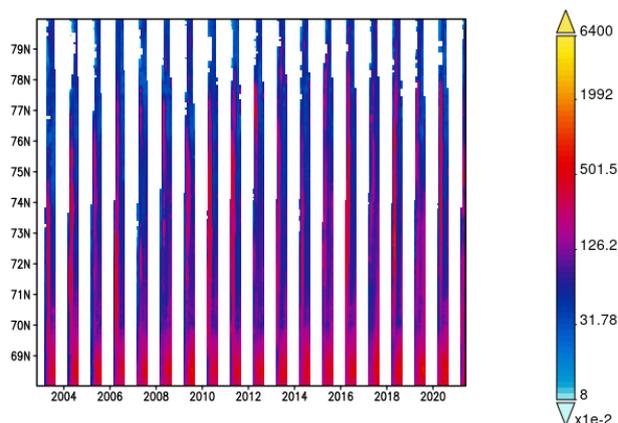
Hovmoller, Longitude-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-11-01 00:20:01Z - 2021-07-01 02Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N



- Selected date range was 2002-Nov - 2021-Jun. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Рисунок 41 - Диаграмма Хофмоллера по распределению температуры на поверхности моря в период с 2002 – 2021 гг.

Hovmoller, Longitude-Averaged of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m-3 over 2002-11-01 00:20:01Z - 2021-07-01 02Z, Region 16E, 68N, 60E, 80N



- Selected date range was 2002-Nov - 2021-Jun. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Рисунок 42 - Диаграмма Хофмоллера по концентрации хлорофилла «а» в период с 2002 – 2021 гг.

Диаграмма Хофмоллера используется для визуализации данных и анализа изменений, как во времени, так и в пространстве. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при повышении температуры в определенные периоды года, содержание хлорофилла уменьшается и, соответственно, наоборот. Прослеживается чёткая периодичность в изменениях рассматриваемых параметров. Сервис Giovanni, который предоставляет данные оптических сканеров цвета, попросту не имеет данных в полярную ночь (т. к. главным источником излучения для оптических

пассивных систем является солнечный свет). Этим объясняются белые полосы на представленных диаграммах. Повышенные значения концентрации хлорофилла «а» в районе 69°-70° с.ш. соответствуют южной части Баренцева моря и определяются речным стоком.

5.3 Результаты распределения концентрации хлорофилла «а» в Баренцевом море по данным реанализа

Для дальнейшего исследования распределения концентрации хлорофилла «а» были взяты 3 станции с двумя характерными пиками – 1, 4 и 5 точки. Исследование распределения концентрации хлорофилла «а» на этих станциях может помочь понять механизмы ее изменений и связи с окружающей средой.

Статистический анализ

1 точка: в ходе работы был создан график внутригодового хода в точке с координатами: 68°63' с.ш., 54°68' в.д., за временной промежуток с 1993 по 2020 гг. Сезонный ход демонстрирует одинаковые изменения характеристик, когда внутригодовой ход более показателен, нежели сезонный, поэтому выбор был сделан в пользу внутригодового хода. Расчеты и анализ проводились для поверхностного слоя. Ряд данных был разделен на 2 части: 1 часть с января по июль, 2 часть с августа по декабрь, так сделано для того, чтобы охватить два пика цветения. Первая часть данных охватывает период времени, когда обычно происходит весеннее цветение, в то время как вторая часть данных охватывает период времени, когда обычно происходит осеннее цветение. Разделение данных на эти две части позволяет изучить разные аспекты цветения и сравнить их между собой. Корреляционные матрицы для двух рядов продемонстрировали хорошую связь между всеми характеристиками. Результаты расчетов приведены в таблице 1 и 2. Все коэффициенты были проверены на статистическую значимость (т.е. достоверны и значимы). На основании этих данных, был построен внутригодовой ход следующих характеристик: кислорода, нитрата, кремния, фосфата, хлорофилла «а», температуры и солености (рис.43).

При анализе внутригодового хода было показано, что максимальные показатели нитрата, кремния и фосфата зафиксированы в весенний период (с апреля по май). А вот максимальные показатели температуры и кислорода выявлены в летне - осенний период (с августа по ноябрь). Соленость имеет пики в начале сезона - зимне-весенний период (с января по май). Высокие значения хлорофилла «а» наблюдались в летне-осенний период (с май по октябрь).

Изучив полученные данные, можно сделать вывод, что в точке №1 в течение этого периода времени наблюдалось активное цветение хлорофилла «а» в летне-осенний период.

Таб.1-Корреляционная матрица для 1 ряда значимых характеристик в точке №1 со сдвигами (в скобках) в месяцах

	O2	NO3	Si	PO4	T	S
Chl	0,512 (4)	-0,427 (4)	-0,525 (4)	-0,539 (1)	-0,478 (4)	0,597 (5)

Таб.2-Корреляционная матрица для 2 ряда значимых характеристик в точке №1 со сдвигами (в скобках) в месяцах

	O2	NO3	Si	PO4	T	S
Chl	0,820 (2)	0,543 (3)	-0,293 (2)	0,856 (2)	-0,746 (2)	0,699 (2)

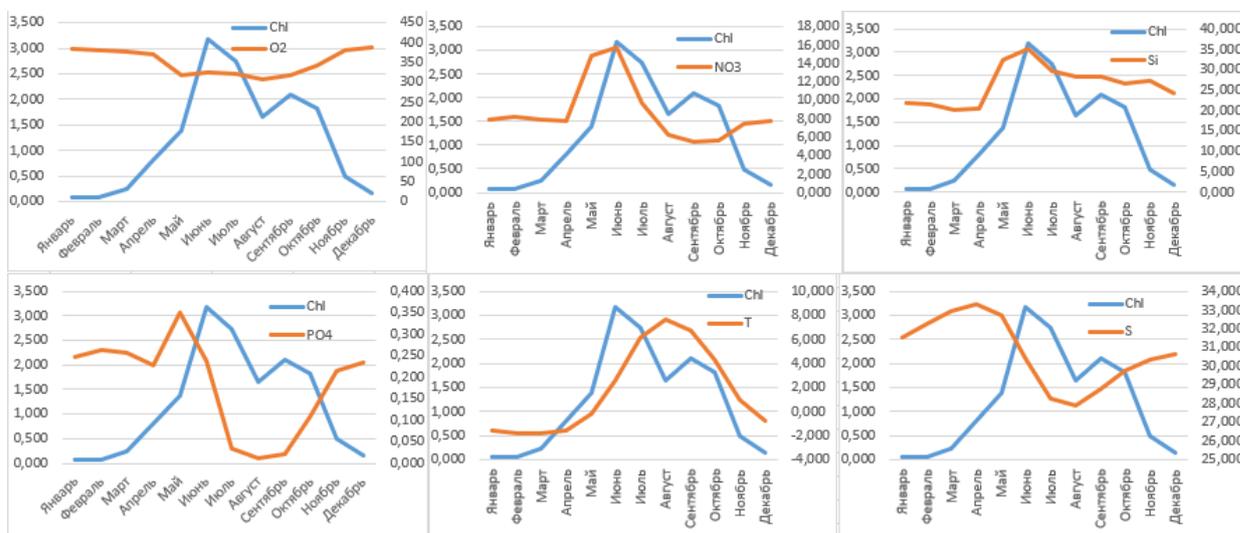


Рисунок 43-Внутригодовой ход в точке № 1 с координатами 68°63' с.ш., 54°68' в.д. за период с 1993 по 2020 год. Величины PO4 и NO3, O2, Si измеряются в ммоль/м3, а концентрация хлорофилла «а» – в мг/м3.

4 точка: для четвертой точки с координатами 74 °55' с.ш., 33°02' в.д., так же, как и для других точек был построен внутригодовой ход за

временной промежуток с 1993 по 2020 гг. Ряд данных был разделен на 2 части: 1 часть с января по июль, 2 часть с августа по декабрь, так сделано для того, чтобы охватить два пика цветения. Корреляционные матрицы для двух рядов продемонстрировали хорошую связь между всеми характеристиками. Результаты расчетов приведены в таблице 3 и 4. Все коэффициенты были проверены на статистическую значимость (т.е. достоверны и значимы).

При проверке было определено, что все коэффициенты значимы. На основании этих данных, был построен внутригодовой ход следующих характеристик: кислорода, нитрата, кремния, фосфата, хлорофилла «а», температуры и солености (рис.44).

Из полученных графиков, которые представлены на рисунке 44 видно, что внутригодовой ход хлорофилла «а» и фосфатов не совпадает. Максимальные значения хлорофилла «а» зафиксированы в весенний период (апрель-май), а пики фосфатов выявлены в зимний период (январь-февраль). Ход хлорофилла «а», нитратов и кремния практически не совпадает. Пики нитратов наблюдаются в зимний (январь-февраль) и осенний (октябрь-ноябрь) период, а кремния – весенний (март-апрель) и зимний (ноябрь-декабрь) периоды. Далее выявлено, что ход хлорофилла «а» и кислорода совпадают. Максимальные значения кислорода обнаружены в весенне-летний период (май-июль). Значения температуры и солености не совпадает с ходом хлорофилла «а», соленость, как и температура имеет пики в холодный период (ноябрь-январь).

Исследуя 4 точку, было обнаружено, что для нее так же характерно активное цветение в весенне-летний период.

Таб.3-Корреляционная матрица для 1 ряда значимых характеристик в точке №4 со сдвигами (в скобках) в месяцах

	O2	NO3	Si	PO4	T	S
Chl	-0,441 (2)	0,629 (4)	0,608 (4)	0,624 (4)	0,184 (3)	0,455 (4)

Таб.4-Корреляционная матрица для 2 ряда значимых характеристик в точке №4 со сдвигами (в скобках) в месяцах

	O2	NO3	Si	PO4	T	S

Chl	0,476 (3)	0,598 (3)	0,575 (3)	0,587 (3)	-0,201 (0)	0,319 (2)
------------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	-----------

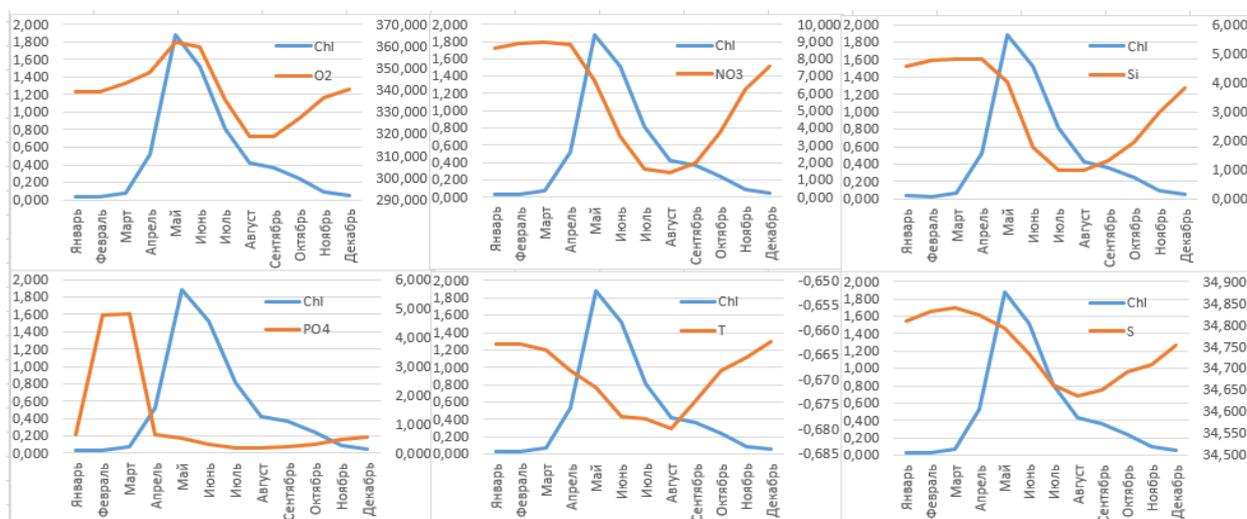


Рисунок 44-Внутригодовой ход в точке № 4 с координатами 67°04' с.ш., 41°80' в.д. за период с 1993 по 2020 год. Величины PO4 и NO3, O2, Si измеряются в ммоль/м3, а концентрация хлорофилла «а» – в мг/м3.

5 точка: для пятой точки с координатами 77°91' с.ш., 46°35' в.д. аналогично был построен внутригодовой ход за временной промежуток с 1993 по 2020 гг. Корреляционные матрицы для двух рядов продемонстрировали хорошую связь между всеми характеристиками. Результаты расчетов приведены в таблице 5 и 6. Все коэффициенты были проверены на статистическую значимость (т.е. достоверны и значимы).

В течение всего периода был построен внутригодовой ход (рис.45) следующих характеристик: кислорода, нитрата, кремния, фосфата, хлорофилла «а», температуры и солености.

При анализе графиков видно, что ход хлорофилла «а», фосфатов и нитратов не совпадает. Максимальные значения хлорофилла зафиксированы в летне-осенний период (июнь-сентябрь), у фосфатов и нитратов в осенне-зимний период (октябрь-ноябрь). Показатели хлорофилла «а» и температуры не совпадают. Пик температуры в осенний период (сентябрь-октябрь). Ход солености и хлорофилла не совпадают, соленость имеет пики в зимний период (декабрь-январь). Максимальные значения кремния и хлорофилла «а» не совпадают, однако в зимний период наблюдаются пики кремния. Значения

кислорода с ходом хлорофилла совпадают. Пики наблюдаются в летне-осенний период.

Для данной точки характерно активное цветение в весенне-летний период.

Таб.5-Корреляционная матрица для 1 ряда значимых характеристик в точке №5 со сдвигами (в скобках) в месяцах

	O2	NO3	Si	PO4	T	S
Chl	-0,376 (4)	0,361 (5)	0,430 (5)	0,328 (5)	-0,165 (5)	0,379 (4)

Таб.6-Корреляционная матрица для 2 ряда значимых характеристик в точке №5 со сдвигами (в скобках) в месяцах

	O2	NO3	Si	PO4	T	S
Chl	0,387 (3)	0,543 (3)	0,487 (3)	0,511 (3)	-0,181 (3)	0,504 (3)

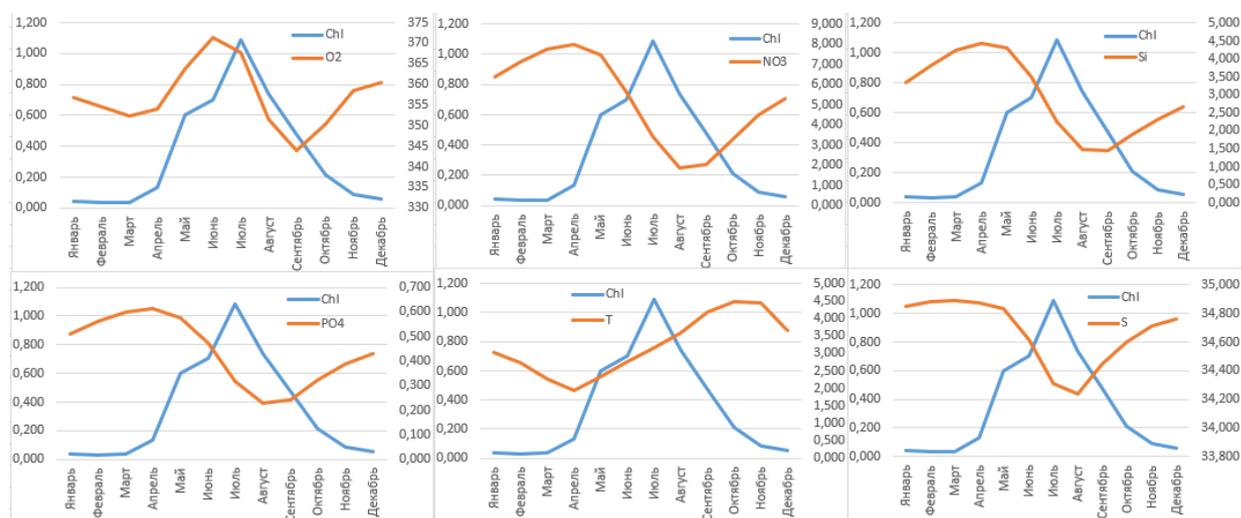


Рисунок 45-Внутригодовой ход в точке № 5 с координатами 77°91' с.ш., 46°35' в.д. за период с 1993 по 2020 год. Величины PO4 и NO3, O2, Si измеряются в ммоль/м3, а концентрация хлорофилла «а» – в мг/м3.

Анализ тренда временного ряда

Для дальнейшей работы был проведен анализ тренда для среднегодовых значений.

Таб. 7 – хар-ки регрессии линейного тренда для точки №1

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,44
R-квадрат	0,19
Нормированный R-квадрат	0,16
Стандартная ошибка	0,15
Наблюдения	28

Дисперсионный анализ					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	1	0,14	0,14	6,14	0,02
Остаток	26	0,60	0,02		
Итого	27	0,75			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>
a0	1,10	0,06	18,60
a1	0,01	0,00	2,48

$$t_{кр}=2,05$$

$$t^*=2,48$$

N – длина ряда. Критическое значение $t_{кр}(\alpha, \nu)$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu=N-2$, где N -длина ряда.

$$t_{кр}=2,05 \text{ (по уровню значимости и числу степеней свободы)}$$

$$t^*=2,48 \text{ (из t-статистики)}$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$2,48 > 2,05$, нулевая гипотеза отвергается, коэффициент тренда значим, следовательно, линейный тренд значим.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,19$ (19%) характеризует незначительный вклад тренда в общую дисперсию ряда.

Проверка значимости коэффициентов регрессии:

Для того чтобы оценить значимость коэффициентов регрессии используют 2 гипотезы - нулевую гипотезу $H_0: a_1 = 0$ и альтернативная $H_1: a_1 \neq 0$.

Для линейного тренда $t^*(a_0) = 18,60 > t_{кр}$ значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Для линейного тренда $t^*(a_1) = 2,48 > t_{кр}$ значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Следовательно, линейный тренд есть.

Таб. 8 – хар-ки регрессии нелинейного тренда для точки №1

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,45
R-квадрат	0,20
Нормированный R-квадрат	0,14
Стандартная ошибка	0,15
Наблюдения	28

Дисперсионный анализ					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,15	0,07	3,11	0,06
Остаток	25	0,60	0,02		
Итого	27	0,75			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>
a0	1,14	0,09	12,06
a1	0,00	0,01	0,10
a2	0,00	0,00	0,50

$$t_{кр}=2,05$$

$$t^*=0,5$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$0,5 < 2,05$, нулевая гипотеза принимается, коэффициент тренда не значим, следовательно, нелинейный тренд не значим.

Корреляционное отношение равно 0,2 (20%) характеризует незначительный вклад тренда в общую дисперсию ряда.

Проверка коэффициента регрессии на значимость:

Для того чтобы оценить значимость коэффициентов регрессии используют 2 гипотезы - нулевую гипотезу $H_0: a_1 = 0$ и альтернативная $H_1: a_1 \neq 0$.

Для нелинейного тренда: $t^* (a_0) = 12,06 > t_{кр}$ значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Для нелинейного тренда: $t^* (a_1) = 0,10 < t_{кр}$ нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии не значим;

Для нелинейного тренда: $t^* (a_2) = 0,50 < t_{кр}$, нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии не значим;

Следовательно, нелинейный тренд отсутствует.

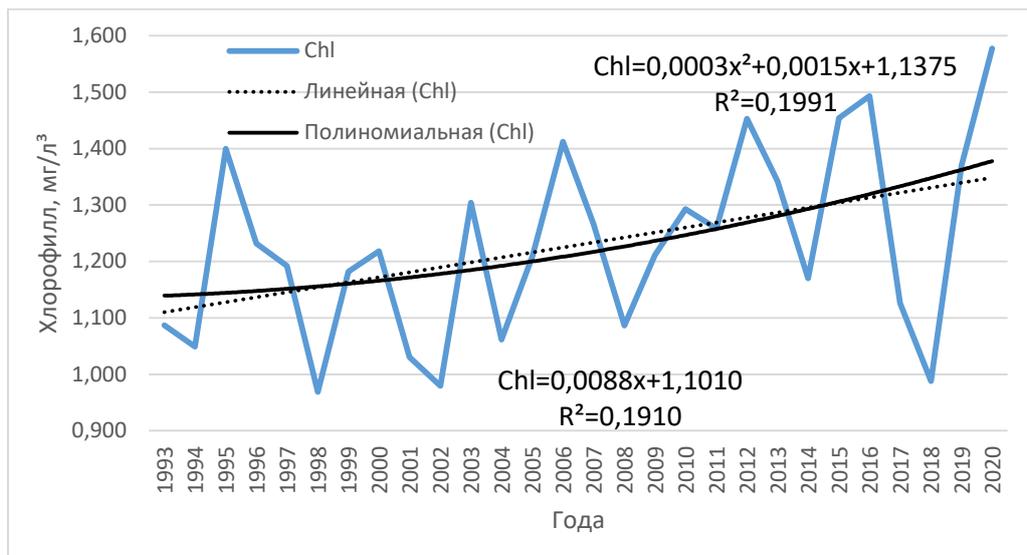


Рисунок 46 - Среднегодовая изменчивость Chl в точке 68°63' с.ш., 54°68' в.д. и ее линейный и нелинейный тренды.

Уравнение линейного тренда: $Chl = 0,0088x + 1,1010$, характер тренда положительный, т.е. Chl увеличивается.

Уравнение нелинейного тренда: $Chl = 3 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0015x + 1,1375$.

В результате, есть значимый, положительный линейный тренд для среднегодовых значений Chl.

Нелинейного тренда нет.

Далее будут представлены значимые тренды на выбранных ранее точках.

Таб. 9 – хар-ки регрессии нелинейного тренда для точки №2

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,65
R-квадрат	0,43
Нормированный R-квадрат	0,38
Стандартная ошибка	0,03
Наблюдения	28

Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2,00	0,02	0,01	9,27	0,00
Остаток	25,00	0,03	0,00		
Итого	27,00	0,05			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t- статистика</i>
a0	0,33	0,02	16,43
a1	-0,01	0,00	-4,26
a2	0,00	0,00	4,29

$$t_{кр}=2,05$$

$$t^*=4,29$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

4,29 > 2,05, нулевая гипотеза принимается, коэффициент тренда не значим, следовательно, нелинейный тренд значим.

Корреляционное отношение равно 0,43 (43%) характеризует незначительный вклад тренда в общую дисперсию ряда.

Проверка коэффициента регрессии на значимость:

Для того чтобы оценить значимость коэффициентов регрессии используют 2 гипотезы - нулевую гипотезу $H_0: a_1 = 0$ и альтернативная $H_1: a_1 \neq 0$.

Для нелинейного тренда: $t^* (a_0) = 16,43 > t_{кр}$ значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Для нелинейного тренда: $t^* (a_1) = 4,26 > t_{кр}$ нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии значим;

Для нелинейного тренда: $t^* (a_2) = 4,29 > t_{кр}$, нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Следовательно, нелинейный тренд присутствует.

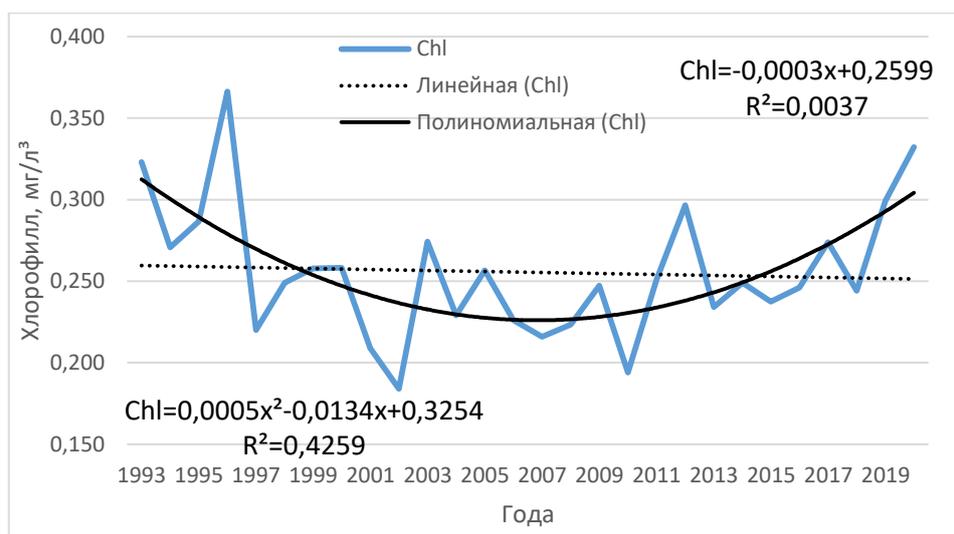


Рисунок 47 - Среднегодовая изменчивость Chl в точке 67°04' с.ш., 41°80' в.д. и ее линейный и нелинейный тренды.

Уравнение нелинейного тренда: $Chl = 5 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0134x + 0,3254$

В результате, есть значимый, положительный нелинейный тренд для среднегодовых значений Chl.

Таб. 10 – хар-ки регрессии нелинейного тренда для точки №3

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,65
R-квадрат	0,42
Нормированный R-квадрат	0,38
Стандартная ошибка	0,03
Наблюдения	28

Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2	0,02	0,01	9,17	0,00
Остаток	25	0,02	0,00		
Итого	27	0,04			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
a0	0,49	0,02	27,03
a1	-0,01	0,00	-4,21
a2	0,00	0,00	3,90

$$t_{кр} = 2,05$$

$$t^* = 3,90$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$3,90 > 2,05$, нулевая гипотеза принимается, коэффициент тренда не значим, следовательно, нелинейный тренд значим.

Корреляционное отношение равно 0,42 (42%) характеризует значительный вклад тренда в общую дисперсию ряда.

Проверка коэффициента регрессии на значимость:

Для того чтобы оценить значимость коэффициентов регрессии используют 2 гипотезы - нулевую гипотезу $H_0: a_1 = 0$ и альтернативная $H_1: a_1 \neq 0$.

Для нелинейного тренда: $t^* (a_0) = 27,03 > t_{кр}$ значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Для нелинейного тренда: $t^* (a_1) = 4,21 > t_{кр}$ нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии значим;

Для нелинейного тренда: $t^* (a_2) = 3,90 > t_{кр}$, нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Следовательно, нелинейный тренд присутствует.

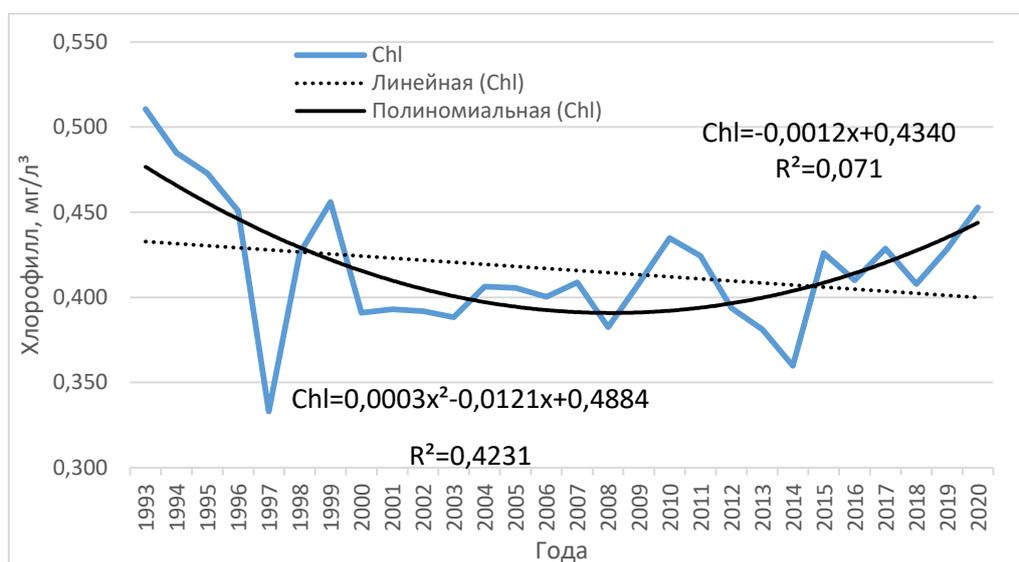


Рисунок 48 - Среднегодовая изменчивость Chl в точке 69 °77' с.ш., 33 °61' в.д. и ее линейный и нелинейный тренды.

Уравнение нелинейного тренда: $Chl = 3 \cdot 10^{-4} x^2 + 0,0121x + 0,4884$

В результате, есть значимый, положительный нелинейный тренд для среднегодовых значений Chl.

Таб. 11 – хар-ки регрессии линейного тренда для точки №5

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,46
R-квадрат	0,22
Нормированный R-квадрат	0,19
Стандартная ошибка	0,09
Наблюдения	28

Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	1	0,05	0,05	7,17	0,01
Остаток	26	0,19	0,01		
Итого	27	0,24			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
a0	0,27	0,03	8,17
a1	0,01	0,00	2,68

N – длина ряда. Критическое значение $t_{кр}(\alpha, \nu)$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu=N-2$, где N -длина ряда.

$t_{кр}=2,05$ (по уровню значимости и числу степеней свободы)

$t^*=2,68$ (из t-статистики)

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$2,68 > 2,02$, нулевая гипотеза отвергается, коэффициент тренда значим, следовательно, линейный тренд значим.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,22$ (22%) характеризует незначительный вклад тренда в общую дисперсию ряда.

Проверка значимости коэффициентов регрессии:

Для того чтобы оценить значимость коэффициентов регрессии используют 2 гипотезы - нулевую гипотезу $H_0: a_1 = 0$ и альтернативная $H_1: a_1 \neq 0$.

Для линейного тренда $t^*(a_0) = 8,17 > t_{кр}$ значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Для линейного тренда $t^*(a_1) = 2,68 > t_{кр}$ значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии значим;

Следовательно, линейный тренд есть.

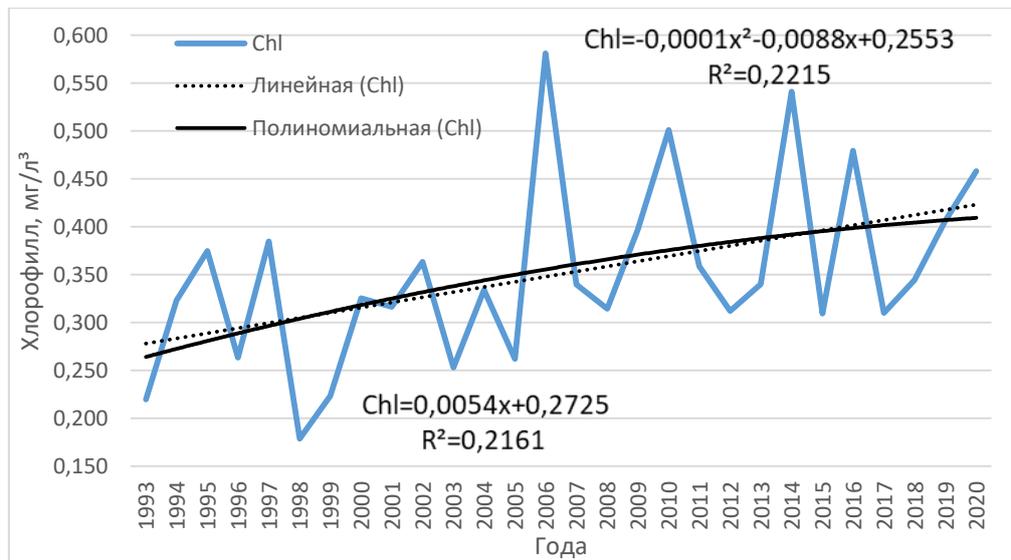


Рисунок 49 - Среднегодовая изменчивость Chl в точке 77°91' с.ш., 46°35' в.д. и ее линейный и нелинейный тренды.

Уравнение линейного тренда: $Chl = 0,0054x + 0,2725$, характер тренда положительный, т.е. Chl увеличивается.

В результате, есть значимый, положительный линейный тренд для среднегодовых значений Chl.

Гармонический анализ Фурье и спектр

В ходе работы исходный ряд среднегодовых значений был преобразован. Из ряда был удален тренд, после этого был рассчитан ряд остаточных значений. На основе полученных значений был рассчитаны спектры для рядов с использованием программы Past4, затем была построены периодограммы для ряда отклонений от тренда, а также её пики (максимумы) частоты.

Далее будут представлены гармониками на уже выбранных ранее точках (1 точка, 4 точка и 5 точка).

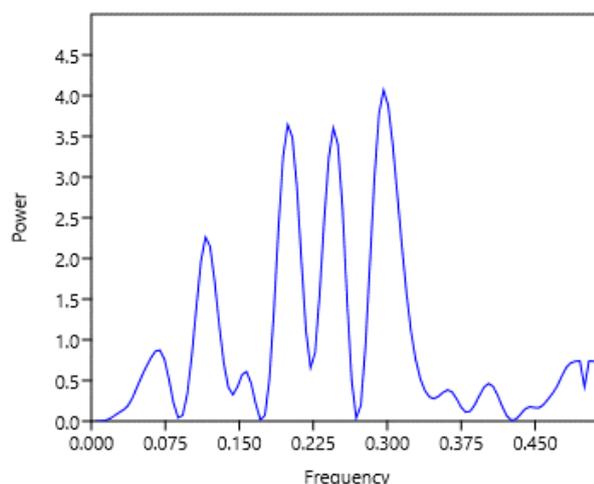


Рисунок 50 - Периодограмма ряда отклонений от среднего значения для среднегодовых значений хлорофилла «а» в точке №1

Из рисунка 50 видно 5 гармоник: первая гармоника с пиком на частоте равной 0,07 (1/год), вторая гармоника с пиком на частоте равной 0,12 (1/год), третья гармоника с пиком на частоте равной 0,20 (1/год), четвертая гармоника с пиком на частоте равной 0,25 (1/год), пятая гармоника с пиком на частоте равной 0,30 (1/год).

Заполняем таблицу.

Таб.12- Параметры гармоник для среднегодовых значений в точке №1

Параметры гармоник	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3	Гармоника 4	Гармоника 5
Частота, 1/год	0,07	0,12	0,20	0,25	0,30
Период, год	14,40	8,64	5,02	4,08	3,37
Частота, рад/год	0,44	0,73	1,25	1,54	1,86
К-т Фурье ak	0,05	0,02	-0,10	-0,10	0,09
К-т Фурье bk	0,01	-0,08	-0,05	0,04	0,07
A, мг/м ³	0,05	0,08	0,11	0,11	0,11
Фаза, рад	1,42	2,86	4,23	-1,20	0,89
Фаза, год	3,25	3,93	3,39	-0,78	0,48
Дисперсия гармоник, мг/м ³	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Дисперсия исх. ряда, мг/м ³	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Вклад гармоник в ряд откл от ТПО	0,07	0,16	0,27	0,27	0,30
t*- критерий Стьюдента оценки значимости вклада гармоник	1,36	2,35	3,63	3,63	3,89
σ	0,18	0,17	0,14	0,14	0,14

Далее, проверка значимости гармоник:

$$t_{кр}=2,06$$

$$t^* =1,36$$

$$t^* =2,35$$

$$t^* =3,63$$

$$t^* =3,63$$

$$t^* =3,89$$

Сравниваем t^* и $t_{кр}$

Для первой гармоники $R^2=0,07$, а $r=0,25$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,18$.

$1,36 > 2,06$, нулевая гипотеза принимается, следовательно, гармоника не значима, гармоники нет.

Для второй гармоники $R^2=0,16$, а $r=0,39$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,17$.

$2,35 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима.

Для третьей гармоники $R^2=0,27$, а $r=0,52$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,14$.

$3,63 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима.

Для четвертой гармоники $R^2=0,27$, а $r=0,52$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,14$.

$3,63 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима.

Для пятой гармоники $R^2=0,30$, а $r=0,54$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,14$.

$3,89 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима.

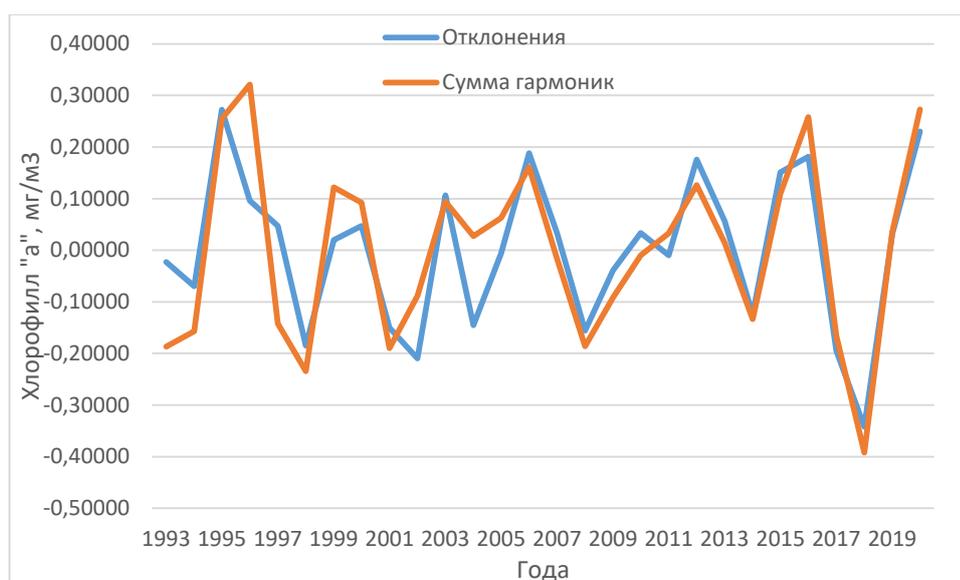


Рисунок 51- Совмещенный график фактических и восстановленных значений хлорофилла «а» в точке №1

Первой гармоники нет.

Вторая гармоника с периодом 8,6 лет, с амплитудой равной 0,08 мг/м³ имеет вклад в дисперсию 16%;

Третья гармоника с периодом 5 лет, с амплитудой равной 0,11 мг/м³ имеет вклад в дисперсию 27%;

Четвертая гармоника с периодом 4,8 лет, с амплитудой равной 0,11 мг/м³ имеет вклад в дисперсию 27%;

Пятая гармоника с периодом 3,3 года, с амплитудой равной 0,11 мг/м³ имеет вклад в дисперсию 30%.

Наибольший вклад вносит пятая гармоника, наименьший вклад вносит вторая гармоника.

Суммарный вклад всех гармоник составляет 100%.

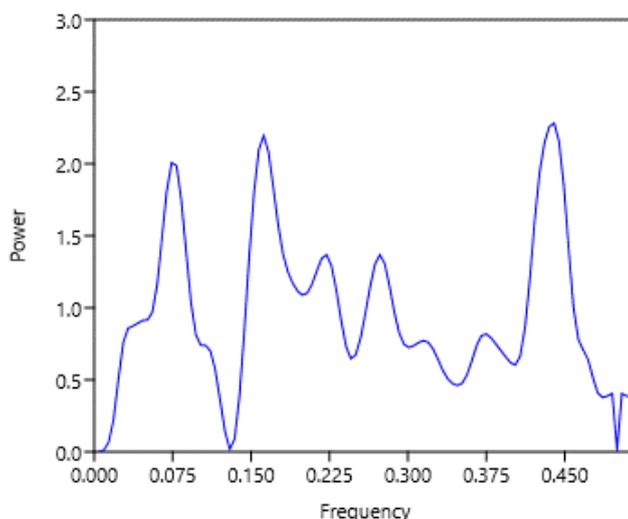


Рисунок 52 - Периодограмма ряда отклонений от среднего значения для среднегодовых значений хлорофилла «а» в точке №4

Из рисунка 52 видно 6 гармоник: первая гармоника с пиком на частоте равной 0,07 (1/год), вторая гармоника с пиком на частоте равной 0,16 (1/год), третья гармоника с пиком на частоте равной 0,22 (1/год), четвертая гармоника с пиком на частоте равной 0,27 (1/год), пятая гармоника с пиком на частоте равной 0,38 (1/год), шестая гармоника с пиком на частоте равной 0,44 (1/год).

Также заполняем таблицу.

Таб.13- Параметры гармоник для среднегодовых значений в точке №4

Параметры гармоник	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3	Гармоника 4	Гармоника 5	Гармоника 6
Частота, 1/год	0,07	0,16	0,22	0,27	0,38	0,44
Период, год	13,50	6,17	4,50	3,66	2,67	2,27
Частота, рад/год	0,47	1,02	1,40	1,72	2,36	2,76
К-т Фурье ak	0,04	0,04	0,01	0,00	-0,02	0,04
К-т Фурье bk	0,00	0,00	0,03	-0,03	-0,01	-0,01
A, мг/м ³	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,04
Фаза, рад	1,44	1,58	3,36	-0,07	1,21	1,83
Фаза, год	3,10	1,55	2,41	-0,04	0,51	0,66
Дисперсия гармоника, мг/м ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Дисперсия исх. ряда, мг/м ³	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Вклад гармоника в ряд откл от ТПО	0,15	0,16	0,10	0,10	0,06	0,18
t*- критерий Стьюдента оценки значимости вклада гармоника	2,26	2,43	1,75	1,75	1,30	2,60
σ	0,17	0,16	0,18	0,18	0,18	0,16

Далее, проверка значимости гармоник:

$$t_{кр}=2,06$$

$$t^* =2,26$$

$$t^* =2,43$$

$$t^* =1,75$$

$$t^* =1,75$$

$$t^* =1,30$$

$$t^* =2,60$$

Сравниваем t^* и $t_{кр}$

Для первой гармоника $R^2=0,15$, а $r=0,38$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,17$.

$2,26 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима.

Для второй гармоника $R^2=0,16$, а $r=0,40$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,16$.

$2,43 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима.

Для третьей гармоники $R^2 = 0,10$, а $r = 0,31$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,18$.

$1,75 < 2,06$, нулевая гипотеза принимается, следовательно, гармоника не значима, гармоники нет.

Для четвертой гармоники $R^2 = 0,10$, а $r = 0,31$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,18$.

$1,75 < 2,06$, нулевая гипотеза принимается, следовательно, гармоника не значима, гармоники нет.

Для пятой гармоники $R^2 = 0,06$, а $r = 0,24$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,18$.

$1,30 < 2,06$, нулевая гипотеза принимается, следовательно, гармоника не значима, гармоники нет.

Для шестой гармоники $R^2 = 0,18$, а $r = 0,42$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,16$.

$3,89 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима.



Рисунок 53- Совмещенный график фактических и восстановленных значений хлорофилла «а» в точке №4

Первой гармоники с периодом 13,5 лет, с амплитудой равной $0,04 \text{ мг/м}^3$ имеет вклад в дисперсию 15%;

Вторая гармоника с периодом 6,2 года, с амплитудой равной $0,04 \text{ мг/м}^3$ имеет вклад в дисперсию 16%;

Третьей гармоники нет.

Четвертой гармоникой нет.

Пятой гармоникой нет.

Шестая гармоника с периодом 2,3 года, с амплитудой равной 0,04 мг/м³ имеет вклад в дисперсию 18%.

Наибольший вклад вносит шестая гармоника, наименьший вклад вносит первая гармоника.

Суммарный вклад всех гармоник составляет 49%.

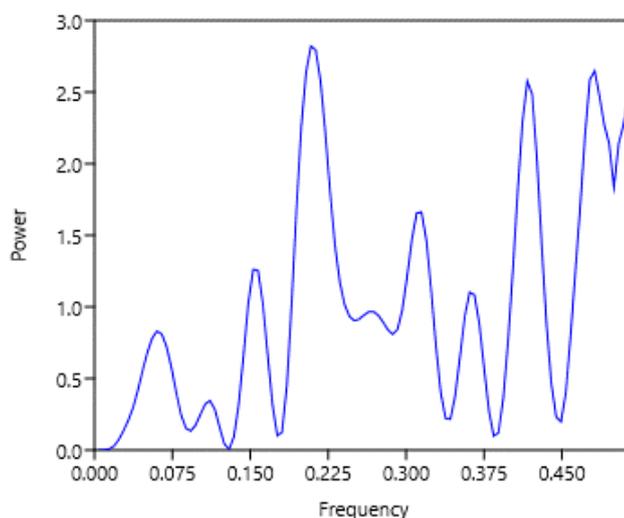


Рисунок 54 - Периодограмма ряда отклонений от среднего значения для среднегодовых значений хлорофилла «а» в точке №5

Из рисунка 54 видно 7 гармоник: первая гармоника с пиком на частоте равной 0,06 (1/год), вторая гармоника с пиком на частоте равной 0,15 (1/год), третья гармоника с пиком на частоте равной 0,21 (1/год), четвертая гармоника с пиком на частоте равной 0,31 (1/год), пятая гармоника с пиком на частоте равной 0,36 (1/год), шестая гармоника с пиком на частоте равной 0,42 (1/год), седьмая гармоника с пиком на частоте равной 0,48 (1/год).

Аналогично заполняем таблицу.

Таб.14- Параметры гармоник для среднегодовых значений в точке №5

Параметры гармоник	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3	Гармоника 4	Гармоника 5	Гармоника 6	Гармоника 7

Частота, 1/год	0,06	0,15	0,21	0,31	0,36	0,42	0,48
Период, год	16,62	6,55	4,80	3,22	2,77	2,37	2,08
Частота, рад/год	0,38	0,96	1,31	1,95	2,27	2,65	3,02
К-т Фурье ak	0,00	0,01	-0,05	-0,01	-0,02	0,03	-0,04
К-т Фурье bk	0,03	-0,03	0,02	-0,04	0,03	0,04	-0,03
A, мг/м ³	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03	0,05	0,05
Фаза, рад	0,01	-0,37	-1,23	0,33	-0,69	0,59	3,97
Фаза, год	0,02	-0,39	-0,94	0,17	-0,31	0,22	1,31
Дисперсия гармоника, мг/м ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Дисперсия исх. ряда, мг/м ³	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Вклад гармоника в ряд откл от ТПО	0,06	0,09	0,21	0,12	0,08	0,17	0,19
t*- критерий Стьюдента оценки значимости вклада гармоника	1,30	1,68	2,88	1,96	1,55	2,51	2,69
σ	0,18	0,18	0,16	0,17	0,18	0,16	0,16

Далее, проверка значимости гармоник:

$$t_{кр}=2,06$$

$$t^* = 1,30$$

$$t^* = 1,68$$

$$t^* = 2,88$$

$$t^* = 1,96$$

$$t^* = 1,55$$

$$t^* = 2,51$$

$$t^* = 2,69$$

Сравниваем t^* и $t_{кр}$

Для первой гармоника $R^2=0,06$, а $r=0,24$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,18$.

$1,30 < 2,06$, нулевая гипотеза принимается, следовательно, гармоника не значима, гармоника нет;

Для второй гармоника $R^2=0,09$, а $r=0,30$, отсюда рассчитана $\sigma_r=0,18$.

$1,68 < 2,06$, нулевая гипотеза принимается, следовательно, гармоника не значима, гармоники нет;

Для третьей гармоники $R^2 = 0,21$, а $r = 0,45$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,16$.

$2,88 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима;

Для четвертой гармоники $R^2 = 0,12$, а $r = 0,34$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,17$.

$1,96 < 2,06$, нулевая гипотеза принимается, следовательно, гармоника не значима, гармоники нет;

Для пятой гармоники $R^2 = 0,08$, а $r = 0,28$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,18$.

$1,55 < 2,06$, нулевая гипотеза принимается, следовательно, гармоника не значима, гармоники нет;

Для шестой гармоники $R^2 = 0,17$, а $r = 0,41$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,16$.

$2,51 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима;

Для седьмой гармоники $R^2 = 0,19$, а $r = 0,43$, отсюда рассчитана $\sigma_r = 0,16$.

$2,69 > 2,06$, нулевая гипотеза отклоняется, следовательно, гармоника значима.



Рисунок 55- Совмещенный график фактических и восстановленных значений хлорофилла «а» в точке №5

Первой гармоники нет;

Второй гармоники;

Третья гармоника с периодом 4,8 лет, с амплитудой равной 0,05 мг/м³ имеет вклад в дисперсию 21%;

Четвертой гармонике нет;

Пятой гармонике нет;

Шестая гармоника с периодом 2,3 года, с амплитудой равной 0,05 мг/м³ имеет вклад в дисперсию 17%;

Седьмая гармоника с периодом 2,1 год, с амплитудой равной 0,05 мг/м³ имеет вклад в дисперсию 19%.

Наибольший вклад вносит третья гармоника, наименьший вклад вносит шестая гармоника.

Суммарный вклад всех гармоник составляет 57%.

Множественная линейная регрессия

Любая физическая характеристика связана не с одной, а с несколькими другими физическими характеристиками. Чтобы определить эту связь, можно использовать множественную линейную регрессию. Ряд данных с 1993 по 2020 гг. был обрезан с 2002 по 2020 гг., так как данные о температуре начали появляться именно в этот временной промежуток.

Таким образом, мы имеем полные данные о температуре только с 2002 года. Важно отметить, что данные за этот период позволяют провести анализ изменений климата и выявить тенденции в поведении температурного показателя.

Далее будет рассмотрен анализ ранее выбранных точек.

Таб.15- хар-ки множественной регрессии для точки №1

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,84
R-квадрат	0,71
Нормированный R-квадрат	0,70
Стандартная ошибка	0,62
Наблюдения	336

Дисперсионный анализ					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	4,00	306,58	76,64	198,48	0,00
Остаток	331,00	127,82	0,39		

Итого	335,00	434,40		
-------	--------	--------	--	--

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
Chl	2,97	0,57	5,24	0,00
O2	0,00	0,00	-3,73	0,00
NO3	0,24	0,02	11,90	0,00
Si	-0,02	0,01	-2,09	0,04
PO4	-8,54	0,42	-20,40	0,00

Потом воспользовавшись пошаговой регрессией и исключая переменные (одна за другой), были рассчитаны остальные модели множественной линейной регрессии и их параметры.

Таб.16- хар-ки моделей множественной линейной регрессии. Синенькое – хар-ки, которые имеют хорошее кач-во модели.

Шаг модели	Кол-во независимых переменных	t*min	tкр	F*	Fкр	R^2	σe	σy	Переменные
1	6	1,90	1,97	198,48	2,13	0,71	0,62	1,45	O2, NO3, Si, PO4, T, S
2	5	2,09	1,97	198,48	2,13	0,71	0,62	1,45	O2, NO3, Si, PO4, T
3	4	3,22	1,97	260,56	2,13	0,70	0,62	1,45	O2, NO3, PO4, T
4	3	12,71	1,97	375,12	2,13	0,69	0,63	1,45	NO3, PO4, T
5	2	20,95	1,97	375,12	2,13	0,69	0,63	1,45	NO3, PO4
6	1	11,61	1,97	134,69	2,13	0,29	0,96	1,45	PO4

Заметно, что при уменьшении переменных, уменьшается коэффициент детерминации, а также увеличивается критерий Стьюдента t*.

Из этой таблицы видно, что есть 5 качественных моделей, определен оптимальный шаг – 2;

Таб.17- хар-ки множественной регрессии для точки №1 при шаге 2

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,84
R-квадрат	0,71
Нормированный R-квадрат	0,70
Стандартная ошибка	0,62
Наблюдения	336

Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	4	306,58	76,64	198,48	0,00
Остаток	331	127,82	0,39		
Итого	335	434,40			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
--	--------------	--------------------	--------------	------------

Chl	2,97	0,57	5,24	0,00
O2	0,00	0,00	-3,73	0,00
NO3	0,24	0,02	11,90	0,00
Si	-0,02	0,01	-2,09	0,04
PO4	-8,54	0,42	-20,40	0,00
T	0,20	0,02	12,71	0,00

Модель считается качественной (оптимальной), если выполняются следующие условия:

- 1) Все коэффициенты регрессии значимы.
- 2) Коэффициент детерминации больше 0,70. Это свидетельствует о том, что независимых переменных достаточно для описания дисперсии исходного ряда.
- 3) Модель должна быть адекватна.
- 4) Стандартная ошибка модели должна быть меньше стандартного отклонения ряда зависимой переменной.

Проверяем:

1. Оценка значимости коэффициентов регрессии

Для того чтобы оценить значимость коэффициентов регрессии используют 2 гипотезы - нулевую гипотезу H_0 ; альтернативную H_1 :

Таб.18- оценка значимости коэф. регрессии

$H_0: a=0$	$H_1: a \neq 0$	t^*	$t_{кр}$	$t^* > t_{кр}$
$H_0: b=0$	$H_1: b \neq 0$	$t^*_{a1} = 3,73$	1,97	$3,73 > 1,97$
		$t^*_{a2} = 11,90$		$11,90 > 1,97$
		$t^*_{a3} = 2,09$		$2,09 > 1,97$
		$t^*b = 5,24$		$5,24 > 1,97$

$t^* > t_{кр}$, нулевая гипотеза отвергается, соответствующие коэффициенты регрессии значимы.

2. Оценка адекватности модели по критерию Фишера

Для того, чтобы оценить адекватность модели нужно использовать 2 гипотезы - нулевую гипотезу H_0 ; альтернативную H_1 :

Таб.19-оценка адекватности модели

$H_0: D_y = D_\sigma$	$H_1: D_y \neq D_\sigma$	F^*	$F_{кр}$	$F^* > F_{кр}$
		198,48	2,13	$198,48 > 2,13$

198,48 > 2,13 нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, значит модель адекватная.

3. Коэффициент детерминации $r^2 = 0,71$. Это значит, что моделью описывается 71% дисперсии исходного ряда и это свидетельствует о том, что данных по гидрометеорологическим характеристикам достаточно для описания изменчивости Chl.

4. Стандартная ошибка модели $\sigma_\varepsilon = 0,62 \text{ мг/м}^3$.

Отсюда следует, что все условия выполняются, можно сказать, что модель качественна.

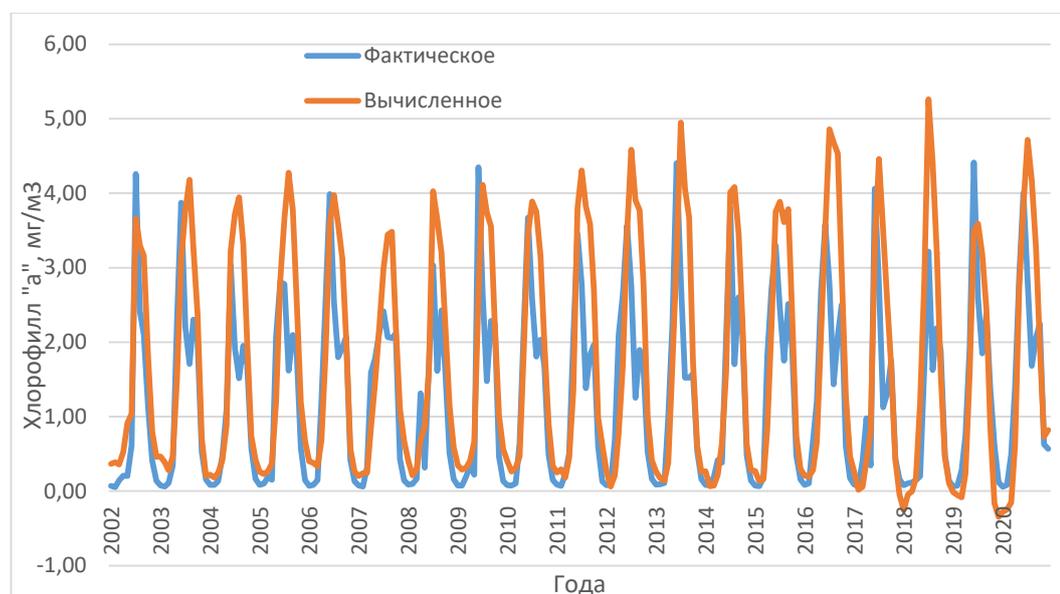


Рисунок 56- Фактические и рассчитанные среднеемесячные значения Chl в точке №1.

Для среднеемесячных рядов было получено уравнение регрессии:

$$\text{Chl} = 0,004\text{O}_2 - 0,237\text{NO}_3 - 0,020\text{Si} - 0,8544\text{PO}_4 + 0,202\text{T} + 2,969 + \varepsilon$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 5% все коэффициенты оказались значимыми ($t_{a1}^* = 3,73$, $t_{a2}^* = 11,90$, $t_{a3}^* = 2,09$, $t_b^* = 5,24$; $t_{кр} = 1,97$).

Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 71% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о независимых переменных достаточно для описания изменчивости Chl

(зависимой переменной). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=198,48$ при $F_{кр}=2,13$).

Стандартная ошибка модели σ_ε составила $0,62 \text{ мг/м}^3$, что меньше, чем стандартное отклонение ряда Chl ($\sigma_\varepsilon = 1,14 \text{ мг/м}^3$ (из описательной статистики среднемесячного ряда Chl).

Таким образом, полученная модель линейной регрессии имеет хорошее качество.

Заключение

Проведённый анализ позволил выявить определённые закономерности и в характере сезонной изменчивости концентрации хлорофилла «а»: диатомовые водоросли достигают пика в мае и июне, а затем уступают место кокколитофоридам, «цветение» которых фиксируется по изображениям спутниковых сканеров цвета. В ходе анализа литературных источников было обнаружено, что именно в этот период некоторые питательные вещества (минеральные формы азота и фосфора) заканчиваются, а воды становятся более теплыми и слоистыми (стратифицированными). Эти условия идеально подходят для того, чтобы кокколитофорида доминировали в поверхностных водах Баренцева моря. «Цветение» этого вида фитопланктона представляет значительный интерес для изучения цикла углерода в толще моря в соответствующих районах.

Анализ данных по точкам показал, что второй пик цветения (август) наиболее выражен для точки 3 и 5. А вот данные по точкам 1, 2 и 4 показали два пика цветения -весенний (апрель-май) и осенний (август-октябрь) периоды.

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Анализ спутниковых данных MODIS-Aqua/Terra позволил выявить следующие закономерности в характере сезонной изменчивости концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте прибрежной зоны Баренцева моря:

- Весеннее цветение начинается в середине апреля – середине мая, и его интенсивность может значительно отличаться от года к году. Обычно цветение продолжается 3-4 недели, и за ним следует уменьшение биомассы фитопланктона. Преимущественно это связано с исчерпанием питательных веществ.

- Весеннее цветение в акватории с атлантическими водами (не имеющими ледового покрова) вызывается перепадом температур, в то время как в арктических, более холодных водных (имеющих сезонный ледовый покров) цветение определяется таянием льда.

2. Годовой ход концентрации хлорофилла «а», полученный по спутниковым данным MODIS, полностью согласуется с классической картиной сезонной динамики биомассы фитопланктона в Баренцевом море: диатомовые водоросли достигают пика в мае и июне, а затем уступают место кокколитофорам, поскольку питательные вещества заканчиваются, а воды становятся более теплыми и слоистыми (стратифицированными). Покрытое льдом большую часть года, мелководное Баренцево море достигает своей максимальной температуры поверхности (около 6,6 °С) в августе, когда ледяной покров минимален, а вода наиболее пресная (менее соленая из-за таяния льда и речного стока) и наиболее истощена питательными веществами. В ходе исследования было обнаружено, что эти условия идеально подходят для того, чтобы кокколитофоры доминировали в поверхностных водах.

3. Влияние на распределение концентрации хлорофилла «а» в прибрежных зонах Баренцева моря оказывают два основных источника выноса высокопродуктивных вод: северный шельф острова Колгуев и восточная часть Печорского моря в районе пролива Карские ворота.

Изучение сезонных изменений в концентрации хлорофилла «а» в Баренцевом море позволяет лучше понять динамику фитопланктона и его влияние на экосистему моря. Учитывая изменения в концентрации хлорофилла, можно предсказать сезонные изменения в биологическом разнообразии и продуктивности морской жизни, что важно для управления ресурсами и охраны окружающей среды.

Исследования также показывают важность регулярного мониторинга концентрации хлорофилла «а» с использованием спутниковых данных для выявления долгосрочных тенденций изменений в экосистеме Баренцева моря. Это позволяет рано обнаруживать возможные изменения в природных процессах и принимать меры по их управлению.

В целом, результаты исследований подтверждают важность изучения сезонной динамики концентрации хлорофилла «а» в Баренцевом море для понимания и предсказания изменений в экосистеме и биоразнообразии. Дальнейшие исследования и мониторинг необходимы для более глубокого анализа и установления причин этих изменений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алекин О.А. Химия океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. 232 с
2. Гительзон И.И., Чепилов В.В. Изучение водных экосистем дистанционными оптическими методами // Методические основы комплексного экологического мониторинга океана. М.: Гидрометеиздат, 1988. С. 230–259.
3. Баканев С.В., Золотарев П.Н. Исландский гребешок // Состояние биологических сырьевых ресурсов Баренцева моря и Северной Атлантики в 2012 г. Мурманск: ПИНРО, 2012. С. 46–47.
4. Ведерников В.И., Гагарин В.И. Первичная продукция и хлорофилл в Баренцевом море в сентябре–октябре 1997 г. // Океанология. 1998. Т. 38. № 5. С. 693–703.
5. Межуниверситетский аэрокосмический центр при Географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. Космические исследования океана [Электронный ресурс]// Режим доступа: http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acentre/int_sem7/2.1%20Giovanni.htm
6. Спутник Terra, Aqua/ MODIS. [Электронный ресурс]// Режим доступа: <https://www.scanex.ru/data/satellites/terra-aqua-modis/>
7. Алекин О.А. Химия океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. 232 с.
8. Первичная продукция фитопланктона и сообщества донных продуцентов Баренцева моря [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://vniro.ru/files/trydi_vniro/archive/152_11.pdf
9. Пространственное распределение фитопланктона Мурманского побережья Баренцева моря в осенний период [Электронный ресурс]// Режим доступа: http://vestnik.mstu.edu.ru/v15_4_n50/838_844_tyuki.pdf
10. Биологический атлас морей [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://epic.awi.de/id/eprint/34319/26/bio-atlas-barents-kara_2000_ru.pdf

11. Буренков В. И., Копелевич О. В., Ратькова Т. Н. и др. Цветение кокколитофорид в Баренцевом море – спутниковые и судовые наблюдения // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 1-9.
12. Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Вазюля С. В. и др. Сравнительные оценки характеристик кокколитофоридных цветений в Баренцевом и Черном морях по данным спутниковых сканеров цвета // Труды международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». 2015. Т. 8. С. 31-35.
13. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. – 408с.
14. Гительзон И.И., Чепилов В.В. Изучение водных экосистем дистанционными оптическими методами // Методические основы комплексного экологического мониторинга океана. М.: Гидрометеоиздат, 1988. С. 230–259.
15. Schuckmann K., Traon P.-Y. L., Alvarez-Fanjul E. et al. The Copernicus Marine Environment Monitoring Service Ocean State Report // Journal of Operational Oceanography. 2016. 9:sup 2. P. 235–320.
16. Мордасова Н.В. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла// Труды ВНИРО, 2014, Т 152, с. 41-56.