



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

Кафедра прикладной и системной экологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Оценка биопродуктивности Арктических морей по концентрации хлорофилла "а" и структурным показателям фитопланктона

Исполнитель Швед Яна Валерьевна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат биологических наук

(ученая степень, ученое звание)

Воякина Екатерина Юрьевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Алексеев Денис Константинович

(фамилия, имя, отчество)

«29» 06 2022.

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

Введение	3
1 Литературный обзор.....	6
1.1 Спутниковый мониторинг	7
1.2 Биологическая составляющая.....	8
1.3 Набор используемых каналов	10
1.4 Проблемы спутникового мониторинга	11
1.5 Атмосферная коррекция	12
1.6 Трофический статус водоема.....	15
1.7 Факторы, влияющие на распространение фитопланктона.....	20
2 Физико-географическое описание региона исследования	25
2.1 Баренцево море.....	25
2.2 Карское море.....	28
2.3 Море Лаптевых.....	32
2.4 Восточно-Сибирское море	36
2.5 Берингово море.....	40
3 Материалы и методы.....	45
3.1 Данные дистанционного зондирования Земли	45
3.2 Натурные данные	47
3.3 Статистические методы	48
4 Результаты и обсуждения спутниковой части работы	48
4.1 Пространственное распределение хлорофилла «а» по натурным и спутниковым данным	48
4.2 Диаграмма рассеяния	54
4.3 Временной график изменчивости.....	57
4.4 Метод НСР	60
4.5 Влияние облачности.....	62

5 Биопродуктивность морей	67
5.1 Видовое разнообразие	67
5.2 Биомасса фитопланктона	71
6 Заключение	77
6.1 Выводы по спутниковой части	77
6.2 Выводы о биопродуктивности морей.....	77
Список литературы	79
Приложение А	86
Приложение Б.....	88

Введение

Вода является важнейшим природным источником как для человека, так и окружающей среды. В условиях изменения каких-либо абиотических, биотических и антропогенных факторов очень важно иметь представления о том, как эти изменения влияют на водоем. Ежегодный мониторинг, несомненно, справляется с этой задачей.

Биопродуктивность водоема, представляется одним из важнейших показателей состояния акватории. Избыток или недостаток биогенных элементов может привести к негативным последствиям, которые будут отражаться не только на окружающей среде, но и на человеке. Следовательно, особой важностью обладает информация о каком-либо неблагоприятном состоянии водоема, полученная и проанализированная вовремя. Именно поэтому в нынешнее время все больше стало развиваться дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), которое позволяет получить информацию об объекте без присутствия человека на месте и в срочном порядке.

Спутниковый мониторинг относится к быстро развивающимся методам оценки состояния водной среды. Важно, чтобы информация, полученная со спутников, могла в полной мере отражать ситуацию, которая происходит в действительности в исследуемой области. На сегодняшний день существуют некоторые факторы, которые искажают информацию данных видимого и ближнего ИК-диапазонов, полученную со спутников различного вида [1].

Большая доля облачности в Арктическом регионе связана с действием циклона, который приходит в основном с Атлантического океана в зимний период. Зима в Арктике начинается в конце сентября - начале октября, поэтому экспедиционные данные, полученные за этот период, имеют высокую долю облачности, в отличие от сезона «весна-лето» [2].

Из-за того, что моря занимают обширные территории, расположенные с севера на юг, климат отдельных участков морей зависит и от географической широты. Несмотря на то, Берингово море относится к Дальневосточным морям, климат северной части моря близок к арктическому, а соответственно, в данной зоне преобладает облачность. Погодные условия Чукотского моря относятся к полярному климату [3].

Функциональность спутниковых сканеров цвета в большей степени зависит от погодных условий, а именно от наличия облачности, освещенности и других атмосферных явлений.

Так же взвешенные вещества, микроводоросли (фитопланктон) существенно изменяют отражательные свойства воды, что тоже влияет на репрезентативность полученных данных.

Вещество, которое взаимодействует со светом и может влиять на видимый цвет моря, является взвешенное вещество (ВВ), которое имеет довольно нейтральное влияние на цвет, кроме случаев сильно окрашенных наносов, и случая органического растворенного вещества.

Однако, если источником ВВ или оРОВ служит не локальная популяция фитопланктона, а, например, речной сток или взмученные донные отложения, то ожидать качественных оценок концентрации хлорофилла «а» на основе простого соотношения зелёного к синему каналов сканеров цвета нельзя. В таких случаях стандартное соотношение работает плохо, если вообще даёт результаты, и тогда становится гораздо сложнее получить интересующие характеристики с помощью спутников [4].

Все эти факторы, влияющие на полученные результаты, необходимо учитывать при анализе спутниковых данных, чтобы объективно рассуждать о той или иной обстановке на акватории.

Безусловно, не все исследования можно заменить спутниками, именно поэтому оценка видового разнообразия фитопланктона и расчет биомассы должны

проводить регулярно, в рамках ежегодного мониторинга состояния водных объектов. Данные мероприятия позволяют определить доминирующие виды в акватории, выявить не были ли отмечены виды, которые раньше не встречались в данной области. Фитопланктон является важной составляющей экологической пирамиды, поэтому любые изменения могут привести к ухудшению кормовой базы, которые скажутся как на человеке, как и на последующих звеньях пищевой цепи.

Цель работы: Оценка биопродуктивности Арктических морей по концентрации хлорофилла "а" и структурным показателям фитопланктона.

Задачи работы:

1. Формирование собственного архива данных за интересующие годы.
2. Провести сравнительный анализ данных по хлорофиллу «а» полученных в ходе экспедиций и спутниковых.
3. Обработка спутниковых снимков.
4. Построение таблиц, диаграммы рассеяния, временного графика изменчивости и пространственное распределение хлорофилла «а».
5. Определить возможность использования спутниковых данных для мониторинга концентрации хлорофилла «а».
6. Обработка проб фитопланктона в указанной области.
7. Определить доминирующие виды.
8. Рассчитать биомассу фитопланктона

1 Литературный обзор

Ни для кого не секрет, что на планете наблюдается глобальное изменение климата. Больше всего данному процессу подвержены регионы с высокой долей ледяного покрова.

Ученые всего мира обеспокоены повышением температуры Земли, которая уже выросла на 1 °С за последние 140 лет, что не может не вызывать беспокойства. Если проанализировать всю историю нашей планеты, то климат менялся довольно часто, однако, не так быстро и стремительно, как в нынешнее время [5].

Повышение температуры Земли приводит к глобальным изменениям морских биотопов Северного Ледовитого океана (СЛО). Сокращение площади ледяного покрова может привести к увеличению первичной продукции. В одних частях может наблюдаться смещение сроков цветения фитопланктона, а в других структура фитопланктонного сообщества меняется в сторону более мелких видов, характерных для более олиготрофных условий. Помимо этого, некоторые виды могут и вовсе исчезнуть вследствие несоответствия привычных условий обитания. Часть видов, обитающих в более теплых водах, мигрируют в Северный Ледовитый океан, что в свою очередь может привести к массовому цветению водорослей, что, несомненно, отразится на гидробионтах, из-за работы организмов деструкторов, которые потребляют большое количество кислорода, идущее на разложение отмершего фитопланктона, что ведет к образованию зон гипоксии [6].

В условиях изменения климата, очень важно проводить ежегодный мониторинг, который позволяет отслеживать скорость и реакцию среды на эти изменения.

Также зачастую бывают обстоятельства, когда необходима быстрая реакция на какие-либо экстренные ситуации, когда требуется определить область загрязнения, масштабы, что не всегда возможно сделать на месте.

Вышеуказанные обстоятельства побудили людей начать активное использование спутников, с помощью которых, возможен автономный мониторинг Земли из космоса, быстрое реагирование на различные загрязнения, наблюдения за массовым цветением водорослей и т.д.

Спутниковое дистанционное зондирование позволяет нам собирать данные и информацию о земной поверхности, океанах и атмосфере в нескольких пространственно-временных масштабах своевременно, регулярно и точно. Спутниковые данные помогают нам понять климатическую систему и определить пути смягчения последствий изменения климата. Различные организации, такие как NASA, NOAA и ESA, используют спутниковые данные для мониторинга концентрации парниковых газов в атмосфере, погодных условий, состояния растительности, таяния ледников и полярных льдов, обесцвечивания коралловых рифов, закисления океана, изменений в миграции диких животных и многих других показателей окружающей среды. Спутники не только следят за состоянием глобальной окружающей среды, их технологические инновации, такие как миниатюризация датчиков, высокоскоростная передача данных и увеличение объема памяти, произвели революцию в климатологии. Вот несколько примеров, иллюстрирующих это.

С помощью спутникового мониторинга можно исследовать такие проблемы как вырубка леса, таяние ледников, отбеливание коралловых рифов, загрязнение океана, опустынивание и т.д [7].

1.1 Спутниковый мониторинг

Вода является важнейшим природным источником для человека и окружающей среды.

Для сохранения источников воды эффективным способом является их мониторинг с использованием данных не только полученных *in situ*, но технологий дистанционного зондирования [8].

Спутники, снимающие большие территории с высоким пространственным и временным разрешением, позволяют проводить обширный анализ водных объектов и, таким образом, представляют собой идеальное дополнение к существующим точечным измерениям *in situ* [9].

Однако, не всегда есть возможность воспользоваться технологиями спутникового мониторинга. Облака и тени представляют собой серьезное препятствие для обработки оптических и инфракрасных изображений дистанционного наземного контроля и их различного применения [10].

1.2 Биологическая составляющая

Водоросли - это микроскопические фитопланктонные организмы, которые осуществляют фотосинтез и таким образом образуют основу водных пищевых цепей. Поскольку нехватка и переизбыток свободно плавающих водорослей (называемых также фитопланктоном) может нанести ущерб экосистеме.

Переизбыток фитопланктона и его последующее разложение влияют на водную биоту различными способами, такими как, блокирование попадания солнечного света в нижние слои воды и, таким образом, лишение подводную жизнь столь необходимой солнечной радиации, вызывая сильное истощение растворенного кислорода в воде, а также выработка токсинов, которые смертельно влияют на водную жизнь и вызывают ряд заболеваний, таких как респираторные и кожные заболевания у людей.

Внутренние, эстуарные и прибрежные водоемы, которые в основном мутные и продуктивны, являются домом для широкого разнообразия флоры и фауны,

которые имеют решающее значение не только для поддержания глобального биоразнообразия, но и для обеспечения биотических ресурсов, которые являются необходимыми для пропитания человека. Помимо того, что они являются резервуаром биоразнообразия, внутренние, эстуарные и прибрежные воды также служат ценными ресурсами для туризма, транспорта, энергоснабжения и отдыха. Конкретные примеры ущерба, причиненного вредоносное цветение водорослей людям, флоре и фауне экосистемы, очень хорошо задокументированы в литературе, и, разумеется, необходимость прогнозирования, раннего обнаружения и количественной оценки такого цветения водорослей имеет первостепенное значение.

Несмотря на то, что мониторинг водных экосистем можно осуществлять посредством лабораторного анализа проб воды, взятых из водоемов, это чрезвычайно утомительно и практически невозможно делать на частой основе в большой экосистеме. Многовременной охват и синоптический вид, предлагаемыми данными дистанционного зондирования, делают спутниковый мониторинг подходящим инструментом для этой цели.

Дистанционное зондирование первоначально было выбрано учеными, изучающими водные ресурсы, в качестве инструмента для обнаружения цветения водорослей. С доказанным успехом в области обнаружения, которому способствовали улучшенное пространственное и спектральное разрешение, предлагаемое датчиками, и улучшенное понимание биофизических свойств водных объектов. Ученые продвигают данную технологию, чтобы использовать ее в качестве инструмента для получения количественной оценки качества воды путем оценки концентраций различных водорослевых пигментов, которые могут быть использованы в качестве индикаторов биофизического состояния водоемов. В то время как точное определение биомассы водорослей оказалось достижимым без особых трудностей, оценка концентрации пигмента оказалась более сложной[11].

Хлорофилл-а (хл-А) - это зеленый пигмент, содержащийся в фитопланктоне. Концентрация хл-А в воде является ключевым показателем биомассы фитопланктона. Оценка концентрации хл-А с помощью дистанционного зондирования основана на влиянии хл-А на оптические свойства воды (которые определяют, как вода реагирует на падающий свет) и выполняется путем прямого или косвенного измерения этих оптических свойств.

Хлорофилл-а - это фотоактивный пигмент, который вызывает отчетливые изменения в цвете воды путем поглощения и рассеивания света, падающего на воду, на определенных длинах волн.

Простота этой процедуры зависит от оптических характеристик водоема. В глубоких океанических водах фитопланктон обычно является преобладающим компонентом и концентрации других компонентов изменяются вместе с концентрацией хл-А. Таким образом, в оптических свойствах этих вод доминирует фитопланктон, и наблюдаемые спектральные особенности в отраженном свете могут быть напрямую связаны с концентрацией хл-А.

Хл-а в основном отвечает за сильное поглощение в синей области и пик отражения в зеленой части спектра отражения вод.

Когда концентрация хл-а значительно высока, как это бывает в мутных продуктивных водах, наблюдается заметная длина в красной области спектра отражения, вызванная сильным поглощением хл-а. Также имеется пик отражения в ближней инфракрасной области (БИК) около 700 нм вызванный комбинацией уменьшающегося поглощения хл-а и увеличением поглощения водой [12].

1.3 Набор используемых каналов

Для получения снимков, на которых будет хорошо видна растительность, мутность, заиление, необходимо использовать определенный набор спектральных каналов.

Лучше всего для этих целей подходит комбинация 4-3-2 «естественный цвет» и 5-4-3 «искусственный цвет»

Комбинация «естественный цвет» используется для каналов видимого диапазона, именно поэтому при обработке снимков с помощью данной комбинации изображения с объектами земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом.

Такой набор каналов представляет возможность изучать и анализировать состояние водных объектов, так как информация на снимках понятна для понимания (здоровая растительность выглядит зеленой, нездоровая - коричневой, желтой).

Набор каналов «искусственного цвета» также очень полезен для обработки спутниковых снимков, так как благодаря насыщенным оттенкам красного хорошо выделяется здоровая растительность и в принципе данная комбинация хорошо подходит для изучения состояния растительного покрова как на суше, так и в воде [13].

1.4 Проблемы спутникового мониторинга

Получение информации со спутников осуществляется с помощью датчиков, которые бывают пассивными и активными. Следует добавить, что пассивные датчики улавливают отраженное естественное излучение, к ним относятся оптические и сканирующие устройства, которые действуют в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, а активные способны сами излучать нужный сигнал и фиксировать его отражение от объекта (радарные устройства, сканирующие лазеры) [14].

Основной проблемой ДЗЗ видимого и ближнего ИК-диапазонов являются атмосферные помехи, которые сокращают количество и качество данных.

Свет должен проходить через атмосферу Земли дважды (солнце-поверхность и поверхность-датчик), прежде чем он будет зафиксирован

спутниковым датчиком и, таким образом, неизбежно подвержен атмосферным помехам в виде поглощения и рассеяния света атмосферными газами и частицами.

Также следует сказать, что наличие облачности является серьезной проблемой при получении спутниковых данных.

Таким образом, необходимо сначала устранить атмосферное влияние на данные дистанционного зондирования, прежде чем любой спектральный анализ может быть выполнен для количественной оценки биофизических параметров в воде.

Атмосферная коррекция является одним из основных методов устранения влияния атмосферных явлений, света и иных факторов на отражение земли, а также получения реальных физических параметров (температура поверхности, концентрация хл-А) [15].

1.5 Атмосферная коррекция

Перед тем как пользователь получит готовые данные со спутника, они проходят предварительную обработку- атмосферную коррекцию. Сам процесс коррекции больших объемов данных практически полностью автоматизирован, для коррекции используются алгоритмы, которые рассчитываются исходя из усредненных показателей, которые не учитывают особенности снимка, что конечно же влияет на качество конкретного изображения.

Как уже было сказано выше, основная проблема при использовании космических снимков, это облачность. Следует сказать, что ряд программ по обработке ДЗЗ сравнительно успешно справляются с уменьшением влияния облачности на спутниковых изображениях [16].

Атмосфера влияет на пространственное и спектральное распределение электромагнитного излучения, исходящего от солнца, прежде чем оно достигнет земной поверхности, а также ослабляет отраженную энергию, регистрируемую

спутниковым датчиком. Поглощение газа, рассеяние молекул и аэрозолей являются примерами атмосферных процессов, которые влияют на падающее и отраженное излучение. Знание этих процессов, которые не являются постоянными во времени, должно быть использовано для корректировки показаний спутниковых датчиков.

Таким образом, количество отраженной энергии, зарегистрированное датчиком, должно быть обработано, чтобы отделить атмосферные возмущения от фактического отраженного излучения, которое было испущено от объектов на поверхности Земли. Этот шаг может быть необходим не всегда, так как он зависит от целевого использования спутникового снимка. Атмосферная коррекция изображения требует информации об атмосферных условиях, существующих во времени /периоде получения изображения.

В процессе атмосферной коррекции значения пикселей изображения (т.е. известные как цифровые номера - DN) преобразуются в физически интерпретируемую меру, которую часто называют и интерпретируют как отражательную способность поверхности. Такое преобразование обычно включает два этапа. Первый - радиометрическая калибровка, которая включает (а) преобразование DN в светимость, а затем (б) в светимость верхней части атмосферы. Полученные значения можно интерпретировать как светимость, наблюдаемую непосредственно за пределами земной атмосферы; их получение из номеров DN обычно может быть выполнено только с помощью метаданных, поставляемых вместе с изображением. Сияние- это количество излучения, поэтому оно является абсолютной величиной. Отражательная способность - это пропорция между количеством излучения, попавшего на объект, и количеством отраженного от него излучения, поэтому это величина отношения. Отражательная способность верхней части атмосферы может быть получена так же, как и светимость на этапе (b) выше.

На следующем этапе отражательная способность верхней части атмосферы преобразуется в поверхностную отражательную способность (также известную как отражательная способность нижней части атмосферы, или отражательная способность верхней части полога, или в исследованиях растительности). Под отражательной способностью в верхней части полога можно понимать отражательную способность, измеряемую непосредственно над растительностью. Этот этап требует знания атмосферных условий, присутствующих во время получения изображения. Полученное изображение называется атмосферно скорректированным [17].

При атмосферной коррекции используются таблицы расчетов радиационного переноса. Все таблицы поиска подвергаются многомерной линейной интерполяции в соответствии с их непрерывными координатными переменными (индексные номера каналов и аэрозольных моделей являются дискретными координатными переменными)/

N-мерная линейная интерполяция величины в декартовом пространстве параметров может быть разделена на два этапа:

1. Нормализация входных параметров в соответствии с приведенным ниже уравнением, где P^l и P^u - ближайшие нижняя и верхняя записи параметров, соответственно, в таблице поиска.

$$\bar{p}_i = \frac{p_i - p_i^l}{p_i^u - p_i^l} \quad (1)$$

2. Интерполяция взвешенной суммой ближайших табличных значений.

Существует два варианта алгоритмов атмосферной коррекции: вариант А используется на этапе обработки аэрозольного извлечения, в то время как вариант S позволяет получить окончательное отражение поверхности и ошибки.

Окончательная атмосферная коррекция также выполняется для пикселей, помеченных как облачные, чтобы обеспечить отражение поверхности и ошибки для случаев, когда экранирование облаков не было уместным [18].

1.6 Трофический статус водоема

Водные объекты могут быть полностью охарактеризованы тремя основными компонентами: гидрологией, физико-химическими и биологией. Полная оценка качества воды основывается на соответствующем мониторинге этих компонентов. Все водоемы взаимосвязаны между собой, от атмосферы до моря, посредством гидрологического цикла. Таким образом, вода представляет собой континуум с различными стадиями - от дождевой воды до морских соленых вод.

Виду сложности факторов, определяющих качество воды, и большого выбора переменных, используемых для количественного описания состояния водных объектов, трудно дать простое определение качества воды.

Качества воды - это общий процесс оценки физической, химической и биологической природы воды, в то время как мониторинг качества воды - это сбор соответствующей информации.

Основной причиной для оценки качества водной среды была, традиционно, необходимость проверки того, подходит ли наблюдаемое качество воды для использования по назначению. Использование мониторинга также развивалось, чтобы помочь определить тенденции в качества водной среды и того, как на это качество влияет выброс загрязняющих веществ, другая антропогенная деятельность и/или операции по переработке отходов (мониторинг воздействия).

Совсем недавно мониторинг проводился для оценки потоков питательных веществ или потоков загрязняющих веществ, сбрасываемых реками или подземными водами в озера и океаны, или через международные границы. Также в настоящее время широко проводится мониторинг для определения фонового

качества водной среды, поскольку он дает возможность сравнения с мониторингом воздействия. Он также используется просто для того, чтобы проверить, не происходят ли какие-либо неожиданные изменения, происходящие в нетронутых условиях, например, в результате переноса на большие расстояния атмосферных загрязнителей (следует отметить, однако, что качество природных вод очень изменчиво в зависимости от местных условий).

Качество воды напрямую связано с уровнем трофности водоема. Термин «трофность» или «трофия» (от *trophe* – пища) водоемов был введен в 1921 г. для обозначения способности водоемов создавать органическое вещество в процессе фотосинтеза, названное позднее первичной продукцией.

Показатели трофического состояния водоема можно подразделить на 3 группы:

1. биотические показатели, которые включают в себя количество фитопланктона, концентрацию хлорофилла, величина первичной продукции;
2. абиотические, включающие количество биогенных веществ, которые потребляют водоросли, а также различные гидродинамические, гидрохимические характеристики водоема;
3. формализованные численные индексы трофического состояния

Классификация водоема по трофическому уровню представляют собой непрерывный диапазон концентраций питательных веществ и связанного с ними производства биомассы. Названия, присвоенные классификациям, представляют собой эмпирически определенные интервалы от очень низкой до очень высокой продуктивности.

Олиготрофные воды: воды с низкой первичной продуктивностью и низкой биомассой, связанные с низкими концентрациями питательных веществ (N и P), имеют высокую прозрачность, содержание кислорода в пределах нормы.

Мезотрофные воды: эти воды менее четко определены, чем олиготрофные или эвтрофные и обычно считаются водоемами, находящимися на переходном этапе между этими двумя состояниями условиями.

Эвтрофные воды: воды, в которых наблюдается высокая концентрация питательных веществ и связанное с этим высокую продукцию биомассы, обычно с низкой прозрачностью, в верхних слоях часто возникает избыток кислорода, а у дна - значительный недостаток.

Дистрофный водоем: характеризуется низкой минерализацией, большим содержанием гумуса и незначительным количеством биогенных веществ. Низкое развитие фитопланктона. Растворенное органическое вещество составляет 90-98% и лишь 2-10 % представлено в форме живых организмов и детрита.

Гиперэвтрофные воды: воды, находящиеся на крайнем пределе эвтрофного диапазона с чрезвычайно высокими концентрациями питательных веществ и соответствующим производством биомассы [19].

В данной работе мы будем затрагивать оценку трофического статуса по биотическим показателям.

Зеленый пигмент хлорофилл (который существует в трех формах: хлорофилл а, b и c) присутствует в большинстве фотосинтезирующих организмов и служит косвенным показателем биомассы водорослей и показатель трофического статуса водоема.

В водоемах с небольшим поступлением осадочного материала из водосборного бассейна или с небольшим количеством повторного взвешивания, хлорофилл может дать приблизительное представление о количестве материала, взвешенного в толще воды. Рост планктонных водорослей в водоеме связан с присутствием питательных веществ (в основном нитратов и фосфатов), температурой и светом [20].

Поэтому концентрация хлорофилла колеблется сезонно и даже ежедневно, или с глубиной воды, в зависимости от условий окружающей среды. Водоемы с

низким уровнем питательных веществ (например, олиготрофные) имеют низкий уровень содержания хлорофилла ($<2,5$ мкг/л), мезотрофные водоемы имеют средний уровень хлорофилла (3-12 мкг/л), тогда как воды с высоким содержанием питательных веществ (особенно те, которые классифицируются как эвтрофные) имеют высокие уровни хлорофилла (5-140 мкг/л), хотя встречаются и уровни, превышающие 300 мкг/л- гипертрофные воды.

Еще одним показателем трофности водоема является величина первичной продукции (ПП).

ПП сильно зависит от различных факторов, таких как: видовой состав водорослей, глубины проникновения света, прозрачности, глубины водоема и от количества биогенных веществ.

Величина первичной продукции сильно зависит от многих факторов: видового состава и физиологической активности водорослей; глубины проникновения света, соотношения прозрачности воды и глубины водоема, интенсивности солнечной радиации и, конечно, от концентраций биогенных веществ.

Система трофического деления водоемов по величине первичной продукции [21]:

1. олиготрофные воды- $0,5-1 \text{ гO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{сут}$
2. мезотрофные- $1-7,5 \text{ гO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{сут}$
3. эвтрофные- $2,5- 7,5 \text{ гO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{сут}$
4. гипертрофные- $7,5-10 \text{ гO}_2/\text{м}^2 \cdot \text{сут}$

Также нельзя не упомянуть оценку трофического статуса по фитопланктону

Фитопланктон является основным первичным продуцентом и одним из основных биологических компонентов водных экосистем, имеет широкий ареал и короткий жизненный цикл и играет важнейшую роль в потоке энергии, круговороте веществ и передаче информации в пресноводные экосистемы.

Состав, численность и разнообразие фитопланктона являются важными индикаторами качества воды, которые считаются важными индикаторами здоровья водоема. Ранее фитопланктон использовался как биологический индикатор для оценки изменений в водоемах, быстро реагирующий на изменения окружающей среды. Путем анализа характеристик фитопланктонного сообщества можно всесторонне и своевременно уловить динамические характеристики качества водной среды, которые не могут быть заменены физико-химическим мониторингом. В настоящее время индексы биологической оценки и методы оценки качества воды постепенно внедряются в системы оценки состояния водоема и приобретают важное значение для оценки уровня загрязнения воды и питания. В некоторых исследованиях изучалось использование фитопланктона для оценки качества воды и других аспектов. Поэтому оценка состояния воды с использованием аквабиологии необходима для понимания влияния деятельности человека на качество воды и неоднородности пространственно-временных характеристик, а также для осуществления эффективной экологической защиты [22].

Индикаторные свойства фитопланктона определяются нахождением или отсутствием каких-либо видов, а также степенью и количеством их развития. Поэтому изучение таких структурных показателей, как видовой состав, численность и биомасса, распределение водорослей в водоеме имеют большое практическое значение.

Стоит уделить отдельное внимание оценке качества воды по фитопланктону методом Пантле и Букка в модификации Сладечека.

Для того чтобы определить трофность водоема необходимо сначала вычислить индекс Милиуса:

$$I_b = 44,87 + 23,22 \cdot \log B$$

где B – общая биомасса водорослей в пробе.

Система трофического деления водоемов по величине валовой продукции фитопланктона за год по Романенко:

1. олиготрофные воды- $4-40 \text{ гС/м}^2$
2. мезотрофные- $40-150 \text{ гС/м}^2$
3. эфтрофные- $150-600 \text{ гС/м}^2$
4. гипертрофные- $>600 \text{ гС/м}^2$

1.7 Факторы, влияющие на распространение фитопланктона

Для развития фитопланктона необходимо, чтобы основные абиотические и биотические параметры среды были с устойчивом состоянии. При каких-либо колебаниях этих составляющих, может изменяться видовое разнообразие и биомасса фитопланктона.

К основным компонентам, лимитирующих развитие фитопланктона относится: температура, кислород, соленость и биогенные элементы.

Температура оказывает прямое и косвенное воздействие. Прямое воздействие: 1) терпимость к температуре, это когда температура воды в водоемах повышается в летний сезон, некоторые виды фитопланктона могут переносить это изменение температуры, так, например, температура хлореллы в озере никогда не поднимается выше 7°C , тогда как в лабораторных экспериментах ее оптимальная температура составляла 20°C ; 2) фотосинтез при экстремальных температурах. Фотосинтез фитопланктона может протекать при экстремальных температурах: например, в антарктических местах обитания при температуре ниже 0°C , а в тропических местах обитания при температуре 30°C и выше; 3) сезонная картина фитопланктона, контролируемая температурой.

Некоторые виды фитопланктона демонстрируют сезонные закономерности, которые контролируются температурой, это, например, цветение пресноводных цианобактерий в озерах умеренного пояса происходит в основном летом, летнее

обилие динофлагеллят в морях умеренного пояса, чередование видов во время весеннего всплеска в морях умеренного пояса (холодоустойчивые виды, холодоустойчивые виды, встречающиеся ранней весной и виды, предпочитающие более теплые условия, следующие за поздней весной или ранним летом), сезонные сукцессии фитопланктона наблюдаются как в арктических и антарктических водах и тропических морях, хотя колебания температуры не являются широкие в тропических морях.

Снижение растворимости кислорода в морской воде при повышении температуры. В то время как доступность CO_2 редко оказывается ограничивающим фактором для роста фитопланктона в море и в пресноводной среде обитания, во всех водных средах обитания может наблюдаться дефицит содержания растворенного кислорода из-за повышения температуры. Этот дефицит, с его последующим влиянием на дыхание, может оказаться ограничивающим рост растений.

Косвенные факторы.

Важное косвенное влияние температуры на организмы фитопланктона можно увидеть в термической стратификации как в море, так и в озерах. Температура влияет на водные массы, образуя слои воды с различной температурой и плотностью. Это явление называется "термической стратификацией. Оно образуется, когда водная поверхность озер, подверженных воздействию максимальных температур воздуха или безветренной погоды, нагревается летом.

Термическая стратификация возникает, по-видимому, как в глубоком море, так и в омывающей сушу водной массе с минимальной поверхностной турбулентностью. Термоклин может никогда не развиваться или существовать в течение нескольких дней в мелком море с непрерывной турбулентностью. Различные слои, образующиеся при термической стратификации, представлены следующим образом:

1-Эпилимнион; верхний слой нагретой воды.

2-Металлимнион; тонкий слой, в котором наблюдается заметное изменение температуры и плотности. Он называется термоклин или прерывистый слой.

3-Гиполимнион: Глубокий слой холодной воды,

Обратная температурная стратификация.

Обратная температурная стратификация в водных озерах может возникнуть в конце зимы или ранней весной, когда температура верхних слоев опускается ниже температуры более глубоких слоев воды. Глубина слоя разрыва определяется поверхностной турбулентностью. Это обычно является постоянной особенностью низких широт и имеет сезонный характер в более высоких широтах.

Развитие слоя термоклина приводит к отделению верхней нагретой воды от более глубокой холодной воды. В соответствии с глубиной слоя термоклина, хорошо выраженный термоклин, развивающийся в начале лета, в спокойном море находится на глубине 13-14 м. В то время как в океанических водах он лежит на глубине 25-30 м. Действие ветра на поверхности может влиять на стабильность термоклина, в то время как частые штормы могут препятствовать его развитию образование в открытом океане. Турбулентности, создаваемые неровностями морского дна, достаточно велики и возмущения могут распространяться до поверхностных слоев.

Влияние термической стратификации на рост фитопланктона

Термоклинный слой изолирует водные массы, содержащие фитопланктон в верхнем нагретом слое от проникновения в более глубокий холодный слой, содержащий питательные вещества. Очевидно, он препятствует перемешиванию воды в толще воды. Термоклинный слой является важной годовой характеристикой в жизни фитопланктона.

Термическая стратификация ограничивает фитопланктон в верхних слоях моря и озер, являясь барьером для вертикального перемешивания воды и пополнения питательных веществ. Выше термоклина клетки фитопланктона

циркулируют под действием движения воды, которые часто переносятся в достаточно освещенные области. Но когда питательные вещества в этом слое уменьшаются, рост фитопланктона будет ограничен. Восполнение питательных веществ в поверхностных слоях зависит от рециркуляционных процессов минерализации в более глубоких водах как на морском дне, так и на дне озер.

Минеральные вещества, растворенные в дренаже суши, также имеют большое значение, но их может быть недостаточно для продолжения роста фитопланктона в море, это наземное влияние в основном ограничивается прибрежными водами. Постепенное понижение температуры воздуха и воды приводит к осеннему явлению турбулентности. Повышенная турбулентность моря с наступлением осенних штормов создает массовое движение воды, которое постоянно опускается и разрушает разрывной слой, вызывая апвеллинг, так что происходит вертикальное перемешивание и опрокидывание.

Апвеллинг более глубоких вод происходит, когда течения уносят поверхностные воды особенно в прибрежных водах. Такие явления усиливают перемешивание поверхностных и более глубоких вод, богатых питательными веществами, что приводит к плотному росту фитопланктона. Некоторые группы фитопланктона предпочитают стабильную стратификацию, такие как подвижные динофлагелляты встречаются в более стратифицированных толщах воды. В то время как другой фитопланктон предпочитает смешанную водную толщу, например, быстрорастущие и силицированные диатомовые водоросли процветают в условиях сильного перемешивания воды.

Соленость

Градиенты солености воды варьируются от сильной солености в морских средах (например, океаны и моря) до низкой солености в пресной воде (реки и водохранилища), переходя от солоноватой воды эстуариев. Морская вода в основном состоит из положительных ионов натрия (Na^+), магния (Mg^+), кальция (Ca^{++}) и калия (K^+), и отрицательные ионы - хлорид (Cl^-) и сульфат (SO_4^{-2}).

Основными элементами в морской воде солености являются Na и Cl (как NaCl в морской воде 30,4 ‰).

Соленость является важнейшим фактором, влияющим на рост фитопланктона. Соленость создает барьер для пространственного распределения фитопланктонных организмов. Некоторые виды фитопланктона полностью ограничены пресной водой (например, десмиды). Поступление соленой воды в районы пресной воды оказывает катастрофическое воздействие на фитопланктон. Некоторые организмы могут выживать и расти в условиях переменной солености эстуариев. Некоторые нанофитопланктоны из эстуариев, заметно изменяют свой объем, если их подвергнуть воздействию низкой солености без ущерба для клеточных (например, в 15 ‰ по сравнению с 35 ‰).

Клетки морских диатомей и динофлагеллят повреждаются, если их внезапно подвергнуть воздействию пресной воды. Напротив, когда пресноводный фитопланктон попадает в море, они будут подвергаться деформации и разрыву клеток или быстрому плазмолизу, если они не являются эвригалинными по своим свойствам.

Некоторые виды могут адаптироваться к низким температурам (от -1,8 до 3,5°C) и солености от 32,6 до 34,5‰. Виды, которые ограничены диапазоном температуры и солености они описываются как стенотермные и стеногалинные. В тропических морях температурные колебания, но ограниченный диапазон солености, некоторые организмы являются эвритермными и стеногалинными. В эстуариях колебания температуры и солености могут быть самыми разнообразными, и организмы, адаптированные к обоим типам стресса, являются как эвритермными, так и эвригалинными.

Региональный видовой состав сильно меняется в зависимости от солености, разнообразие, по-видимому, самое низкое в промежуточной солоноватой воде. Немногие морские и лимнетические виды выживают при такой солености, а

настоящих солоноватоводных видов немного. Однако несколько видов цианобактерий адаптированы к промежуточной солености [23,24].

2 Физико-географическое описание региона исследования

2.1 Баренцево море

Физико-географическое положение

Баренцево море, это отдаленная часть Северного Ледовитого океана, 1300 км в длину и 1050 км в ширину, занимает площадь 1 405 000 км². Он имеет среднюю глубину 229 м и максимальную глубину 600 м в главном желобе Медвежьего острова. Граничит с архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа (север), материковой частью Норвегии, архипелагом Новая Земля (восток) и идущей от Шпицбергена условной границей с Гренландским морем (запад) до самой северной оконечности Норвегии, мыса Нордкап, через остров Медвежий.

Рельеф дна

Баренцево море покрывает относительно плоский континентальный шельф, ограниченный евразийским массивом суши. Дно, покрытое песком, илом и песчано-пылеватой смесью, прорезано с востока на запад. Главным желобом острова Медвежий и Малыми желобами Южного Мыса, северного и северо-восточного. Центральные возвышенности и возвышенности Персея предлагают более плоскую местность на севере. Также к юго-востоку находится остров Колгуев. Западное материковое побережье имеет крутую возвышенность и перемежается фьордами, тогда как побережье к востоку от полуострова Канин плоское и имеет ряд мелководных бухт. Берега северного архипелага крутые и

высокие, с ледниками, обрывающимися к морю, и скоплениями ледниковых обломков в бассейнах.

На глубине меньше 100 м, донные осадки представлены песками, часто с примесью гальки, гравия и ракуши, особенно это заметно в южной части Баренцева моря. Пески, на склонах, охватывают большие глубины. Центр и северная часть моря, на мелководье возвышенностей, представляются илистым песком.

Климат

Климат Баренцева моря- субарктический, со средней температурой воздуха зимой -25°C на севере и -5°C на юго-западе; Летние средние значения в тех же регионах составляют 0°C и 10°C соответственно. Годовое количество осадков составляет 500 мм на юге, но вдвое меньше на севере.

Погода Баренцева моря достаточно изменчива, т.к находится под воздействием теплого Атлантического и холодного Северного Ледовитого океана. В целом, можно сказать, что климатические условия моря характеризуются небольшой амплитудой годовых колебаний температуры воздуха, коротким и холодным летом, а также теплой зимой. Над морем преобладают сильные ветра и высокая относительная влажность воздуха.

Гидрологический режим

Нордкапская и Шпицбергенская ветви Норвежского течения несут теплые течения в Баренцево море, но тепло теряется при смешивании с более холодной водой. Несмотря на высокую соленость 34 ‰, зимой образуется лед, но поля тонкие и айсберги долго не задерживаются. Летом кромка льда отступает далеко

на север. Амплитуда приливов и направление течения сильно различаются. Незамерзающие порты Мурманск и Териберка и Вардё (Норвегия).

Речной сток достаточно мал, в основном поступают реки в юго-восточную часть моря и в среднем составляет 163 км³ в год. Самые крупные реки: Печора, Индига, Воронья, Териберка.

Поскольку в Баренцево море поступают теплые атлантические воды, температура и соленость моря относительно высокие в юго-западной части. С февраля по март температура воды на поверхности колеблется от 3–5 °С, в августе до 7–9 °С. Зимой температура на поверхности в юго-восточной части моря и севернее 74° с. ш ниже –1 °С, а летом севернее 4–0 °С, на юго-востоке 4–7 °С.

Соленость Баренцево моря в поверхностном слое в открытой акватории варьируется на юго-западе в районе 34,7–35,0‰, на востоке 33,0–34,0‰, на севере 32,0–33,0‰.

В весенний период и летом соленость уменьшается до 30–32‰, а к концу зимы возрастает до 34,0–34,5‰ в прибрежной полосе моря.

В Баренцевом море отмечаются правильные полусуточные приливы, с наибольшей высотой 6,1 м у берега Кольского п-ова, в других местах 0,6–4,7 м.

В следствии суровых климатических условий в северной и восточной частях, море обладает большой ледовитостью. В течении года свободной от льда остается только юго-западная область. В апреле ледяной покров достигает наибольшего распространения, около 75% моря занято плавучими льдами [25].

Флора и Фауна

Во время «цветения» Баренцево море приобретает молочно-голубой цвет, такая цветовая гамма моря указывает на то, что оно содержит большое количество кокколитофоров *E. Huxleyi*, диатомовых *Thalassiosira* и малая группа динофлагелят *Ceratium*. В следствии североатлантического дрейфа, в Баренцевом

море отмечается большая биопродуктивность. Цветение фитопланктона весной начинается рано, вблизи кромки льда, что связано с тем, что пресная вода, которая образуется из-за тающего льда, создает устойчивый слой воды поверх морской воды [26].

Рыболовство в Баренцевом море процветает. Микроскопические формы фитопланктона питаются глубоководными беспозвоночными, мелкими креветкообразными ракообразными, мидиями и грибами, которые, в свою очередь, поддерживают рыбу, такую как треска, сельдь, лосось, камбала и сом. Здесь также обитают морские млекопитающие (тюлени и киты), наземные млекопитающие (белые медведи и песцы), чайки, а в теплую погоду - утки и гуси. Подводная флора очень богата в мелководных южных районах, а бурые, красные и зеленые водоросли широко распространены. Большая часть побережья скалиста и камениста, но примерно от 20 до 40 процентов покрыто кустарниками, мхами и лишайниками. Травы встречаются редко [27].

Экологическое состояние

В заливах, где находится флот, разработка газовых и нефтяных месторождений, отмечаются повышенные содержания тяжелых металлов, нефтепродуктов. Наиболее неблагоприятная ситуация наблюдается в Кольском заливе, но можно отметить, что содержание металлов в тканях рыб много ниже ПДК [28].

2.2 Карское море

Физико-географическое положение

Карское море, окраинное море Северного Ледовитого океана, расположенное у побережья Западной Сибири, между островами Новая Земля (запад), Земля Франца-Иосифа (Северо-запад) и островами Северная Земля (восток). Он соединен с Арктическим бассейном (север), Баренцевым морем (запад) и морем Лаптевых (восток). Его площадь составляет 880 000 квадратных км. Средняя глубина составляет 127 м, а максимальная глубина составляет 620 м.

Несколько глубоких заливов Карского моря врезаются в материк. Самыми крупными реками, впадающими в море, являются Енисей, Обь, Пясина и Кара, от которого море и получило свое название. Многие острова, сосредоточенные в основном на севере, разнообразны по происхождению и ландшафту. Некоторые из них гористые, другие полностью покрыты ледяными куполами, а многие низменные и песчаные.

Рельеф

Карское море расположено на сибирском шельфе; таким образом, около 40 процентов его глубины составляет менее 50 м, и только 2 процента имеют глубину более 500 м. Шельф разрезан на севере двумя широкими глубоководными желобами - Святой Анны к востоку от Земли Франца-Иосифа, глубиной 620 м, и параллельным желобом Воронина, примерно в 290 км) к востоку, глубиной 450 м. К востоку от Новой Земли простирается Новоземельская впадина глубиной 200-400 м.

Карское море образовалось в результате дегляциации во время последнего ледникового периода, следы ледникового льда были обнаружены под тонким слоем илистых отложений. Каменистые почвы встречаются в северо-восточной части океана. Есть также песчаные отмели и песчаные материковые пляжи.

Климат

Карское море характеризуется полярным морским климатом с коротким прохладным летом и продолжительной холодной зимой, которая несколько смягчается влиянием тёплых атлантических вод. Полярная ночь длится 3–4 мес в году. В зимнее время погода формируется Сибирским антициклоном, полярным максимумом и частичным влиянием ложбины Исландской депрессии. В северо-восточных районах господствуют северные ветры умеренной силы, над остальной акваторией ветры южных направлений. Штормовая погода больше характерна для западных районов. Летом над морем в основном преобладают умеренные ветры переменных направлений. Температура воздуха в феврале от -18°C у берегов Новой Земли до -26°C у берегов Северной Земли, минимальная -52°C отмечена на мысе Челюскин. Температура воздуха в августе от 0°C на севере до 6°C на юге, максимальная 22°C у юго-запада материкового побережья. Зима приносит частые штормы и метели, в то время как лето приносит снег, сугробы и туман.

Гидрологический режим

Соленость сильно колеблется: от 10-12 ‰ вблизи устьев Оби и Енисея до 33 ‰ на Земле Франца-Иосифа. Солёность в феврале понижается с северо-запада на юго-восток – от 34‰ у Новой Земли до 20‰ у о. Диксон. В августе солёность уменьшается с севера на юг – от 33‰ на широте Земли Франца-Иосифа до 11‰ у о. Диксон.

Водные массы Карского моря чрезвычайно холодные и слоистые. Зимой средняя температура воды составляет $-1,6^{\circ}\text{C}$. летом она достигает 6°C в юго-западной части океана и 2°C на севере. Течения движутся двумя медленными круговыми движениями против часовой стрелки в юго-западной и северо-восточной частях океана.

В Карском море преобладают правильные полусуточные приливы, в некоторых районах также отмечаются суточные и смешанные. Величина прилива невысокая, почти везде 0,5–0,8 м, в Обской губе более 1 м. Высота волн в среднем 1,5–2,5 м.

С октября по май море полностью замерзает. В прибрежной зоне припайные льды летом взламываются и тают, особенно в юго-западной части моря [29].

Флора и Фауна

В ходе исследования, проведенного авторами Л.С. Житиной и Л.В. Ильяшом, в Карском море и Байдарацкой губе в 2013 году, было выделено 220 таксонов микроводорослей, из которых по видовому составу преобладают диатомовые водоросли вида (Bacillariophyta)- 59% от общего числа видов. Второе место по заняли динофлагелляты (Dinzoa) – 21% от общего числа видов, а также были отмечены *Cyanobacteria* и *Chlorophyta*, *Euglenophuta*, *Chrysophyceae*, *Prasinophyceae*, *Dictyochophyceae*, *Cryptophyceae* и *Ebriidea* [30].

В Карском море обитают различные виды зоопланктона. Основными видами рыб, которые здесь водятся, являются треска, лосось и осетр. В летний сезон бесчисленные стаи гусей мигрируют в Карское море для размножения. Многие морские млекопитающие, в том числе кольчатый тюлень, гренландский тюлень, бородатый тюлень, белый кит, морж, морской заяц и белые медведи, также обитают в Карском море [31].

Экологическое состояние

В целом можно говорить о том, что экологическое состояние благополучное, однако в крупных заливах, где сосредоточен флот и проводят разработки месторождений отмечается повышенное содержание нефтепродуктов и тяжёлых металлов [32].

2.3 Море Лаптевых

Физико-географическое положение

Занимая площадь 714 000 км², море Лаптевых является окраинным морем Северного Ледовитого океана, расположенным к северу от Сибири. Море Лаптевых является критически важной частью Северного морского пути, важной в экономическом отношении судоходной артерией.

Море Лаптевых граничит с полуостровом Таймыр и архипелагом Северная Земля на западе; Новосибирскими островами на востоке и северной частью Сибири (Восточно-Сибирской низменностью) на юге. Море простирается на севере в Северный Ледовитый океан. На востоке соединяется с Восточно-Сибирским морем проливами Санникова и Дмитрия Лаптева. На западе море Лаптевых отделено от Карского моря архипелагом Северная Земля.

Море Лаптевых расположено в пределах континентального шельфа и имеет максимальную глубину 3385 м. Большая часть моря относительно неглубокая, около 50% моря имеет глубину менее 50 м, что приводит к расчетной средней глубине 578 м. Береговая линия моря довольно изрезана и образует несколько бухт и заливов разных размеров: Яна, Марии Прончищевой, Оленекский, Хатангский, Буор-Хая. Некоторые из известных рек, впадающих в море Лаптевых, включают реки Лена, Анабар, Хатанга, Оленек, Яна и Омоллой. В море Лаптевых более десятка островов. Эти острова занимают общую площадь около 3784 км² и в основном встречаются в дельтах рек и в западной части моря. К основным островам здесь относятся Большой Бегичев, Малый Таймыр, Старокадомский, Белковский, Столбовой и Песчаный. Некоторые из важных островных групп включают Комсомольскую правду, Фаддея и Вилькицкого и Северную Землю.

Рельеф дна

Известно, что море Лаптевых расположено в шельфовой зоне, материкового склона и занимает небольшой участок ложа океана, из-за чего рельеф дна представляется равниной, которая круто обрывается на севере. В основном преобладают глубины до 50 м, средняя глубина моря 540 метров, а наибольшая 3385 метров.

На больших глубинах дно покрыто илом, в мелководных районах можно наблюдать песок и ил с примесями гальки и валунов. У берегов речные осадки аккумулируются с большой скоростью, примерно до 20-25 сантиметров в год

Климат и гидрологический режим

Среди всех арктических морей море Лаптевых является самым суровым и отличается крайне суровым континентальным климатом. Средняя температура колеблется от -31° до -34°C (иногда до -50°C) в самый холодный месяц, январь. Зимние месяцы характеризуются метелями, буранами и метелями. В июле средняя температура в южной части моря составляет около 6°C , а в северной, чуть выше точки замерзания. Однако максимальная температура вдоль берегов колеблется в пределах 22° - 24°C . Для коротких летних месяцев характерны туманы и снежные шквалы. Море Лаптевых в просторечии известно, как «место рождения льда». За исключением августа и сентября, большую часть года море покрыто льдом.

Гидрологический режим

Море характеризуется низкой температурой воды. В зимние месяцы температура воды подо льдом колеблется от $-0,8$ до $-1,80^{\circ}\text{C}$. В летний период, в районах свободно ото льда, верхний слой моря может прогреваться до $4-60^{\circ}\text{C}$, а в

заливах до 8-100С. Солёность морской воды у поверхности в северо-западной части моря зимой составляет 34 ‰, в южной части — до 20-25 ‰. В районах устьев рек она составляет менее 10 ‰. Таяние льда и сток сибирских рек оказывает сильное влияние на показатели солёности в поверхностных водах. Самое большое влияние на солёность оказывает река Лена, около 70 % речного стока. Другие реки, вносящие значительный вклад в совокупный сток: Хатанга, Оленёк, Яна и Анабар.

Высота приливов в среднем отмечается до 50 сантиметров. На уменьшение величины приливов влияет ледяной покров. Зачёт относительно слабых ветров и небольших глубин море Лаптевых сравнительно спокойно, с волнами в пределах 1 метра. В июле-августе в открытом море могут наблюдаться волны высотой до 4-5 м, а в осенний период достигать 6 метров.

Морозные зимы Арктики вызывают значительное образование морского льда, который покрывает акваторию моря почти весь год. Развитию льда способствует также мелководность моря и малая солёность его поверхностных вод. Море Лаптевых является крупнейшим источником арктического морского льда [33].

Флора и фауна

Благодаря суровому климату, флора и фауна моря Лаптевых немногочисленная. На растительность моря оказывается влияние опреснение речным стоком. Так в южной части моря, где заметно наибольшее опреснение речным стоком, область шельфа характеризуется пресноводными диатомеями рода *Aulacoseira*. Континентальная область склона и глубоководные районы моря, при солёности верхнего перемешанного слоя больше 27 ‰, были населены диатомеями родов *Chaetoc* [34].

В ходе отбора проб в августе 2017 г. в юго-западной части континентального шельфа моря Лаптевых на расстоянии 20 и более км от берега п-ова Таймыр, было исследовано 60 проб фитопланктона. Всего в составе фитопланктона выявлено 48 видов, относящихся к 4 отделам: *Bacillariophyta*, *Dinophyta*, *Haptophyta*, *Ochrophyta*. Наибольшее разнообразие отмечено у динофитовых и диатомовых водорослей – 24 и 20 видов соответственно. Выявленные таксоны диатомовых принадлежат 12 родам, с наибольшим разнообразием видов из рода *Chaetoceros eros* и *Rhizosolenia*, которые широко распространены в Арктике и динофлагеляты [35].

К донным организмам относятся фораминиферы, многовидовые черви, изоподы, мсканки и моллюски. Рыбы в море Лаптевых представлены сигом сибирским, арктическим голцем, омулем, нельмой, острой и др. Из млекопитающих встречаются милули, тюлени и белуги, морские зайцы, нервы; на берегу птичьего рынка; Много промысловой рыбы: Халто, Муксун, Нельма, Тюмень, Окунь, Оспература, Стерлядь. На ледяных островах и больших ледяных полях в открытом море живут белые медведи.

В море Лаптевых обитает несколько десятков птиц, причем некоторые из них ведут оседлый образ жизни и живут здесь постоянно. Среди таких птиц можно отметить: пуночка, морской песочник, полярная сова и чёрная казарка. Также следует отметить кочевых птиц по приполярным регионам или которые мигрируют с юга: относятся гагарка, обыкновенный чистик, белая чайка, кайра, ржанкообразные и полярная чайка [36].

Экология

Степень загрязнения воды относительно низкая, в основном сточные воды поступают с заводов и шахт, которые располагаются на реках Лена, Яна и Анабар. Загрязняющие вещества этих предприятий содержат фенолы, медь и цинкт,

которые постоянно поступают в море со стоком рек. Также еще одним источником загрязнения являются разливы нефти, которые происходят в результате ее добычи. Чаще всего это происходит в районе поселка городского типа Тикси.

Еще один крупный источник загрязнения- это затонувшая и плавучая разлагающаяся древесина, которая оказалась в воде, в результате постоянного лесосплава [37].

2.4 Восточно-Сибирское море

Физико-географическое положение

Восточно-Сибирское море, часть Северного Ледовитого океана между островами Новая Сибирь (запад) и островом Врангеля (восток). На западе соединяется с морем Лаптевых проливами Дмитрия Лаптева, Этерикан и Санникова; на востоке длинный пролив соединяет его с Чукотским морем. Восточно-Сибирское море площадью 936 000 квадратных километров большую часть года покрыто льдом. Его максимальная глубина составляет 155, но в западной и центральной частях (от 9 до 20 м), средняя глубина составляет 58 м. Есть несколько групп островов. Навигация ограничена августом и сентябрем.

Береговая линия Восточно-Сибирского моря протяженностью 3 016 км слегка изрезана и образует несколько заливов и ущелий в южной части моря, а именно Чаунскую бухту, Колымский залив и Колымский залив. Западное побережье моря в основном равнинное и однородное с низменными склонами, в то время как восточное побережье довольно гористое с крутыми склонами. Площадь водосбора Восточно-Сибирского моря составляет 1 342 млн км², с крупными реками, включая Аласею, Чукочью, Чаун, Индигирку, Колыму,

Пегтымель и реки Раучуа. Море ограничено на юге Восточно-Сибирской низменностью.

Восточно-Сибирское море сталкивается с чрезвычайно суровым климатом. Море замерзает с октября по ноябрь и оттаивает примерно в июне-июле. Было замечено, что в то время как температура поверхности моря снижается с юга на Север, соленость моря увеличивается с юго-запада на северо-восток.

Несколько островов и архипелагов расположены в прибрежных водах Восточно-Сибирского моря. Некоторые из известных островов включают остров Айон, Новосибирские острова, острова Шалаурова и архипелаг Медвежий. Эти острова занимают площадь всего в 80 км². Некоторые из этих островов состоят из песка и ископаемого льда и поэтому подвергаются интенсивному разрушению.

Рельеф дна

Шельф Восточно-Сибирского моря располагается в пределах Северной Американской плиты. Подводный рельеф шельфовой зоны, который образует ложе моря, представляет собой равнину, слабо наклоненную с юго-запада на северо-восток.

Дно западной части моря представляет собой плоскую мелководную равнину, здесь расположена Новосибирская отмель. В южной части отмечаются неглубокие впадины – следы древних речных долин в доледниковые и ледниковые времена.

Дно океана состоит из складчатых комплексов. В нынешнее время, данные осадки состоят в основном из песчаного ила, который содержит раздробленные валуны и гальку, принесенные льдом.

Климат

Восточно-Сибирское море характеризуется арктическим климатом. Зимой, из-за воздействия Сибирского максимума на море господствуют холодные юго-западные и южные ветра. Температура воздуха в феврале колеблется от -28 до -30 °С (мин. -50 °С); в июле в южной части от 3 до 7 °С, на севере-от 0 до 2 °С. Летом погода в основном пасмурная с мелким морозящим дождем, местами мокрый снег; преобладают ветры с северных направлений. Осенью на побережье скорость северо- западных и северо-восточных ветров усиливается до $20-25$ м / с; на удалении от берега сила штормовых ветров достигает $40-45$ м / с, ветер усиливается фёнами. В год выпадает $100-200$ мм осадков.

Гидрологический режим

Материковый сток Восточно-Сибирского моря мал и примерно равен 250 км³/год из них сток Колымы 123 км³/год, Индигирки $58,3$ км³/год.

Температура поверхности воды рядом с устьем рек варьируется от $-0,2$ до $-0,6$ °С, у северной границы моря от $-1,7$ до $-1,8$ °С. В летний период температура поверхностных вод зависит от ледовой обстановки. В районе заливов и бухт температура колеблется от $+7$ до $+8^0$ С, а в районах, где нет льда примерно $2-3$ °С, у кромки льда в районе 0°C .

Солёность на поверхности увеличивается с юго-запада на северо-восток от $10-15\text{‰}$, вблизи устьев рек до $30-32\text{‰}$.

Течения образуют циклонический круговорот; в северной части течение направлено на запад, в южной – на восток. Приливы правильные полусуточные, амплитуда колебаний уровня до 25 см [38].

Флора и фауна

Из-за экстремальных климатических условий Восточно-Сибирское море отличается очень небольшим морским разнообразием. Короткое летнее цветение планктона дает более 5 миллионов тонн планктона в августе и сентябре. Из результатов комплексных исследований, выполненных в Восточно-Сибирском море на НИС «Профессор Леванидов» в сентябре 2019 г было выявлено, что средняя величина биомассы фитопланктона на всей исследованной акватории составляла 112,4 мг/м³. Цветение фитопланктона наблюдалось только на акватории внутреннего шельфа, где его биомасса была на уровне 136,1 мг/м³. Максимальные концентрации более 700 мг/ м³ были выявлены в центральной части, в этой части преобладали диатомовые водоросли *Chaetoceros atlanticus* [39].

Некоторые из морских видов, обитающих на берегах океана и вокруг него, - это кольчатые тюлени, бородатые тюлени, моржи и белые медведи. Виды птиц включают чаек и бакланов. Различные виды китов, посещающие океанские воды, включают гренландского кита, серого кита, белуху и нарвала. Самыми крупными видами рыб, обитающими здесь, являются хариус, корюшка, шафрановая треска, полярная треска, камбала и арктический голец. Некоторые виды ценных сиговых рыб, в том числе муксун, широкий и омуль, также встречаются в прибрежных водах Восточно-Сибирского моря [40].

Экологическое состояние

Экологическую обстановку в целом можно охарактеризовать как благополучную, из-за слабого хозяйственного использования данного района.

Незначительно загрязнён мелководный шельф, который влиянию речного стока, также в результате термоабразионного разрушения берегов в атмосферу поступают парниковые газы (углекислый газ и метан) [41].

2.5 Берингово море

Физико-географическое положение

Берингово море — самая северная часть Тихого океана, включающая в себя глубоководный бассейн (Алеутский бассейн), поднимающийся по узкому склону в более мелководье над континентальным шельфом.

Берингово море отделено от залива Аляска полуостровом Аляска и Алеутскими островами. Покрывая около 2 304 000 квадратных километров, включая его острова, он граничит на востоке и северо-востоке с Аляской, на западе Сибирью и полуостровом Камчатка, на юге с полуостровом Аляска и Алеутскими островами, и на крайний север Беринговым проливом, который отделяет Берингово море от Чукотского моря Северного Ледовитого океана. Бристольский залив — часть Берингова моря, отделяющая полуостров Аляска от материковой части Аляски.

Максимальная ширина с востока на запад составляет около 1490 миль, а с севера на юг — около 990 миль.

Берингово море можно разделить на две почти равные части: относительно мелководную вдоль континентального и островного шельфа на севере и востоке и гораздо более глубокую на юго-западе. В районе шельфа, представляющего собой обширную подводную равнину, глубины в большинстве случаев не превышают 152,4 м. Глубоководная часть юго-западной части моря также представляет собой равнину, залегающую на глубинах от 3657,6 до 3962,4 футов и разделенную отдельными хребтами на три речных бассейна: Большой Алеутский бассейн на севере и востоке, бассейн Бауэрса на юге и бассейн Командор на западе. Самая глубокая точка моря, 4097 метров, находится в бассейне Бауэрса.

Многие острова расположены в Беринговом море. К ним относятся острова Царя, Диомиды, Прибылова, Командорский, Св. Лаврентия, Св. Матфея, Карагинский, Хагемейстер, Нунивак, Сани.

Рельеф

В Берингово море попадает большое количество осадочного материала, который попадает туда с суши, из-за эрозии берега. Следует отметить, что растения и животные на поверхности также производят осадочный материал, но достигает дна малое количество, что говорит о том, что наибольшее количество отложений на дне моря поступают с суши.

На дне моря зафиксировано большое количество кремнезема, а также донный ил, который содержит большое количество валунов, гальки и гравия, сорванных льдом с берегов и вынесенных в море. Южная часть моря изобилует материалом вулканического происхождения.

Климат

Климат Берингова моря можно охарактеризовать как субарктический. В среднем, температура воздуха зимой достигает -25°C . Падение температуры обычно происходит с юга на север. Как правило, в открытом море воздух теплее, чем в прибрежных зонах. Зима в южных частях моря в основном мягкая, на севере- холодная.

В летний период средняя температура наиболее теплых месяцев варьируется от $+4$ до $+13^{\circ}\text{C}$. Погода характеризуется как пасмурная и прохладная. С сентября по июнь часто выпадает снег, около 35 % дней в году дождливые.

Над морем небо часто покрыто облаками, среднегодовая облачность на севере 5-7 баллов, а на юге колеблется от 6-7 баллов в год.

Гидрологический режим

В Беринговом море насчитывается около 16 подводных каньонов. В центре моря находится большой подводный каньон, известный как Жемчугский каньон. Это также самый большой и глубокий в мире.

В море впадают две реки: Анадырь и Юкон. Некоторые из крупнейших заливов Берингова моря включают Бристольский залив, Анадырский залив и пролив Нортон. Расположенный в юго-западной части Аляски Бристольский залив также считается самым восточным продолжением Берингова моря.

В восточной и северной частях Берингова моря суровые зимы по сравнению с прохладным и дождливым летом в западной и южной частях моря. Северная часть моря имеет среднегодовую температуру около -10°C и остается покрытой льдом в зимние месяцы. Январь и февраль — самые холодные месяцы на море, а июль и август — самые теплые месяцы.

Температура воды на поверхности в феврале изменяется от $-1,5^{\circ}\text{C}$ на севере до 3°C на юге, в августе от $4-8^{\circ}\text{C}$ до $9-11^{\circ}\text{C}$

Основной источник поступления вод в Берингово море- Тихий океан. На поверхности соленость колеблется от 31 до 33 ‰, в более глубоких частях моря увеличивается до 35 ‰ у дна.

В зимний период северная часть моря покрыта льдом, он чаще всего покрывается 80-90% поверхности моря, но не было зарегистрировано, чтобы море было полностью порыто сплошным ледяным щитом. Толщина льда обычно доходит до 2 м, однако у берегов может увеличиваться до 5-10 м.

Ледовая обстановка относительно постоянна до апреля, затем происходит быстрое разрушение льда в направлении севера. К концу июля Баренцево море обычно свободно ото льда.

Берингово море характеризуется неправильными полусуточными и суточными, а та же правильными суточными приливами. Высота приливов зависит от места, в среднем высота варьируется от 1,5 до 2 метров [42].

Флора и фауна

Разрыв шельфа Берингова моря является доминирующим фактором первичной продуктивности Берингова моря. В этой зоне, где более мелкий континентальный шельф переходит в Алеутскую котловину, а апвеллинг питательных веществ из холодной воды котловины, которая в свою очередь стекает вверх по склону и смешивается с более мелководными зонами шельфа, обеспечивают море богатой продукцией фитопланктона.

Еще одним фактором, который обеспечивает море хорошей продуктивностью, это сезонное таяние льда, который вызывает весеннее «цветение» фитопланктона. Это связано с тем, что таяние морского льда вызывает приток воды с меньшей соленостью, тем самым образуя стратификацию и гидрографические эффекты, которые также влияют на продуктивность моря.

Из исследования фитопланктона в Беринговом море за 2020 год (Наваринский район хребет Ширшова, было выявлено, что в Наваринском районе отдел диатомовых был представлен *Asteromphalus sp.*, *Chaetoceros atlanticus*, *C. concavicornis*, *Cylindrotheca closterium*, *Navicula directa*, *Navicula sp.*, *Proboscia alata*, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiosira pacifica*, *Thalassiosira sp.*, динофитовые – *Alexandrium tamarense*, *Ceratium lineatum*, *Glenodinium (?) sp.*, *Gymnodinium sp.*, *Gyrodinium cf. fssum*, *Karenia sp.-complex*, *Oblea rotunda*, *Protoperidinium deficiens*, *Genus sp.*; золотистые – *Distephanus speculum* и *Genus sp.*; криптофитовые – таксонами, отнесенными предварительно к роду *Plagioselmis*. Зеленые микроводоросли насчитывали здесь наибольшее количество таксонов – 3 вида *Pterosperma* и *Genus sp.* Особенности сохранения

биоразнообразие морских прибрежных экосистем Камчатки 149 Над хребтом Ширшова немногочисленный фитопланктон формировали *Fragilariopsis oceanica*, *Thalassionema nitzschioides* (диатомовые); *Gymnodinium* sp. (динофитовые); *Distephanus speculum* (золотистые) [43].

Берингово море — одно из самых продуктивных рыболовных угодий в мире. Здесь водятся несколько важных промысловых рыб, таких как тихоокеанская треска, камбала, камбала, палтус, сельдь, минтай, лосось и соболь. Моллюски, такие как снежный краб и красный камчатский краб, также водятся в Беринговом море. В дополнение к этому, в Беринговом море обитают многие виды китов, такие как белуха, гренландский, синий кит, серый, кашалот, касатка и северный тихоокеанский кит. Некоторые другие морские млекопитающие, обитающие здесь, - это морж, морской котик, морская выдра, морской лев и белый медведь. Здесь также обитают несколько видов морских птиц, в том числе короткохвостый альбатрос, хохлатая конюга, очковая гага, красноногая моевка и хохлатый тупик [44].

Экологическое состояние

Экологическое состояние Б. м. стабильно удовлетворительное.

Концентрация загрязняющих веществ возрастает в устьевых зонах рек, в заливах, в портах, что приводит к некоторому сокращению размеров гидробионтов в прибрежных районах [45].

3 Материалы и методы

3.1 Данные дистанционного зондирования Земли

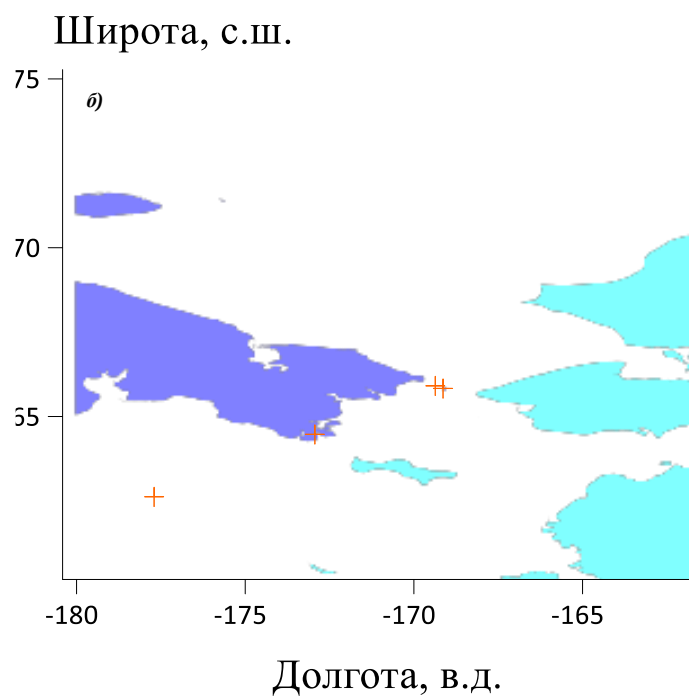
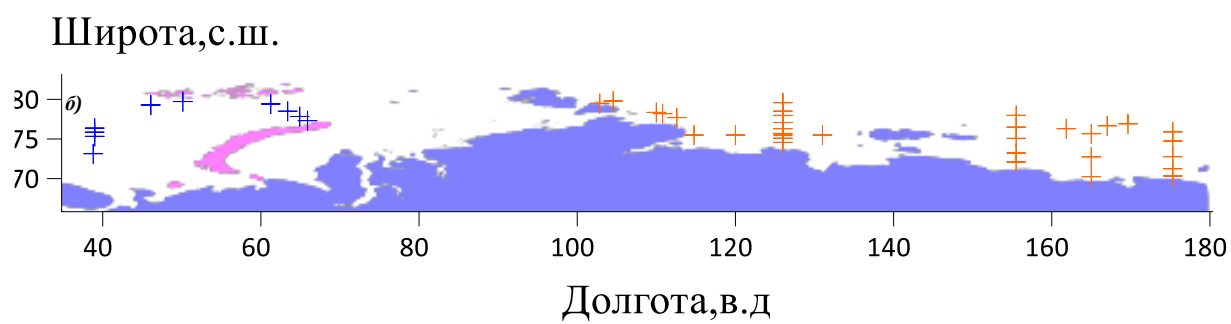
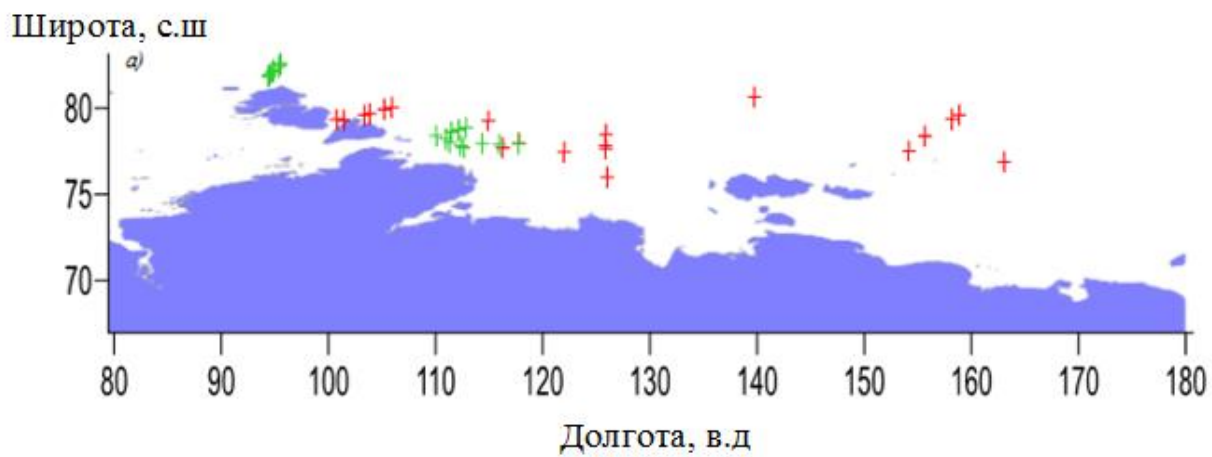
Для определения концентрации хлорофилла «а» были проанализированы архивные данные среднесуточных значений хлорофилла «а» со спутника Sentinel-3, сенсор OLCI-A и OLCI-B, с сайта Eumetsat, полное разрешение: 300 м в надире, level-2. Использовалась концентрация пигмента водорослей в чистой воде, chl_oc4me (алгоритм ВАС и максимального соотношения полос, в масштабе log10) и была обработана с помощью программы Snap (табл. 3.1.1) [46].

Таблица 3.1.1– Фрагмент данных, полученных со спутника Sentinel-3 за сентябрь 2019 г.

Широта	Долгота	Натурные	Sentinel-3
76.30	126.00	0.44	0.11
75.70	125.98	0.21	0.52
75.10	126.00	0.53	0.53
74.57	126.00	0.6	
75.50	114.77	0.4	1.78
75.50	120.00	0.37	
75.50	126.00	0.47	0.58
75.50	131.01	2.55	1.85
77.98	155.50	0.22	0.77

Спутниковые снимки получены и обработаны на сайте Sentinel Hub, Landsat-8, а также на платформе для визуализации данных Giovanni [47,48,49].

Экспедиционные данные (in situ) были взяты из экспедиций Арктика 2018 г. в период с августа по сентябрь, Трансарктика в мае, сентябре - октябре 2019 г. и Арктика 2021 г. (август-сентябрь) (рис.3.1.1).



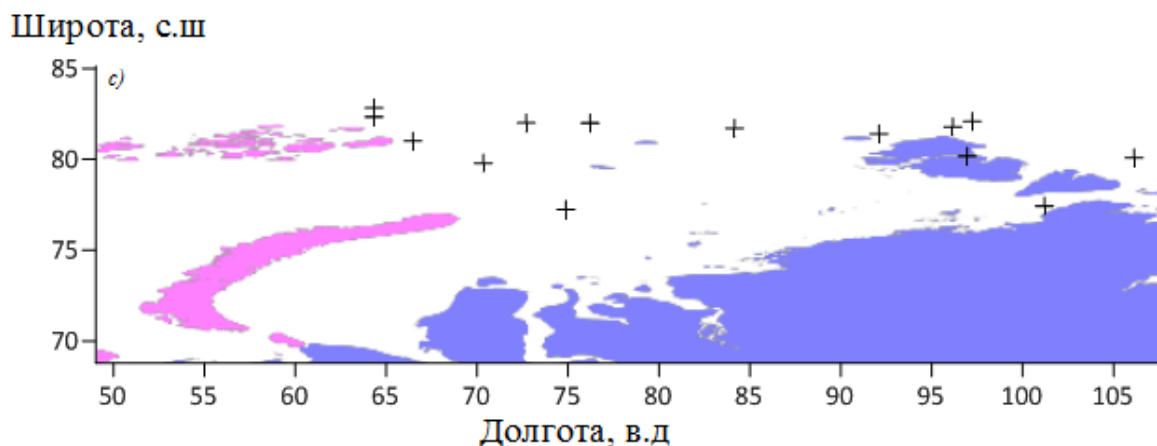


Рисунок 3.1.1 – Распределение станций места отбора проб *а)* за 2018 (август-зеленые крестики, сентябрь-красные) *б)* за май (синие крестики), сентябрь-октябрь (оранжевые крестики) 2019 г., *с)* за август-сентябрь 2021 г.

3.2 Натурные данные

Натурные данные хлорофилла «а» за 2018 и 2019 года были отобраны с помощью батометра по желаемым горизонтам водоема, затем были слиты в пластмассовое ведро и хорошо перемешаны. После этого, нужный объем был перемещен в затемненное место. Во время транспортировки проб до места, они были заморожены при температуре -20°C [50].

Пробы хлорофилла «а» за 2021 год были отобраны с помощью батометра, после этого, хлорофилл содержащий фитопланктон был концентрирован путем фильтрования при низком вакууме через фильтр из стекловолокна.

Далее пигменты экстрагируют из фитопланктона в 90% ацетоне. Полученную взвесь центрифугируют для осветления раствора и измеряют флуоресценцию надосадочной жидкости до и после подкисления, за 2018 и 2019 года на спектрофотометре, за 2021 на фуориметре Тёрнер Дизайнз Трилоджи, после экстракции 90 % ацетоном [51].

Отбор проб фитопланктона с поверхности производился с помощью батометра, далее сливали 1,5 л воды в пластиковые бутылки и фиксировали люголем за 2018 год и часть 2021 и 4 % раствором формалина за 2019 год и 2021. Затем пробы были сконцентрированы до необходимого объема [52].

3.3 Статистические методы

Для оценки репрезентативности полученных значений были построены диаграммы рассеяния между натурными и спутниковыми данными, проводилась проверка методом НСР и представлены графики временной изменчивости выбранных характеристик.

Также, для анализа полученного массива данных были сформированы карты пространственного распределения хлорофилла «а» интерполяционным методом Kriging с помощью программы Surfer 16.

4 Результаты и обсуждения спутниковой части работы

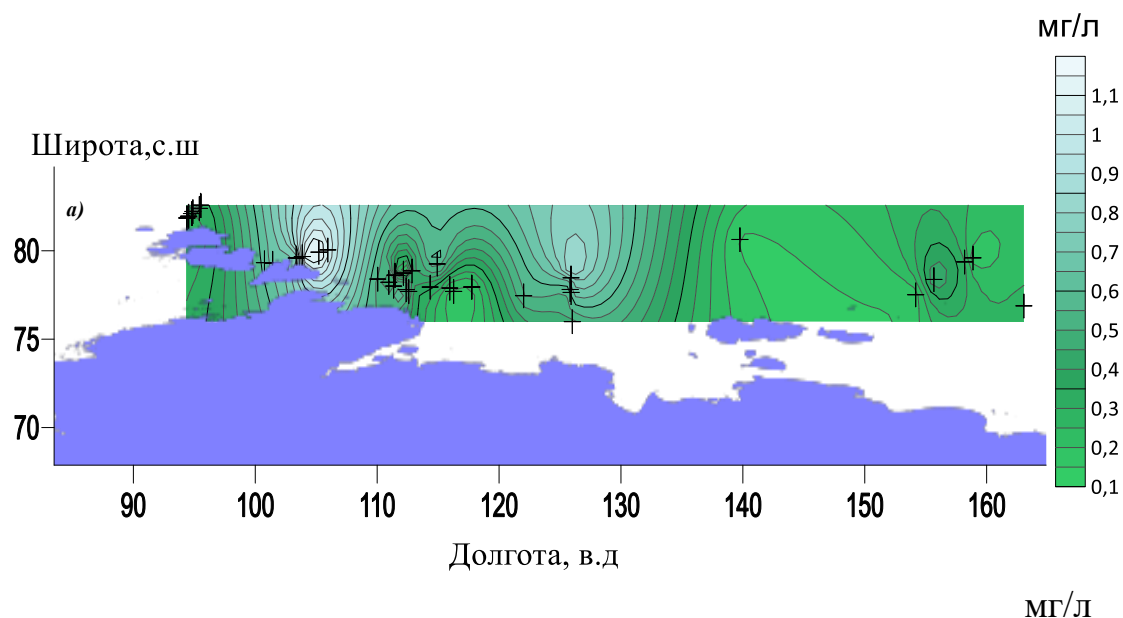
4.1 Пространственное распределение хлорофилла «а» по натурным и спутниковым данным

При построении графиков с помощью программы Surfer-16 был использован метод Kriging. Кригинг является очень гибким методом, он может быть либо точным, либо сглаживающим интерполятором в зависимости от значений параметров. Он позволяет эффективным и естественным образом включать в модель анизотропию и тренды. Если рассматривать только методы интерполяции, которые работают на основе взвешенного усреднения, то кригинг является наилучшим несмещенным предиктором. Метод кригинга дает хорошие результаты для большинства наборов данных, в силу чего является рекомендуемым и выбранным по умолчанию в Surfer [53].

По результатам исследования были построены карты пространственного распределения хлорофилла «а» за указанный период времени. Для построения использовались данные с интерактивной системы Giovanni, а также данные, полученные в ходе трех экспедиций («Арктика 2018», «Трансарктика 2019» и «Арктика 2021»).

Анализируя, полученные данные можно сделать вывод, что далеко не все данные схожи друг с другом, что связано с наличием облачности, но об этом далее.

При сравнительном анализе результатов получилось, что распределение хлорофилла «а» за 2018 год между натурными данными и спутниковыми разное, но совпадения есть в районе 130⁰ восточной долготы (рис.4.1.1).



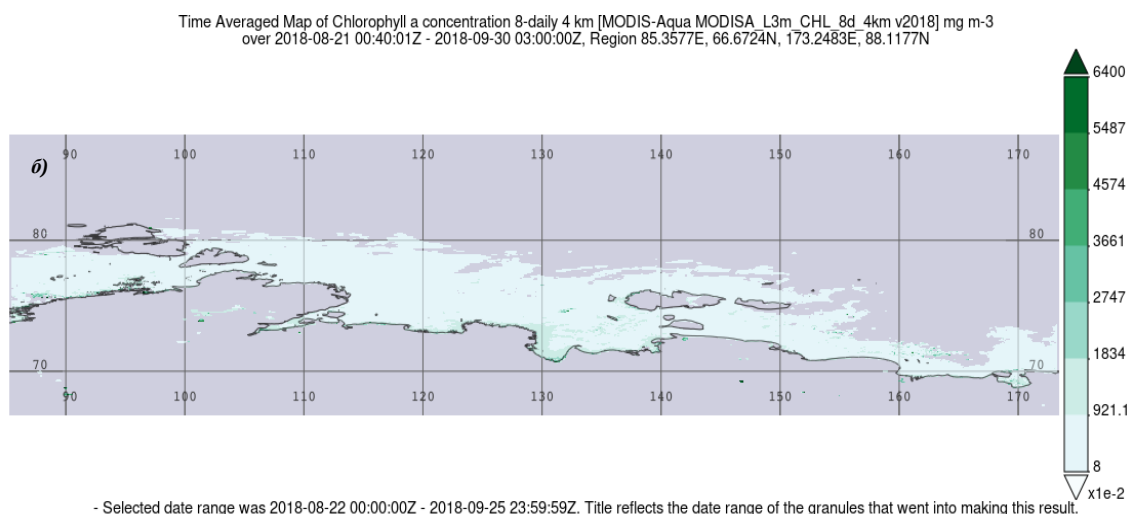
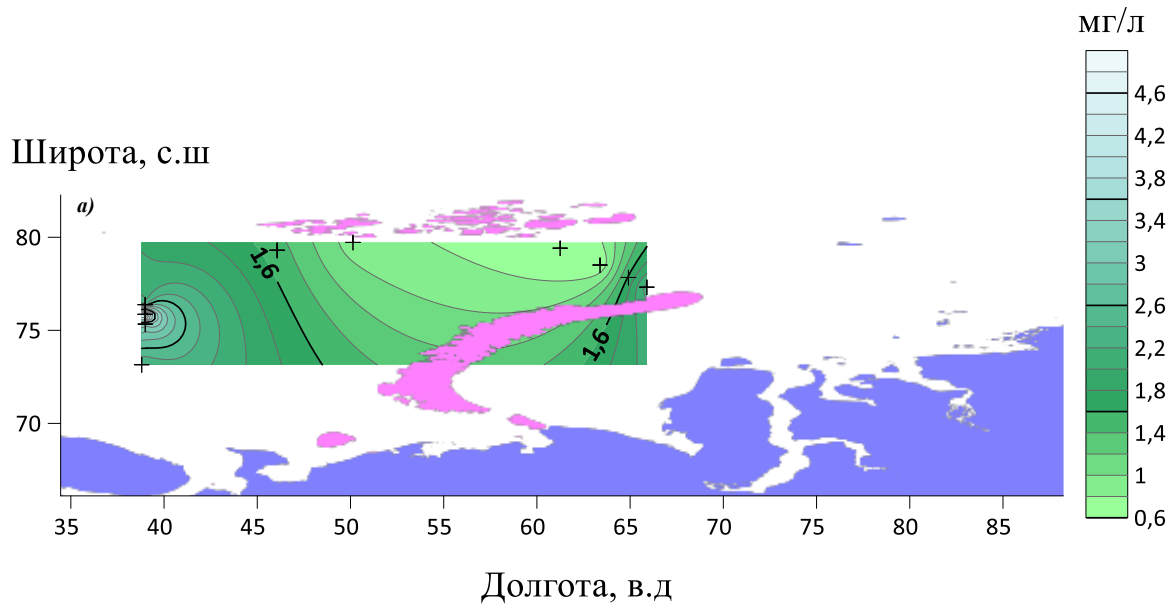


Рисунок 4.1.1– Пространственное распределение хлорофилла «а» на основе а) натуральных данных, б) Giovanni август-сентябрь 2018 г.

Пространственное распределение хлорофилла «а» за май 2019 года по спутниковым данным и натурными имеет совпадения в районе 40° в.д. (рис. 4.1.2).



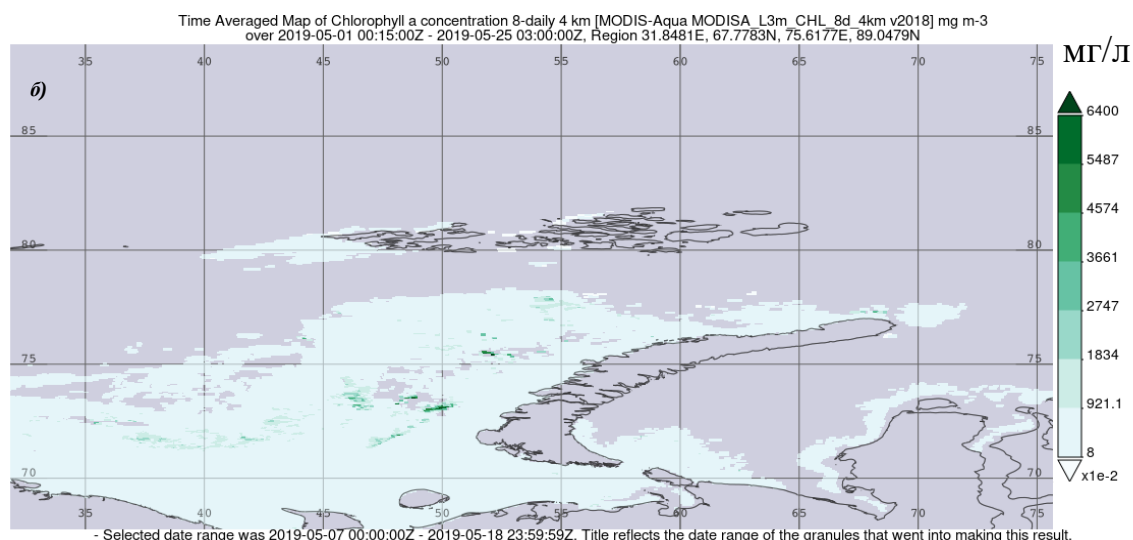
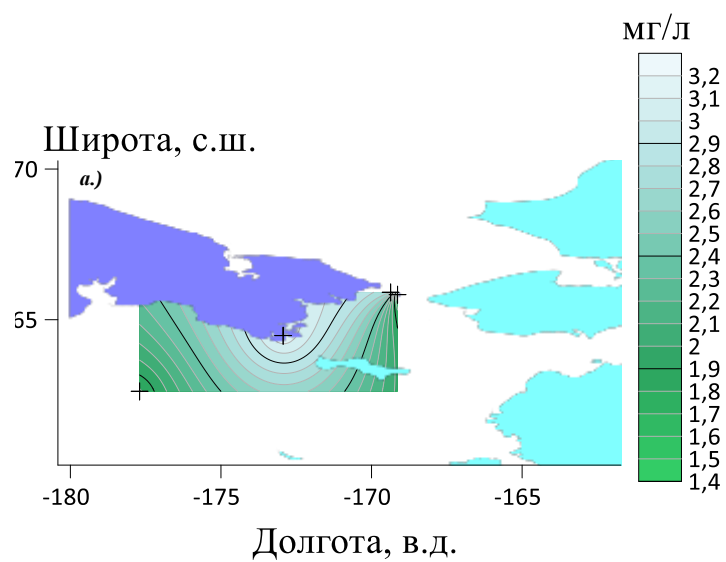
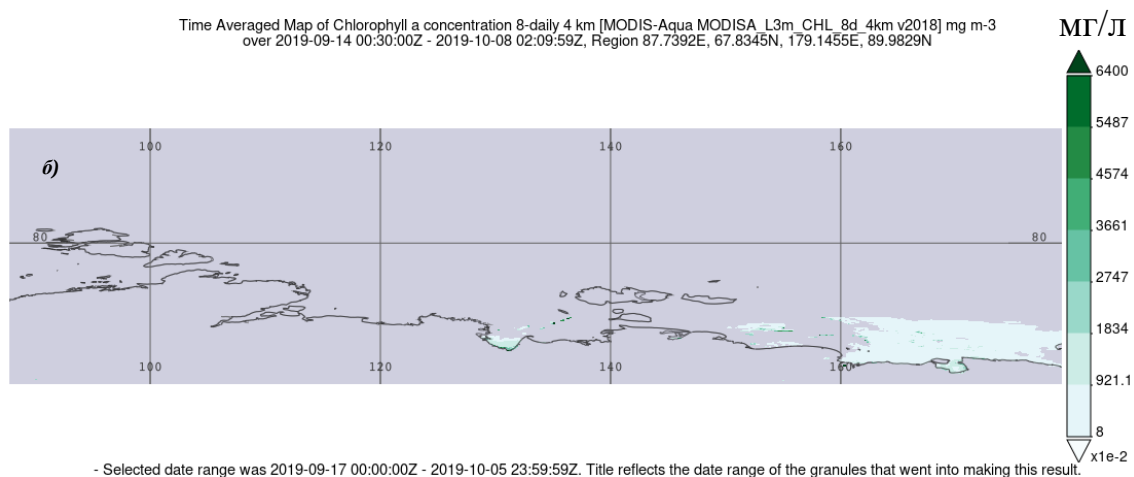
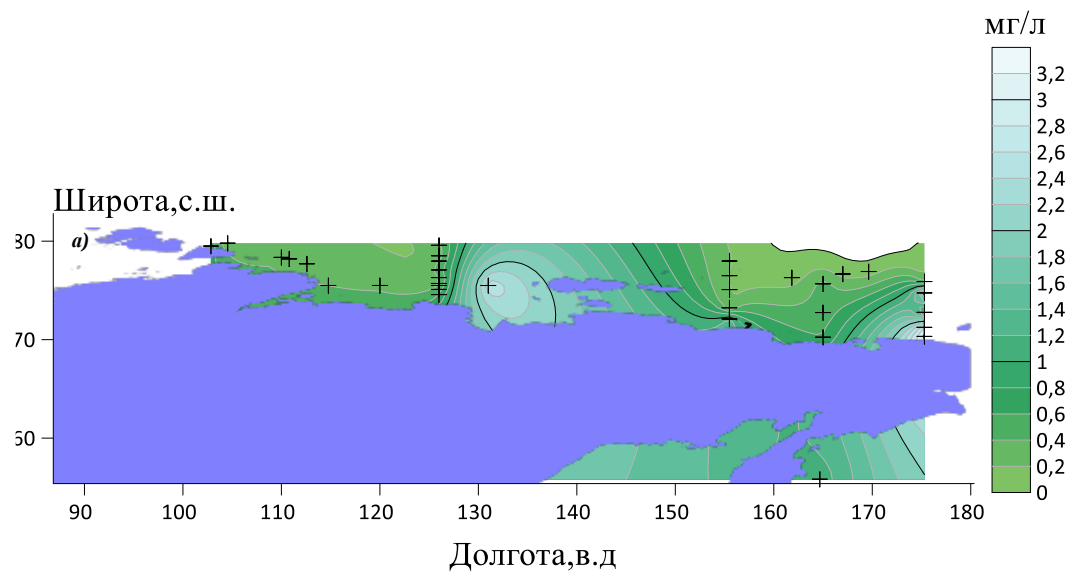


Рисунок 4.1.2– Пространственное распределение хлорофилла «а» на основе а) натуральных данных, б) Giovanni за май 2019 г.

Облачность в весенний период очень низкая в Арктическом регионе, соответственно, открывается больше возможностей проводить спутниковый мониторинг.

В зимний период, который начинается в Арктике в конце сентября- начале октября, облачность имеет решающее значение в искажении или отсутствии спутниковых данных. Именно это мы можем наблюдать в пространственном распределении анализируемого параметра за сентябрь-октябрь 2019 года.

Результаты пространственного распределения концентрации хлорофилла «а» за сентябрь- октябрь 2019 года демонстрируют, что натурные данные с высокими концентрациями хлорофилла «а» расположены в основном между 130⁰ и 140⁰ восточной долготы, примерно от 155⁰ до 175⁰ восточной долготы и между - 175⁰ з.д. и -170⁰ з.д. Значения высоких концентраций хлорофилла «а» по спутниковым данным наблюдаются в области от 130⁰ до 165⁰ в.д.(рис.4.1.3).



Time Averaged Map of Chlorophyll a concentration 8-daily 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL_8d_4km_v2018] mg m-3 over 2019-09-30 00:30:00Z - 2019-10-16 02:35:00Z, Region 179.7998W, 59.7485N, 169.253W, 77.3267N

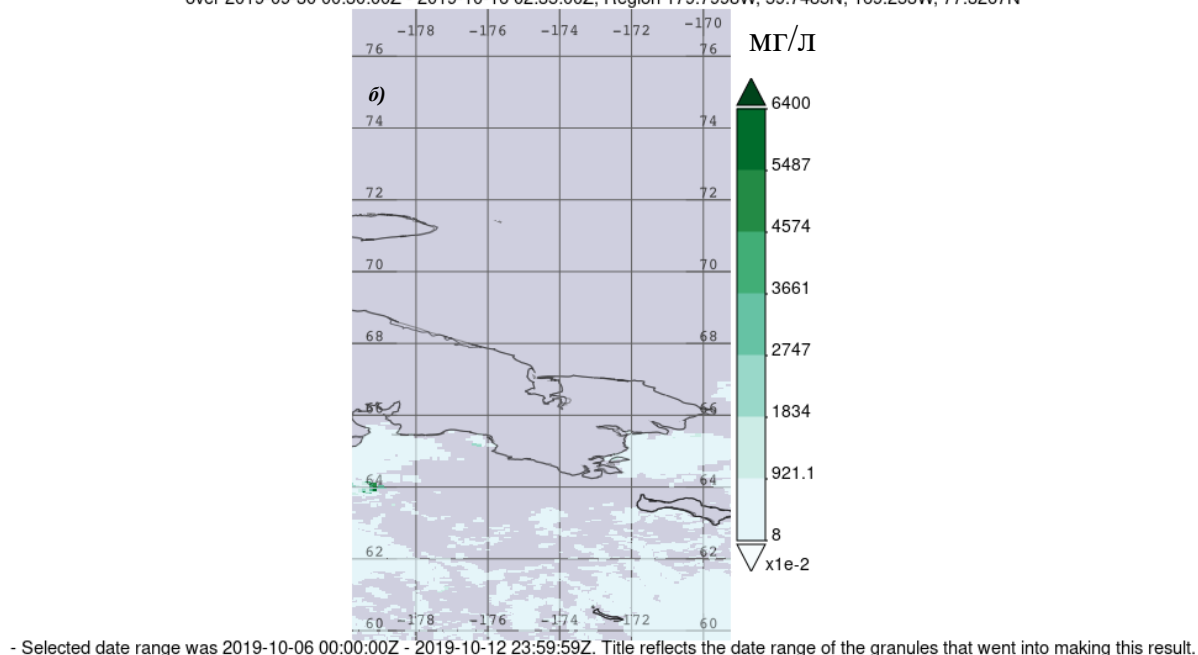
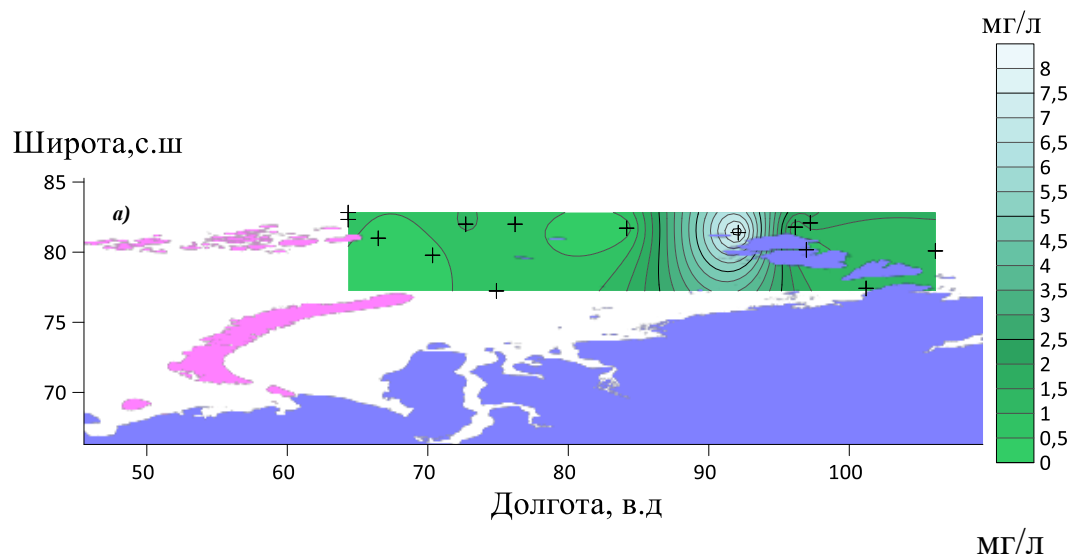


Рисунок 4.1.3– Пространственное распределение хлорофилла «а» на основе а) натуральных данных, б) Giovanni за сентябрь-октябрь 2019 г.

Пространственное распределение высоких концентраций хл-А по натурным данным за август-сентябрь 2021 года наблюдается в районе от 85° до 100° в.д., что совпадает со спутниковыми значениями (4.1.4).



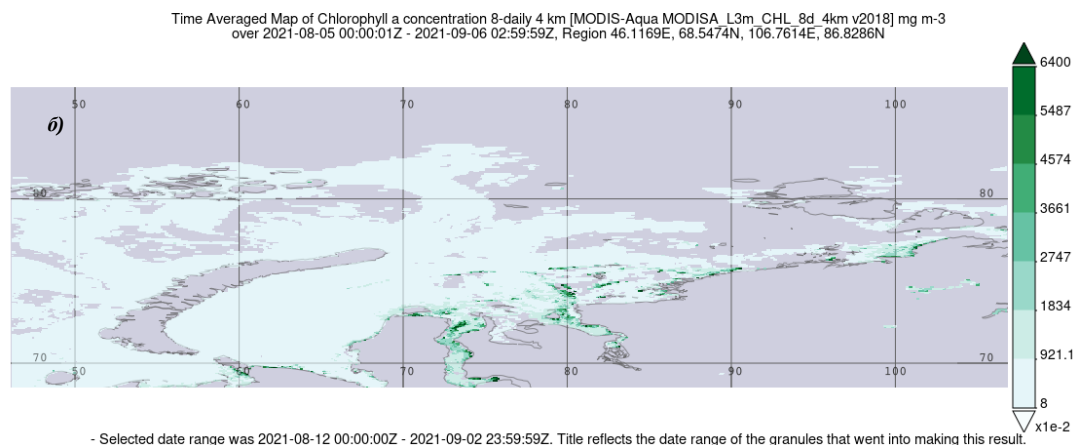


Рисунок 4.1.4– Пространственное распределение хлорофилла «а» на основе а) натуральных данных, б) Giovanni за август- сентябрь 2021 г.

4.2 Диаграмма рассеяния

В ходе дальнейшего анализа исследуемых параметров была построена диаграмма, которая определяет наличие или отсутствие корреляции между выбранными параметрами.

В процессе анализа данных было выявлено, что диаграмма рассеяния за 2018 год показывает наличие слабой связи, замечен большой разброс точек. Коэффициент корреляции равен 0,26, а детерминации 0,13, что меньше 0,7, поэтому можно говорить, что независимых переменных (спутниковые данные) недостаточно для описания дисперсии исходного ряда. Величина достоверной аппроксимации равна 0,084, это много меньше 1, соответственно, линия тренда проходит не через все исходные экспериментальные точки (рис. 4.2.1) [54].

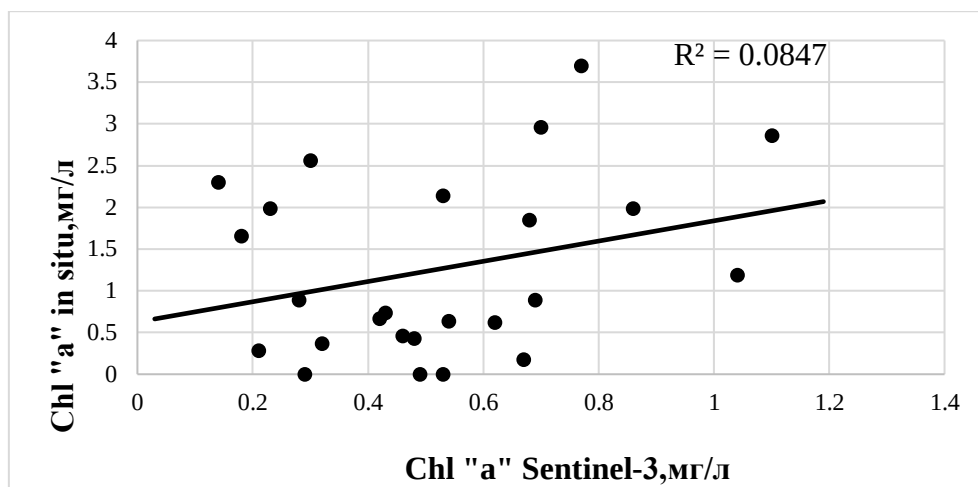


Рисунок 4.2.1– Диаграмма рассеяния за август- сентябрь 2018 года

Экспедиционные данные и спутниковые за май 2019 года демонстрируют иную ситуацию. На диаграмме рассеяния можно наблюдать наличие высокой связи между выбранными параметрами, коэффициент корреляции $R = 0,87$, детерминации $R^2 = 0,67$, а величина аппроксимации $R^2 = 0,75$, присутствуют некоторые выбросы, которые могут быть связаны с завышенными спутниковыми значениями, которые не совпадают с экспедиционными данными (рис. 4.2.2).

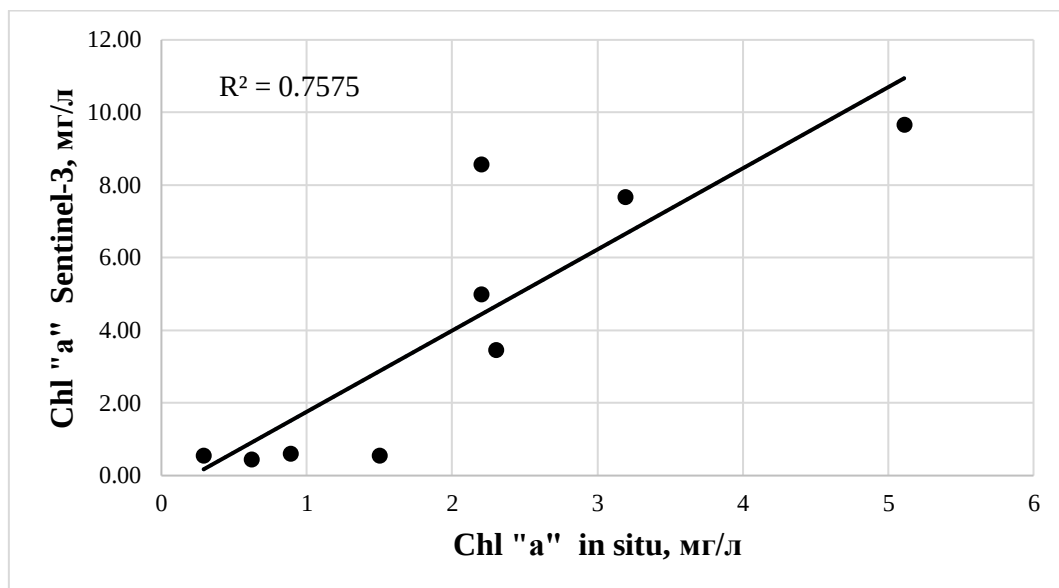


Рисунок 4.2.2– Диаграмма рассеяния за май 2019 года

Данные, полученные в экспедиции за сентябрь-октябрь 2019 года, иллюстрирует очень слабую корреляцию, т.е практически полное отсутствие зависимости между переменными, что подтверждается значениями $R = 0,01$, $R^2 = 0,100$ и величины аппроксимации $= 0,0632$ (рис.4.2.3).

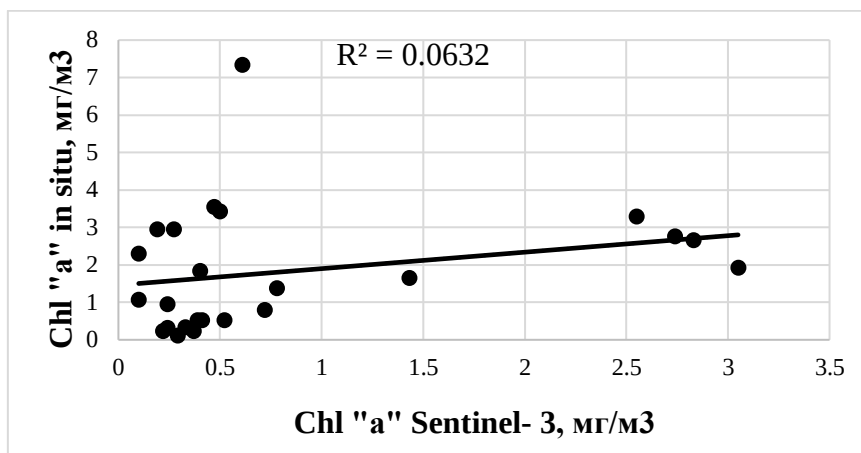


Рисунок 4.2.3– Диаграмма рассеяния за сентябрь-октябрь 2019 года

При анализе данных из экспедиции за август-сентябрь 2021 года можно наблюдать высокую корреляцию между переменными, $R = 0,76$, $R^2 = 0,33$ и величины аппроксимации $= 0,57$. Присутствуют некоторые выбросы (см.рис.3). Так как коэффициент детерминации меньше 0,7, то все- таки можно говорить, что независимых переменных недостаточно для анализа дисперсии исходного ряда (4.2.4).

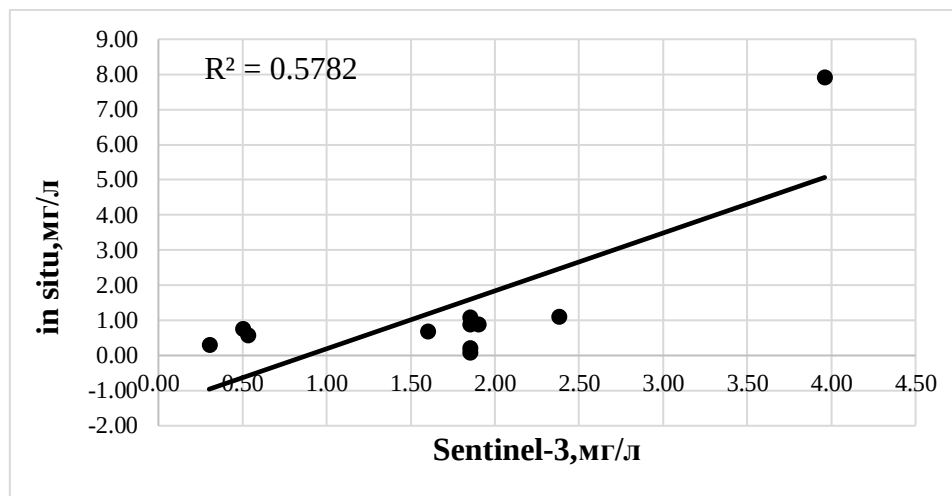


Рисунок 4.2.4– Диаграмма рассеяния за август- сентябрь 2021 года

Можно заметить, что именно в осенне-зимний период (с конца августа по октябрь) наблюдается некорректные спутниковые значения, которые не точно отражают ситуацию в действительности, или же вообще их отсутствие, что конечно же связано с наличием облачности в исследуемой области.

4.3 Временной график изменчивости

Временной график изменчивости использовался, чтобы проследить есть ли схождения во временном ходе выбранных параметров, совпадают ли пики высоких значений хлорофилла «а».

Экспедиционные данные и спутниковые за 2018 год имеют некоторое совпадение во временном ходе изменчивости выбранного параметра (табл. 4.3.1).

Самое высокое значений хлорофилла «а» по спутниковым данным за указанный период было зафиксировано 29 августа 2018 года, что не совпадает с натурными данными Пик высоких концентраций хлорофилла «а» по in situ данным приходится на 24 сентября 2018 г (станция АТ129), у Sentinel-3 значение отсутствует (см. табл. 4.3.1) (рис. 4.3.1).

Таблица 4.3.1–Изменчивость концентрации хлорофилла «а» по спутниковым и натурным данным за 2018 год

	Дата	Концентрация хлорофилла» а», мг/л	Примечание
Sentinel-3	20.09.2018	0,46	точки имеют совпадения во временном ходе
In situ	20.09.2018	0,46	
Sentinel-3	29.08.2018	3,7	пики высоких концентраций хлорофилла "а"
	24.09.2018	-	
In situ	29.08.2018	0,77	
	24.09.2018	1,19	

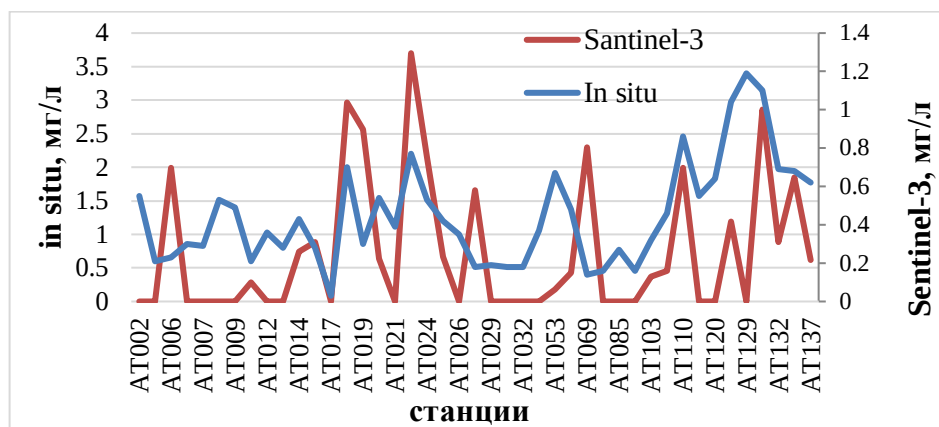


Рисунок 4.3.1– График временной изменчивости в период с августа по сентябрь за 2018 год

В мае 2019 года ситуация изменила. Несмотря на отсутствие некоторых данных, можно говорить о том, что в целом, временной ход совпадает, однако, присутствуют спутниковые значения, которые чуть занижены по сравнению с реальной обстановкой на акватории. Пики высоких концентраций хлорофилла «а» спутниковых и натурных данных схожи и отмечаются 16 мая 2019 г, станция AT19134 (табл. 4.3.2) (рис. 4.3.2).

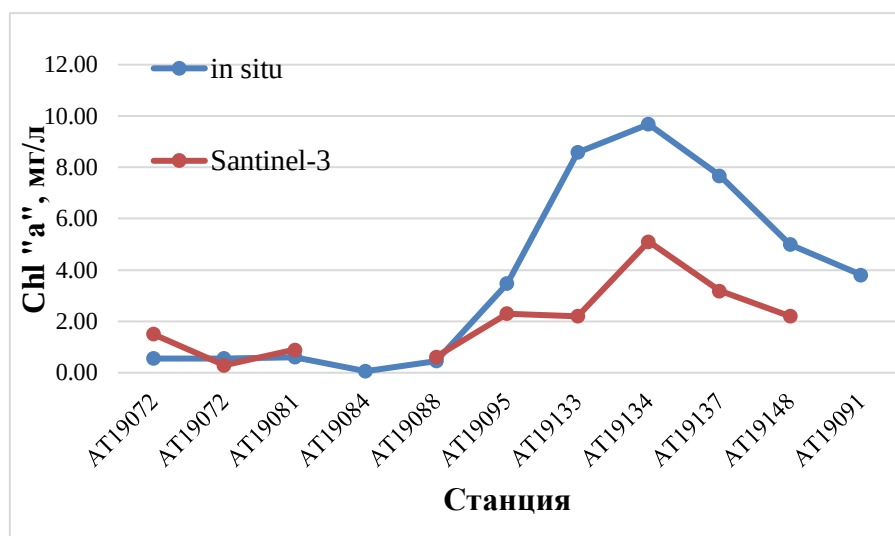


Рисунок 4.3.2– График временной изменчивости за май 2019 года

В Арктическом регионе за период с сентября по октябрь 2019 года график изменчивости выглядит иначе. Можно заметить, что много значений отсутствует, но совпадения все же есть (см.рис.4). Самое высокое значение у спутниковых данных хлорофилла «а» приходится на 1 октября 2019 г, в действительности, на акватории, показатель хлорофилла «а» много меньше, станция ТА19М182 (см. табл. 4.3.2). Пик концентрации исследуемого параметра отмечается в разное время, у натурных данных 8 октября 2019 г., у спутника Sentinel-3 значения равно 1,92 мг/л, станция Provideniya1 (рис. 4.3.3).

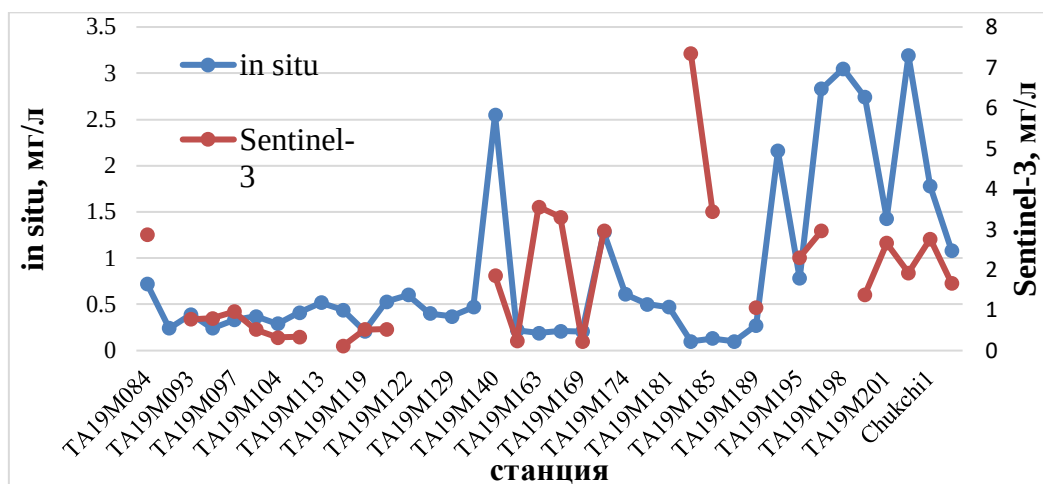


Рисунок 4.3.3– График временной изменчивости в период с сентябрь по октябрь за 2019 год

Таблица 4.3.2–Пики высоких концентраций хлорофилла «а» в Арктическом и Дальневосточном регионе по in situ и спутниковым данным за 2019 год

	Дата	Концентрация хлорофилла «а», мг/л	Примечание
Sentinel-3	16.05.2019	5,11	пики высоких концентраций хлорофилла "а" за май 2019 г.
In situ	16.05.2019	9,68	
Sentinel-3	01.10.2019	7,34	пики высоких концентраций хлорофилла "а" за сентябрь-октябрь 2019 г.
	08.10.2019	1,92	
In situ	01.10.2019	0,1	
	08.10.2019	3,19	

За 2021 год ситуация в целом похожа на 2019 год. Динамика концентрации хлорофилла «а» натурных данных совпадает со спутниковыми, но имеются завышения/занижения значений, а также в некоторых местах отсутствуют данные. Пики высоких концентраций отмечаются 19 августа 2021 г, станция АТ-21-061 (табл. 4.3.3) (рис. 4.3.4).

Таблица 4.3.3–Пики высоких концентраций хлорофилла «а» по in situ и спутниковым данным за август- сентябрь 2021 года

	Дата	Концентрация хлорофилла» а», мг/л
Sentinel-3	19.08.2021	3,96
In situ	19.08.2021	7,93

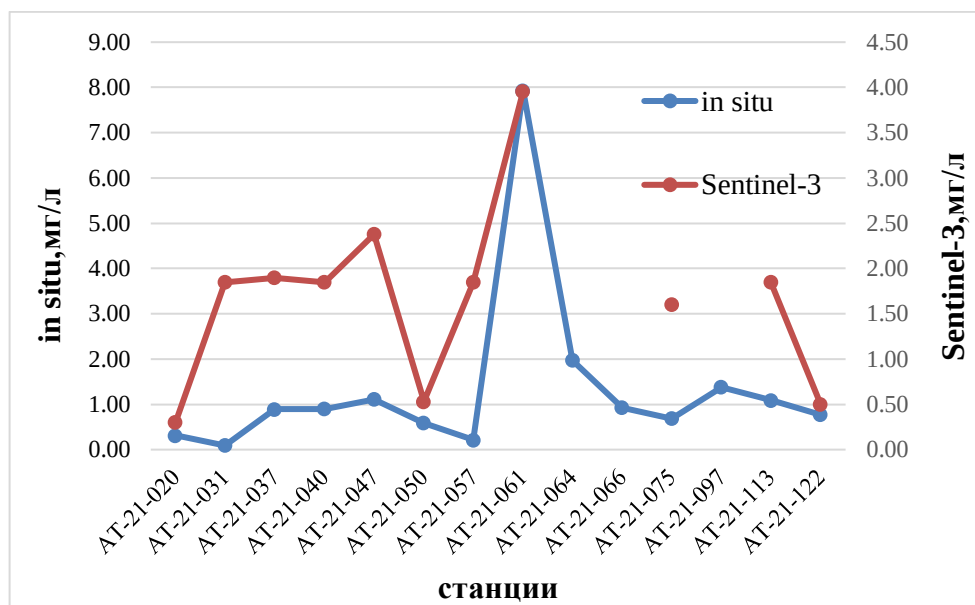


Рисунок 4.3.4– График временной изменчивости в период с августа по сентябрь 2021 г

4.4 Метод НСР

Наименьшая существенная разница (НСР)-это величина, указывающая границу предельным случайным отклонением, выше которой разница считается существенной. Измеряется в тех же единицах, что и изучаемый признак [55].

Данный метод был использован для того, чтобы достоверно, с помощью статистических методов, определить существенна ли разница между натурными и спутниковыми значениями.

Для проверки была задана нулевая гипотеза. Если фактическая разность больше $НСР_{0,5}$ ($d \geq НСР_{0,5}$), то различия существенны, при $d \leq НСР_{0,5}$ – несущественна, где d , это разница между вариантами.

Для демонстрации результатов представлена таблица за август-сентябрь 2018 года и август-сентябрь 2021 г. (табл. 4.4.1).

При анализе полученных данных было выявлено, что разница за 2018 год между натурными и спутниковыми наблюдениями существенная, о чем так же говорят их средние значения: *in situ*- 0,449 мг/л и Sentinel-3 -1,426 мг/л (см.табл.4.4.1).

За май 2019 года различия несущественные, что так же подтверждается высокой корреляцией, о чем было указано выше. Средние значения экспедиционных данных хлорофилла «а» -3,679 мг/л, спутниковые- 2,033 мг/л.

Осенне-зимний период 2019 года показал существенные различия между сравниваемыми параметрами, на что также указывает наличие низкой корреляцию. Среднее значение натурных данных- 0,853 мг/л, Sentinel-3- 1,821 мг/л.

В 2021 году средние значения *in situ*- 1,35 мг/л и Sentinel-3 -1,69 мг/л, различия несущественные (см.табл.4.4.1).

Таблица 4.4.1– Проверка полученных данных методом НСР за: а) 2018, б)2021

<i>а)</i>	Натурные	Sentinel-3
Ср.знач chl, мг/л	0,449	1,426
S	0,268	1,020
Sx	0,041	0,218
Sd	0,221	
t5%	1,99	
НСР, мг/л	0,44	
d, мг/л	0,805	
Итог	d>НСР	
Вывод	Различия существенные	

<i>б)</i>	Натурные	Sentinel-3
Ср.знач chl, мг/л	1,35	1,69
S	1,96	1,02
Sx	0,52	0,31
Sd	0,61	
t5%	2,06	
НСР, мг/л	1,25	
D, мг/л	0,34	
Итог	d<НСР	
Вывод	Различия несущественные	

4.5 Влияние облачности

Спутниковые снимки были получены с двух сайтов Sentinel Hub и Landsat-8. Использовались в основном каналы 4-3-2, которые представляют видимую часть спектра, т.е «естественный цвет». Сами каналы демонстрируют определенные цвета: 4- красный, 3- зеленый, 2 синий, при слиянии которых получается «естественный цвет» снимков [56].

Так же для визуализации атмосферной обстановки над акваторией использовались усредненные по времени дневные среднесуточные карты облачности, полученные по спутниковым данным в сервисе 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 9 км.

Эти данные были получены в ходе преобразования результатов ежесуточной съемки поверхности Земли, которые представляются в виде осредненных значений параметра за месяц для каждой ячейки Мирового Океана, с размером 9×9 км.

Доля облачности определяется как количество облачных пикселей, деленное на общее количество пикселей. Максимальное значение доли облачности равно 1.

Он также относится к площади неба, которая, по оценкам, покрыта определенным типом облаков (перистые, инверсионные, перисто-слоистые, кучевые и т. д.), фазой облачных частиц (водяные, ледяные, жидкие, смешанные), высотой облаков (низкие, средние, высокая) или по всем типам облачности (общая доля облачности) [57].

Пространственное распределение за 2018 год демонстрирует наличие достаточно высокого балла облачности что видно на рисунке 4.5.1 Такой балл облачности вполне объясняет практически полное отсутствие корреляции между натурными и спутниковыми данными.

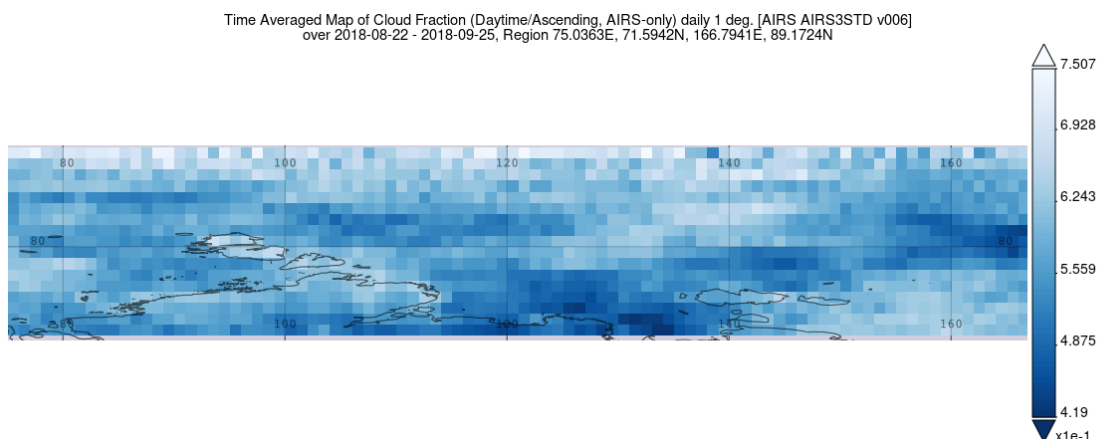


Рисунок 4.5.1–Пространственное распределение облачности за август-сентябрь 2018 года

За май 2019 года в некоторых местах также преобладает высокий балл облачности, но в целом, можно сказать, что в местах отбора проб, преобладает средний балл облачности, за исключением острова Новая Земля (рис. 4.5.2).

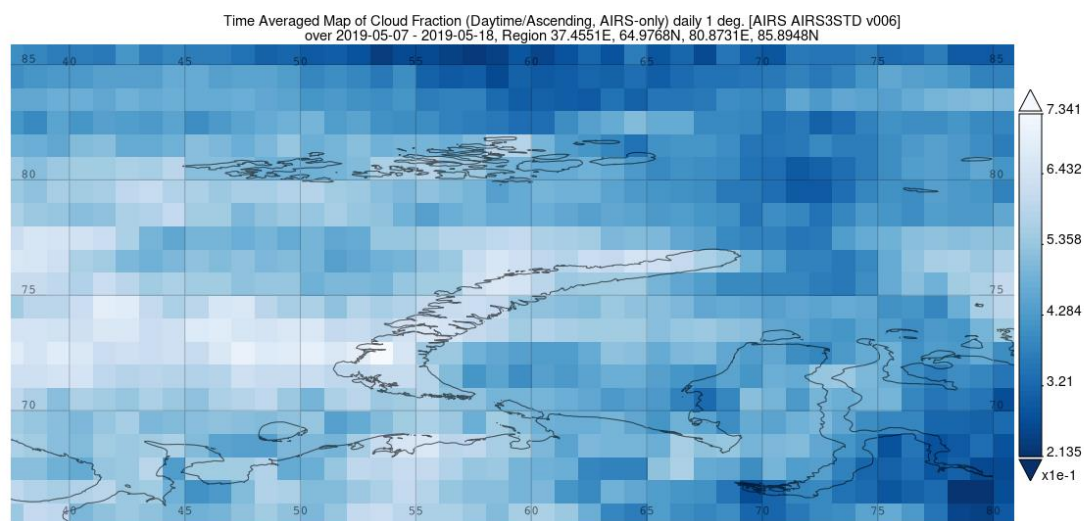


Рисунок 4.5.2–Пространственное распределение облачности за май 2019 года

В Арктическом регионе за сентябрь-октябрь 2019 года наблюдается высокая доля облачности, что также оказывается влияние на качество и количество спутниковых данных, в следствии чего, наблюдается практически полное отсутствие корреляции (см. пункт 4.2) (рис. 4.5.3).

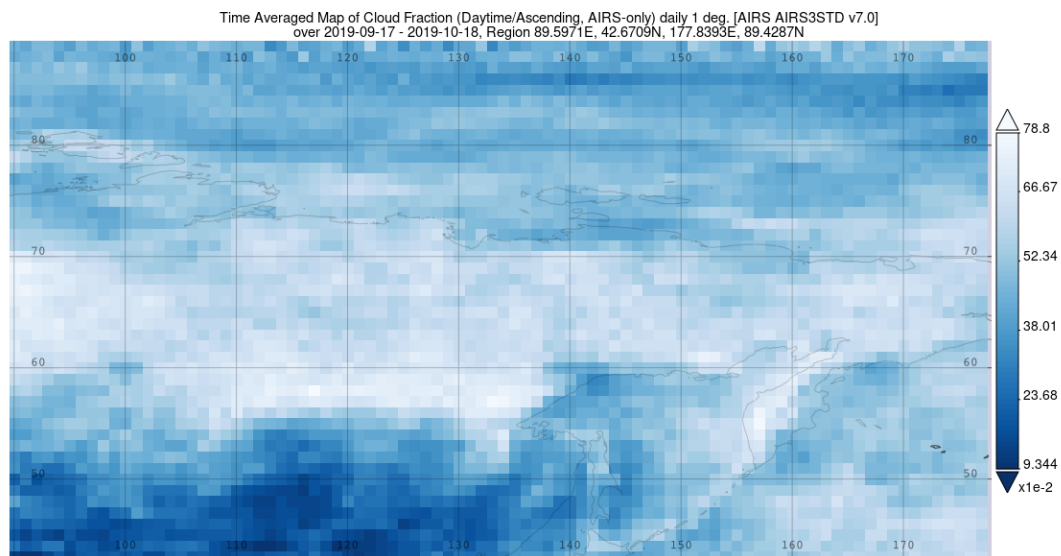


Рисунок 4.5.3–Пространственное распределение облачности за сентябрь-октябрь 2019 года.

На карте пространственного распределения за август-сентябрь 2021 года видно, что доля облачности в некоторых местах высокая, но в основном преобладает средний балл над акваторией, что так же подтверждается несущественными различиями средних значений натурных и спутниковых данных, а также наличием заметной тесноты связи, при построении диаграммы рассеяния (рис.4.5.5).

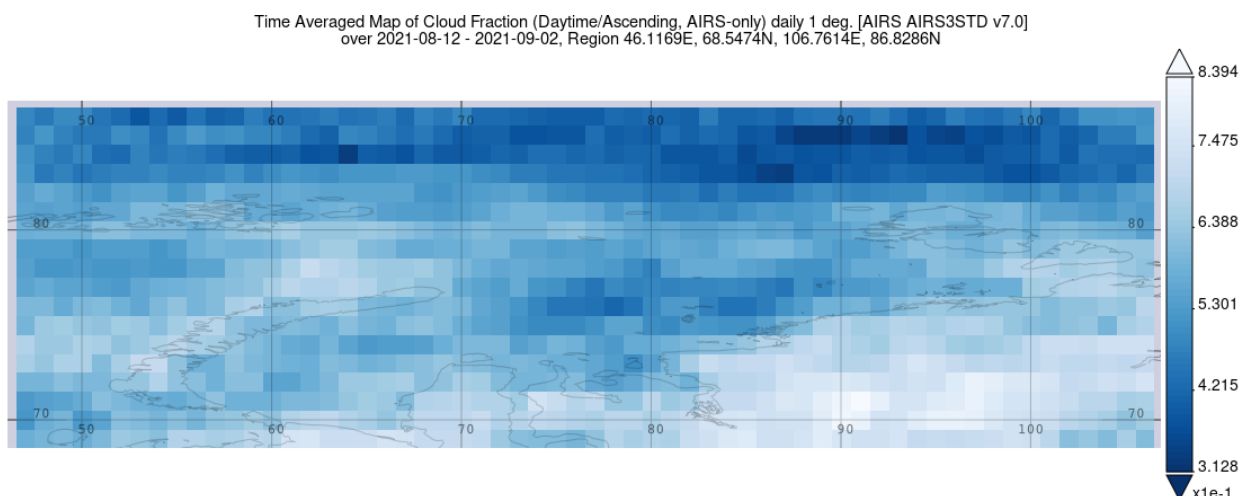


Рисунок 4.5.5–Пространственное распределение облачности за август-сентябрь 2021 года, в районе Карского и Лаптевых морей

Как уже было сказано выше, облачность является основной причиной отсутствия или искажения полученных данных со спутников.

На рисунке 4.5.6 представлено наглядное влияние облачности на показатели хлорофилла «а» полученных со спутника Sentinel-3 (рис. 4.5.6, табл. 4.5.1).

Точка 1 находится в зоне влияния облачности, что, естественно, отражается на полученных результатов хлорофилла «а»: натурные 0,68 мг/л, Sentinel-3 1,85 мг/л. Точка 2, наоборот находится на периферии облачности, что позволяет получить более точную информацию: натурные 0,62 мг/л, Sentinel-3 0,62 мг/л (см. табл. 4.5.1).

Над станцией с координатами 77,426⁰с.ш. и 101,196⁰ в.д. за 2021 год, где над акваторией преобладает облачность, также заметно искажение данных со спутника (in situ-1,09 мг/л, Sentinel-3-1,85 мг/л) (рис.4.5.7).

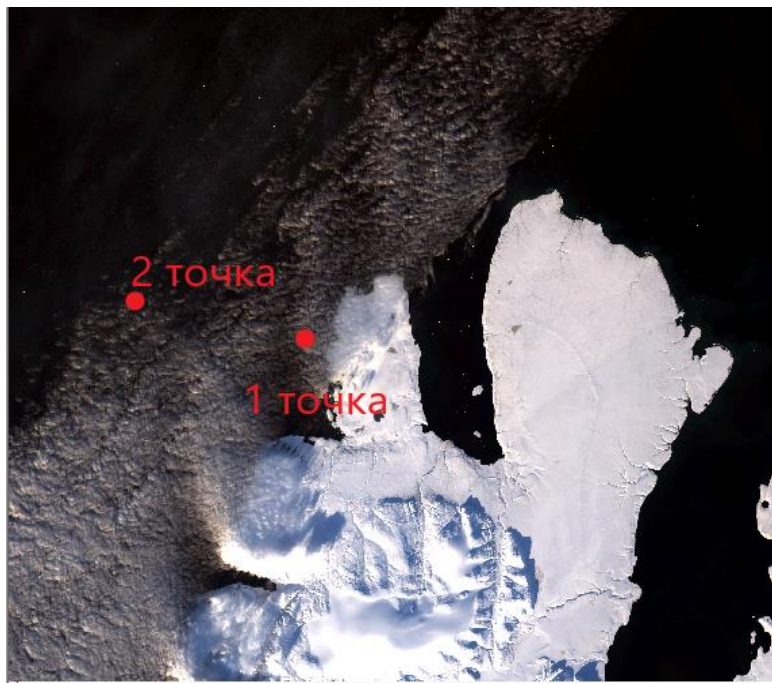


Рисунок 4.5.6—Цветосинтезированное изображение 4-3-2 по данным спутника Landsat-8 за 25.09.2018 г, в районе Северной Земли

Таблица 4.5.1—Экспедиционные значения хлорофилла «а» и спутниковые

	Дата	Широта, с.ш	Долгота, в.д	Натурные, мг/л	Sentinel-3, мг/л
1 точка	25.09.2018	79,296	101,428	0,68	1,85
2 точка	25.09.2018	79,328	100,753	0,62	0,62

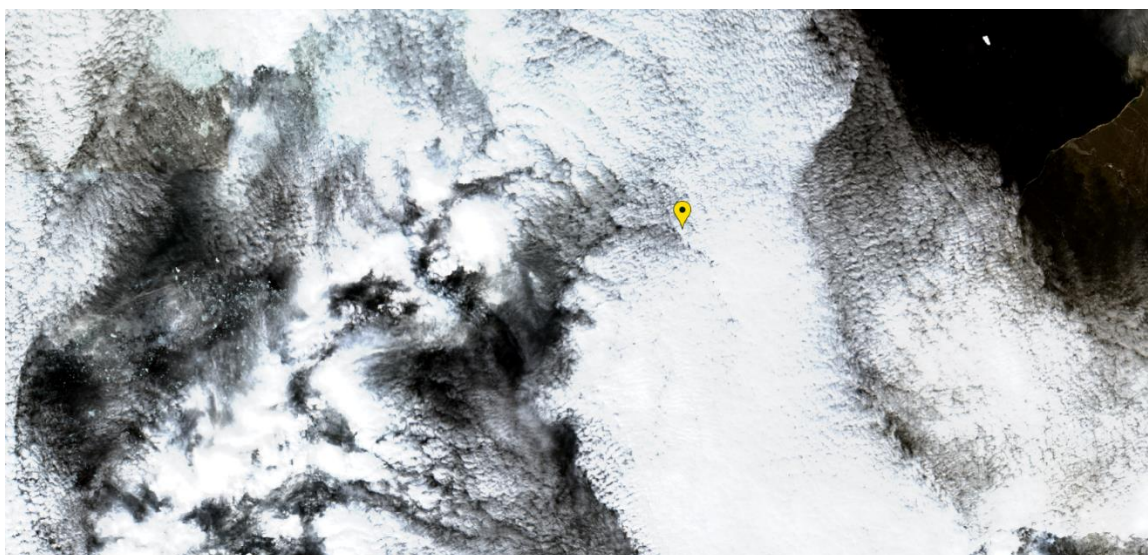


Рисунок 4.5.7– Цветосинтезированное изображение 4-3-2 по данным спутника Sentinel-3 OLCI, за 31.08.2021 в районе Северной Земли.

5 Биопродуктивность морей

5.1 Видовое разнообразие

В ходе проделанной работы были обработаны пробы фитопланктона, которые были отобраны в ходе экспедиций за 2018, 2019 и 2021 год.

Исходя из проанализированных проб были получены данные о видовом разнообразии фитопланктона Арктических морей, а также о его биомассе.

В 2018 году, для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского были отмечены 3 преобладающих класса водорослей: динофитовые, диатомовые и зеленые (рис.5.1.1). Среди диатомовых водорослей чаще всего встречался вид *Thalassiosira* и *Cyclotella*, динофитовых: *Gymnodinium* (рис.5.1.2).



Рисунок 5.1.1– Повторяемость классов фитопланктона за 2018 год

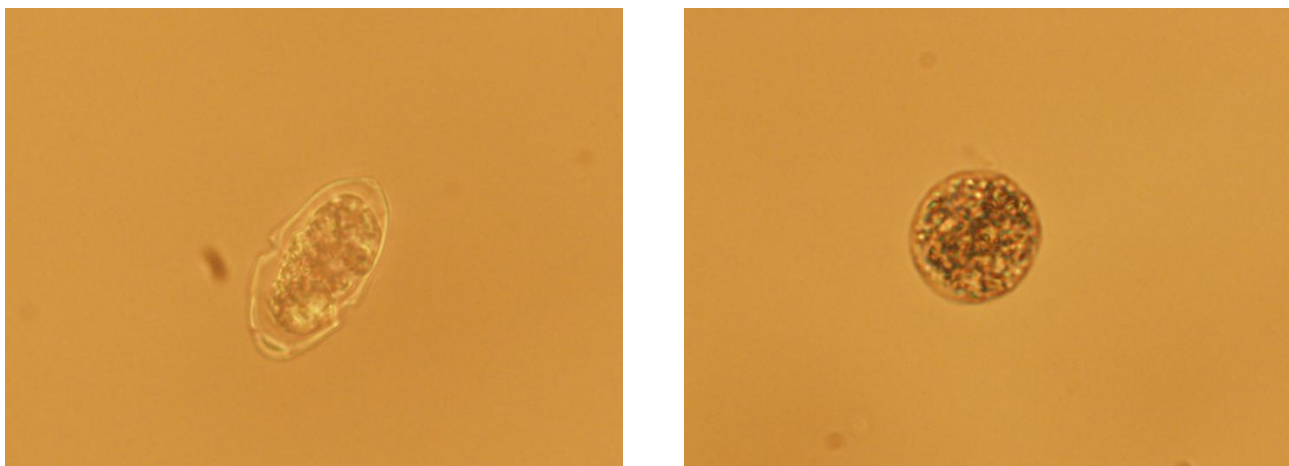


Рисунок 5.1.2– Видовое разнообразие за 2018 год, класс: динофитовые, вид: *Gymnodinium*, станция АТ18-019 (слева), класс: зеленые, станция АТ18-051(справа), море Лаптевых

При анализе видового разнообразия за 2019 год в Баренцевом, Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Беринговом морях было выявлено также 3 класса: диатомовые (вид *Cyclotella* и *Navicula*), динофитовые (вид *Dinophysis*, *Pendinium*, *Gymnodinium*) и зеленые (рис. 5.1.3) (рис.5.1.4, 5.1.5).



Рисунок 5.1.3– Повторяемость классов фитопланктона за 2019 год

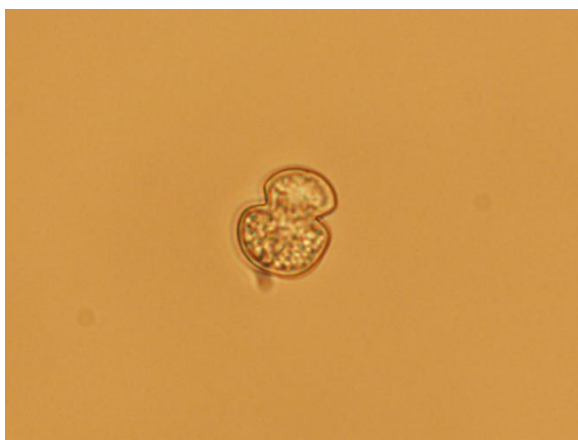


Рисунок 5.1.4 – Видовое разнообразие за 2019 год, класс: динофитовые, вид: *Gymnodinium*, станция Bering2 (слева), класс: диатомовые, вид: *Navicula*, станция TA19M189 (справа), Берингово море



Рисунок 5.1.5 – Видовое разнообразие за 2019 год, класс: динофитовые, вид: *Dinophysis* TA19M189, Берингово море

В 2021 году аналогичная ситуация, отмечается 3 преобладающих класса для Баренцева, Карского и Лаптевых морей: диатомовые (вид: *Thalassiosira*), динофитовые (вид: *Gymnodinium*, *Peridinium*), зеленая (вид: *Cosmarium*) (рис.5.1.6), (рис. 5.1.7, 5.1.8).



Рисунок 5.1.6– Повторяемость классов фитопланктона за 2021 год

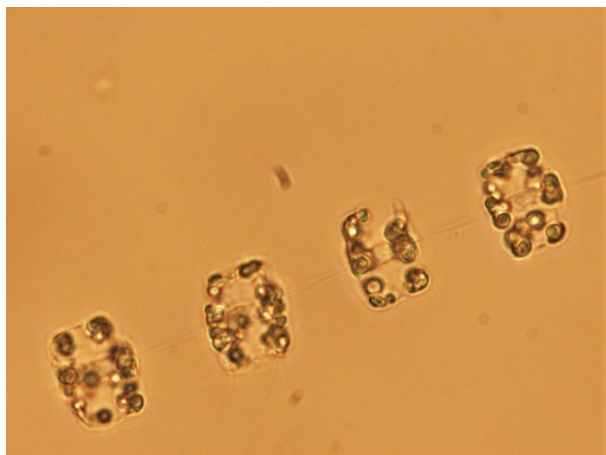
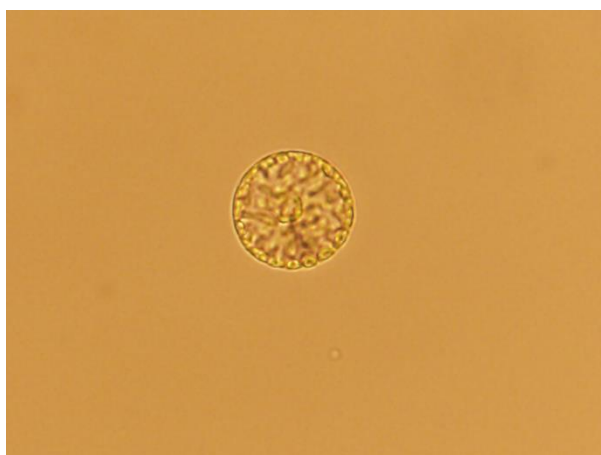


Рисунок 5.1.7 – Видовое разнообразие за 2021 год, класс: диатомовые, вид: *Thalassiosira*, станция AT21-050, Карское море (слева) и AT21-097, море Лаптевых (справа)

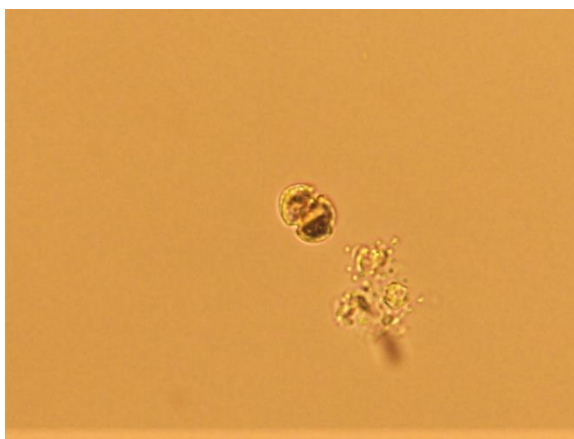


Рисунок 5.1.8 – Видовое разнообразие за 2021 год, класс: динофитовые, вид: *Gymnodinium*, станция АТ21-050, Карское море

5.2 Биомасса фитопланктона

Биомасса фитопланктона была определена счетно-весовым методом. В основе данного метода лежит определение объема клеток водорослей, затем форму клетки приравнивают к какой-либо геометрической фигуре и по формулам из стереометрии вычисляют их объем. При этом плотность фитопланктона принимают равной единице. Чаще всего, массовые виды водорослей имеют форму шара, цилиндра, эллипсоида и др.

При расчете биомассы фитопланктона средний объем организма каждого вида умножают на численность организма данного вида. Безусловно, приравнивание к геометрическим фигурам условно, поэтому выбранная фигура должна как можно точнее соответствовать форме исследуемой клетки [58].

Расчет биомассы фитопланктона за 2018 год показал очень низкое значение, в среднем в море Лаптевых она равна 0,014 мг/л, а среднее значений хлорофилла «а» 0,372 мг/л (табл. 5.2.1). Для Восточно-Сибирского моря биомасса равна 0,031 мг/л, а хлорофилл «а» 0,35 мг/л (табл. 5.2.2).

При оценке трофического статуса водоема на основе биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла «а» было определено, что море

Лаптевых и Восточно-Сибирское относятся к олиготрофным водам (по Китаеву, 1984 г).

При сравнении биомассы фитопланктона с хлорофиллом «а», можно заметить, что значения практически не совпадают и наблюдается обратная слабая корреляция $R=-0,205$, что говорит о том, что наличие высокого или низкого значения хл-А не обязательно будет согласовываться с увеличением/уменьшением биомассы фитопланктона в море, что, собственно, и можно наблюдать.

Во временном ходе изменчивости также можно наблюдать, что пики высоких концентраций хлорофилла «а» не совпадают с высокими значениями биомассы фитопланктона, временной ход в основном находится в противофазе, однако, в некоторых местах имеются совпадения, где оба параметра описывают друг друга, но значения биомассы занижены по сравнению с концентрацией хлорофилла «а» (рис.5.2.1).

Таблица 5.2.1–Расчет биомассы фитопланктона в море Лаптевых за 2018 год

Море Лаптевых			
Станция	Численность	Биомасса, мг/л	Хлорофилл "а", мг/л
АТ-18-008	25,000	0,005	0,530
АТ180-003	1,000	0,001	0,21
АТ18-002	94,000	0,017	0,55
АТ18-004	248,000	0,013	0,3
АТ18-014	13,000	0,009	0,43
АТ18-007	20,000	0,015	0,29
АТ18-129	10,000	0,006	0,27
АТ18-023	15,000	0,004	0,77
АТ18-019	237,000	0,085	0,28
АТ18-013	6,500	0,002	0,3
АТ18-135	2,000	0,003	0,68
АТ18-069	8,000	0,001	0,14
АТ18-051	27,000	0,05	0,37
АТ18-018	3,000	0	0,7
АТ18-006	5,500	0,004	0,23

Море Лаптевых			
АТ18-009	1,000	0,001	0,49
АТ18-016	пусто	пусто	0,28
АТ18-017	пусто	пусто	0,03
АТ18-021	пусто	пусто	0,39
Ср.знач, мг/л	44,75	0,014	0,372

Таблица 5.2.2–Расчет биомассы фитопланктона в Восточно-Сибирском море за 2018 год

Восточно-Сибирское море			
Станция	Численность	Биомасса,мг/л	Хлорофилл "а", мг/л
АТ18-106	4,000	0,003	0,460
АТ18-103	6,000	0,006	0,320
АТ18-085	21,500	0,022	0,270
Ср.знач, мг/л	10,5	0,031	0,35

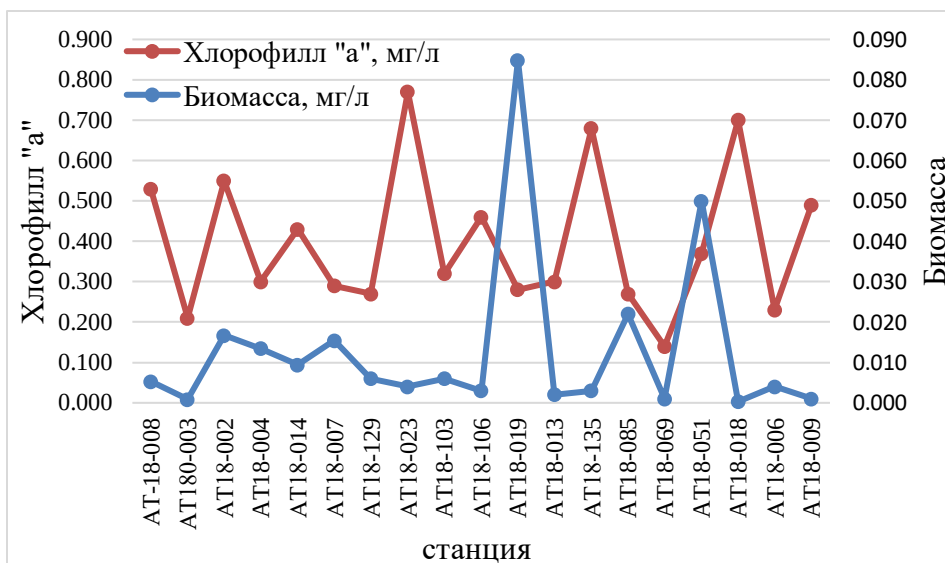


Рисунок 5.2.1– Временной ход изменчивости хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона за 2018 год

В 2019 году ситуация похожа на предыдущий год, среднее значение биомассы фитопланктона для Баренцева моря 0,036 мг/л, а хлорофилла «а» 1,032 мг/л, для моря Лаптевых 0,014 мг/л, хлорофилла «а» 0,505 мг/л, Восточно-

Сибирское 0,026 мг/л, хлорофилл «а» 0,73 мг/л, Чукотское море 0,009 мг/л, хлорофилл «а» 1,78 мг/л и Берингово море имеет биомассу 0,044 мг/л, хлорофилл «а» 1,8 мг/л (табл.5.2.3).

Трофический статус указанных выше морей по биомассе фитопланктона классифицируется, как олиготрофные воды (по Китаеву, 1984 г).

По концентрации хлорофилла «а» во всех морях воды определяются как олиготрофные (по Китаеву, 1984 г)

Коэффициент корреляции также имеет слабую обратную связь $R = -0,254$. Временной график изменчивости также демонстрирует несовпадение высоких значений выбранных параметров, которые в основном находятся в противофазе, за исключением некоторых станций (рис.5.2.2).

Таблица 5.2.3 – Расчет биомассы фитопланктона за 2019 год

Баренцево море			
Станция	Численность	Биомасса, мг/л	Хлорофилл "а", мг/л
АТ19-088	4	0,008	0,46
АТ19-072	6	0,001	0,56
АТ19-095	22,5	0,008	3,47
АТ19-081	29	0,014	0,61
АТ19-084	186	0,151	0,06
Ср.знач. мг/л	49,5	0.036	1.032
Море Лаптевых			
ТА19М100	8	0,016	0,37
ТА19М113	17	0,013	0,52
ТА19М107	1	0,005	0,41
ТА19М084	6	0,023	0,72
Ср.знач. мг/л	8	0.014	0.505
Восточно-Сибирское море			
ТА19-М160	5,5	0,089	0,22
ТА19М169	3	0,029	0,21
ТА19М172	2	0,01	1,28
ТА19М174	5,5	0,011	0,61
ТА19-177	15,5	0,042	0,5
ТА19М192	2	0,001	2,16
ТА19-185	3	0,004	0,13
ТА19М189	пусто	пусто	0,27
Ср.знач. мг/л	5	0.026	0.73

Чукотское/Берингово море			
TA19M199	6	0,024	2,74
Chukchi	1	0,009	1,78
providenia	6	0,01	3,19
Bering3	44	0,131	1,08
Bering2	27	0,013	0,26
Ср.знач. мг/л	17	0.037	1.81

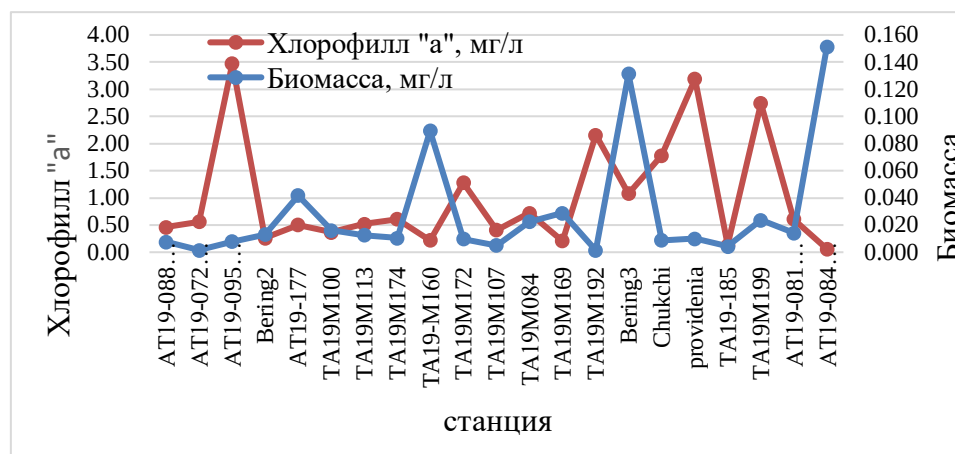


Рисунок 5.2.2– Временной ход изменчивости хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона за 2019 год

Совершенно иную ситуацию можно наблюдать в 2021 году. Среднее значения биомассы фитопланктона для Баренцева моря 0,067 мг/л, концентрация хлорофилла «а» 2,79 мг/л, для Карского моря 0,196 мг/л, концентрация хлорофилла «а» 2,5 мг/л и для моря Лаптевых 0,116 мг/л, концентрация хл-А 4,29 мг/л. Коэффициент корреляции имеет прямую заметную связь $R=0,625$ (табл. 5.2.4).

Трофический статус водоема по биомассе фитопланктона характеризуется, как олиготрофный. По концентрации хлорофилла «а» Баренцево и Карское море относится к олиготрофным водам, а Лаптевых к мезотрофным (по Китаеву, 1984 г).

Во временном ходе также есть изменения по сравнению с другими годами. Пики высоких значений хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона совпадают и

в целом, указанные характеристики практически полностью согласовываются друг с другом во временном ходе, за исключением некоторых мест (рис.5.2.3).

Таблица 5.2.4 – Расчет биомассы фитопланктона за 2021 год

Баренцево море			
Станция	Численность	Биомасса, мг/л	Хлорофилл "а", мг/л
AT21-031	33,000	0,069	2,130
AT21-037	113,000	0,121	4,980
AT21-040	8,000	0,013	1,260
Ср.знач. мг/л	51	0,067	2,79
Карское море			
AT21-020	137,000	0,284	3,450
AT21-047	373,000	0,735	6,920
AT21-050	12,500	0,036	0,57
AT21-061	56,000	0,114	3,280
AT21-122	4,000	0,004	0,51
AT21-057	7,000	0,006	0,51
Ср.знач. мг/л	98	0,196	2,5
Море Лаптевых			
AT21-064	26,000	0,129	1,570
AT21-066	173,500	0,323	12,130
AT21-075	10,000	0,011	0,69
AT21-097	281,500	0,041	6,000
AT21-113	112,500	0,077	1,090
Ср.знач. мг/л	603	0,116	4,29

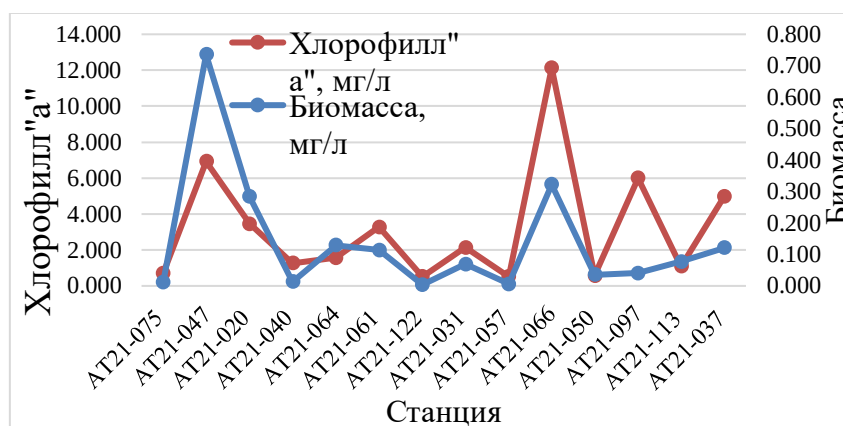


Рисунок 5.2.3– Временной ход изменчивости хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона за 2021 год

6 Заключение

6.1 Выводы по спутниковой части

При сравнении пространственного распределения хлорофилла «а» в Арктических морях по спутниковым и натурным данным было выявлено, что использование ДЗЗ видимого и ближнего зондирования ИК- диапазонов для автономного мониторинга акватории возможно, но при условии малой облачности, либо отфильтровывая некорректные значения. Максимальное значение хлорофилла «а» по натурным и спутниковым данным было зафиксировано в мае 2019 года, концентрация была равна 9,68 мг/л, у Sentinel-3- 5,11 мг/л.

Из-за большой доли облаков в осенне-зимний период в районе Арктики, количество данных может сократиться, либо отсутствовать, но в целом, увидеть общую картину распространения хлорофилла «а» возможно используя спутниковые снимки. Если же необходимы числовые значения заданного параметра, то данных может быть недостаточно из-за атмосферных явлений.

Говорить о влиянии оРОВ на результаты практически невозможно, т.к. снимки в большинстве случаев покрыты облаками.

Так же можно проводить дополнительную атмосферную коррекцию, либо самостоятельно производить слияние двух спутников, например, Sentinel-1 и Sentinel-2, которые будут лучше проходить сквозь облачность и давать более корректные значения кхл (концентрация хлорофилла «а»).

6.2 Выводы о биопродуктивности морей

В ходе проделанной работы была рассчитана биомасса и определены основные виды фитопланктона Арктических морей.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что Арктический регион не обладает высокой биопродуктивностью, что вполне логично, учитывая климатические особенности данного региона. В основном было выделено 3 преобладающих класса водорослей (диатомовые, динофитовые и зеленые).

Высокие значения биомассы отмечаются довольно редко, поэтому нельзя говорить о том, что такое явление распространено повсеместно, скорее это какие-то локальные скопления водорослей. То же самое можно сказать про концентрацию хлорофилла «а», которая имеет высокие значения только в некоторых местах и не вызывает каких-либо негативных изменений в акватории.

Самые большие значения биомассы отмечаются в 2021 году- 0,735 мг/л и ему соответствует значение хлорофилла «а»- 6,920 мг/л (станция АТ21-047) и АТ21-066, где биомасса равна 0,323 мг/л, хл-А-12,130 мг/л.

Все моря по биомассе фитопланктона были отнесены к олиготрофным водам. По концентрации хлорофилла «а» также практически все моря (Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Берингово) были отнесены к олиготрофным, за исключением моря Лаптевых в 2021 году, где статус вод определяется как мезотрофный.

Значения хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона за 2018 и 2019 год плохо согласуются друг с другом, что может быть связано с качеством проб, учитывая их срок давности. За 2021 год указанные характеристики достаточно хорошо описывают друг друга, что опять же может быть связано с качеством самих проб.

Список литературы

1. Швед Я.В. Сравнительная оценка результатов мониторинга показателей концентрации хлорофилла «а» по данным спутников и *in situ* в арктических морях// Материалы 19-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», Институт космических исследований Российской академии наук, 2021. С. 295
2. Будущее Арктики РФ. – Климат в Арктике. 2016 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://xn----8sbbmfaxaqb7dzafb4g.xn--p1ai/klimat-arktiki/> (дата обращения: 25.02.2022).
3. Природа России. – Моря Тихого океана [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.rospriroda.ru/rossiya/okeyny_morya/morya-tihogo-okeana (дата обращения: 28.02.2022).
4. Кочеткова Е.С., Козлов И.Е., Дайлидиене И., Смирнов К.Г. Спутниковые методы в океанографии// Учебное пособие. - СПб, изд. РГГМУ, 2014. С.18-36.
5. Тишков А.А., Белоновская Е. А., Кренке А.Н., Титова С.В., Царевская Н.Г. Изменения биологической продуктивности наземных экосистем российской Арктики в XXI в. 30 сентября 2020 г. [Электронный ресурс]– Режим доступа: <http://www.arctica-ac.ru/docs/journals/41/izmeneniya-biologicheskoy-produktivnosti-nazemnyh-ekosistem-rossiyskoy-arktiki-v.pdf> (дата обращения: 30.02.2022)
6. Biological productivity in the Arctic Ocean: past, present and future response to climate variations, and impacts on carbon fluxes, the marine food web and local human communities. 2014 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://anr.fr/Project-ANR-14-CE01-0017> (дата обращения: 05.03.2022)
7. Owen Mulhern. –How Satellites Help Tackle Climate Change. ноябрь 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://earth.org/data_visualization/how-satellites-help-tackle-climate-change/ (дата обращения: 05.03.2022)

8. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.isprs.org/publications/archives.aspx> (дата обращения: 10.03.2022)

9. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его методология // Океанология, 2000. Т. 40. No 1. С. 148–155.

10. Tianxing Wang, Jiancheng Shi, Husi Letu, YaMa, Xingcai Li, Yaomin Zheng. AGU. Detection and Removal of Clouds and Associated Shadows in Satellite Imagery Based on Simulated Radiance Fields. 2018 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2018JD029960> (дата обращения: 10.03.2022)

11. Wesley Jeremiah Moses. – Satellite-based estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. 2009 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=natresdiss#page=18&zoom=100,0,0> (дата обращения: 15.03.2022)

12. Гительзон И.И., Чепилов В.В. Изучение водных экосистем дистанционными оптическими методами // Методические основы комплексного экологического мониторинга океана. М.: Гидрометеиздат, 1988. С. 230–259.

13. Костикова А. Gis Lab. – Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+. 2005 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (дата обращения: 15.03.2022)

14. Горшков М.В. Аэрокосмический мониторинг и данные дистанционного зондирования// Учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. – 313 с.

15. Геометрическая коррекция, орторектификация, регистрация изображений, радиационная калибровка, радиационная коррекция, атмосферная коррекция, подробное объяснение концепции коррекции местности [Электронный

ресурс] – Режим доступа: <https://russianblogs.com/article/2690241670/> (дата обращения: 20.03.2022)

16. Костикова А. Gis Lab. –Атмосферная коррекция данных Landsat/ETM+ (COST метод). 2006 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/atcor.html> (дата обращения: 20.03.2022)

17. Лысенко С.А. Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых снимков на основе аппроксимационной модели переноса солнечного излучения//Оптика атмосферы и океана, 30 № 9, 2017

18. ESA. – Computation of Aerosol Parameters [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-synergy/level-2/computation-of-aerosol-parameters> (дата обращения: 27.03.2022)

19. Деревенская О.Ю. Методы оценки качества вод по гидробиологическим показателям: учебно-методическая разработка по курсу «Гидробиология»; – Казань: КФУ, 2015. – 44 с.

20. Бульон В.В. Первичная продукция и трофическая классификация водоемов //Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб: Гидрометеиздат, 1993. С. 147-157.

21. Неверова-Дзиопак, Е. Оценка трофического состояния поверхностных вод: монография; СПбГАСУ. – СПб., 2020. – 176 с.

22. Бульон В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. СПб.: Наука, 1994. 222-225 с.

23. Факторы, влияющие на развитие фитопланктона [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://studbooks.net/1771342/geografiya/factory_vliayuschie_razvitie_fitoplanktona (дата обращения: 07.04.2022)

24. Евангелеева, Д. С. Факторы, влияющие на интенсивность развития фитопланктона поверхностных водоисточников// Актуальные проблемы строительства: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции

студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3-х частях, Санкт-Петербург, 04–06 апреля 2018 года / Ответственный редактор Е. Н. Волошина. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 56-61.

25. Баренцево море. – Физико-географическое положение [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://russia.1pku.ru/index.php/nature/morya-i-okeany/morya/56-barentsevo-more/6-barentsevo-more> (дата обращения: 15.04.2022)

26. Academic. – Barents Sea [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/28141#Ecology> (дата обращения: 15.04.2022)

27. Britanica. – Barents Sea [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.britannica.com/place/Barents-Sea> (дата обращения: 23.04.2022)

28. Большая российская энциклопедия. – Баренцево море [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/862483> (дата обращения: 28.04.2022)

29. Britanica. –Kara Sea. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.britannica.com/place/Kara-Sea> (дата обращения: 01.05.2022)

30. Житина Л.С., Ильяш Л.В. Состав и обилие фитопланктона Байдарацкой губы Карского моря в летний и осенний период// Вестник Московского университета, серия 16. Биология.2013. № 2

31. WorldAtlas. – Kara Sea [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.worldatlas.com/seas/kara-sea.html> (дата обращения: 05.05.2022)

32. Большая российская энциклопедия. – Карское море [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/2049073> (дата обращения: 11.05.2022)

33. Море Лаптевых [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://obrazovaka.ru/geografiya/more-laptevyyh.html> (дата обращения: 15.05.2022)

34. Суханова И. Н., Флинт М. В., Георгиева Е.Ю., Ланге Е. К., Кравчишина М. Д., Демидов А.Б., Недоспасов А.А., Полухин А.А. Структура сообществ

фитопланктона в восточной части моря Лаптевых // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 86–102.

35. Георгиев А.А., Георгиева М.Л. Диатомовые водоросли фитопланктона юго-западной части моря Лаптевых в августе 2017 г. // Вопросы современной альгологии. 2019. №2 (20). С. 111–115.

36. Laptev's economic activity. Laptevih sea. Laptev Sea Flora and Fauna [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kvartiraidoma.ru/en/documents/hozyaistvennaya-deyatelnost-morya-laptevyyh-more-laptevyyh-flora-i-fauna-morya.html> (дата обращения: 25.05.2022)

37. Большая российская энциклопедия. – Море Лаптевых [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/2133445> (дата обращения: 25.05.2022)

39. Восточно-сибирское море [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://geographyofrussia.com/vostochno-sibirskoe-more-2/> (дата обращения: 29.05.2022)

40. Орлов А.М. Бензик А.Н., Ведищева Е.В., Горбатенко К.М., Горянина С.В., Зубаревич В.Л., Кодрян К.В., Носов М.А., Орлова С.Ю., Педченко А.П., Рыбаков М.О., Соколов А.М. Предварительные результаты рыбохозяйственных исследований в Восточно-Сибирском море на НИС «Профессор Леванидов» в сентябре 2019 г.// Труды ВНИРО, 2020. Т. 179. С. 10

41. Большая российская энциклопедия. – Восточно-Сибирское море [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/5287994> (дата обращения: 02.06.2022)

42. Географическое положение и границы Берингова моря [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://esimo.oceanography.ru/esp1/index.php?sea_code=7 (дата обращения: 04.06.2022)

43. Лепская, Е. В. Фитопланктон отдельных локальностей Берингова моря и Тихого океана в сентябре 2020 г // Сохранение биоразнообразия Камчатки и

прилегающих морей : Материалы XXII международной научной конференции, посвященной 120-летию со дня рождения известного камчатского учёного-ихтиолога, одного из организаторов регулярных исследований биологии и состояния запасов морских промысловых рыб у берегов Камчатки, почётного гражданина Петропавловска-Камчатского к.б.н. И.А. ПолUTOва, Петропавловск-Камчатский, 17–18 ноября 2021 года. – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2021. – С. 147-151.

44. WorldAtlas. – Bering Sea [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.worldatlas.com/seas/bering-sea.html> (дата обращения: 04.06.2022)

45. Большая российская энциклопедия. – Берегового море [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/1860284> (дата обращения: 05.06.2022)

46. Eumetsat. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:SENTINEL3:OL_2_WRR__NR_T?query=Sentinel-3%20ocean%20colour&s=advanced (дата обращения: 10.12.2021)

47. Sentinel Hub. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.sentinel-hub.com/> (дата обращения: 10.01.2022)

48. United States Geological Survey: EarthExplorer. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 10.09.2021)

49. EarthData: Giovanni. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni> (дата обращения: 13.12.2021)

50. ГОСТ 17.1.4.02-90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «а». - Введ. 01.01.91 - Институтом океанологии АН СССР, соисполнитель - Гидрохимический институт Госкомгидромета СССР

51. Arar, E. J. AND G. B. COLLINS. Method 445.0 In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1997.

52. Методы оценки экологического состояния водоемов море [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://edu.greensail.ru/monitoring/methods/vodorosli.shtml> (дата обращения: 06.06.2022)

53. Мальцев К.А., Мухарамова С.С. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета SURFER)// Учебное пособие. – Казань: Казанский университет, 2014. С. 43-46.

54. Орлов А.И. Ошибки при использовании коэффициентов корреляции и детерминации. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018.С.69-70.

55. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере//2-е изд. Новосибирск, 2012. С.100-102.

56. Геопространственное агентство «Иннотер» [Электронный ресурс] – Режим доступа: innoter.com (дата обращения: 06.06.2022)

57. EarthData: Giovanni Measurement Definitions: Cloud Fraction [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://disc.gsfc.nasa.gov/information/glossary?keywords=giovanni%20measurements&title=Giovanni%20Measurement%20Definitions:%20Cloud%20Fraction> (дата обращения:15.03.2022)

58. ECO portal. – Методы биоиндикации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ecoportal.su/public/geo/view/1696.html> (дата обращения: 08.06.2022)

Приложение А

Таблица А.1 – Проверка полученных данных методом НСР за май 2019 г

	Натурные	Sentinel-3
Ср.Знач chl, мг/л	3,679	2,033
S	3,608	1,481
Sx	1,088	0,494
Sd	1,195	
t _{5%}	2,09	
НСР, мг/л	2,49	
d, мг/л	1,646	
Итог	d<НСР	
Вывод	Различия несущественные	

Таблица А.2 – Проверка полученных данных методом НСР за сентябрь-октябрь 2019 г

	Наземные	Sentinel-3
Ср.Знач chl, мг/л	0,85	1,82
S	0,92	1,61
Sx	0,15	0,32
Sd	0,35	
t _{5%}	1,99	
НСР, мг/л	0,70	
d, мг/л	0,97	
Итог	d>НСР	
Вывод	различия существенные	



Рисунок А.1—Цветосинтезированное изображение 4-3-2 по данным спутника Sentinel-3 OLCI за 24.09.2018 г. в районе о. Северная Земля



Рисунок А.2—Цветосинтезированное изображение 4-3-2 по данным спутника Sentinel-2 L2A за 19.08.2021 г. в районе о. Шмидта

Приложение Б



Рисунок Б.2– Видовое разнообразие за 2021 год, класс: диатомовые, станция
АТ21-047

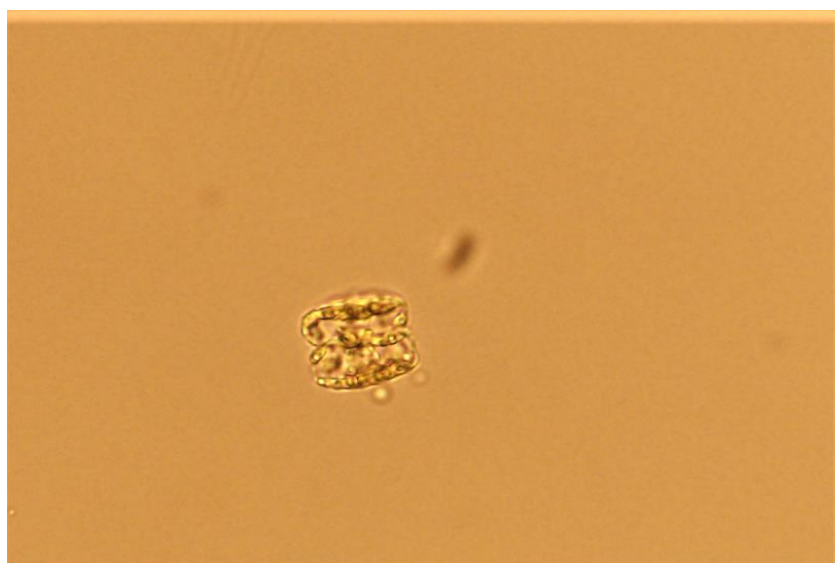


Рисунок Б.3– Видовое разнообразие за 2021 год, класс: диатомовые, станция
АТ21-050

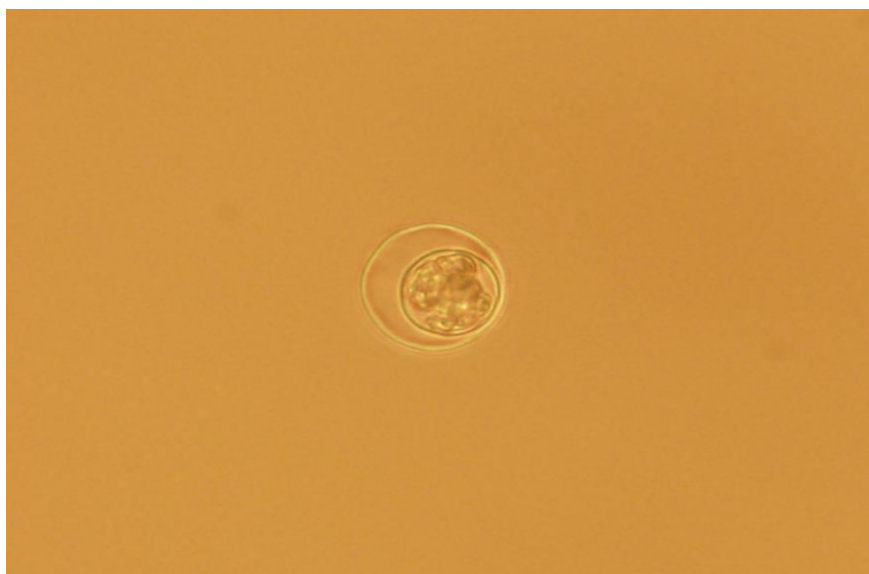


Рисунок Б.4— Видовое разнообразие за 2018 год, класс: зеленые, станция АТ18-019

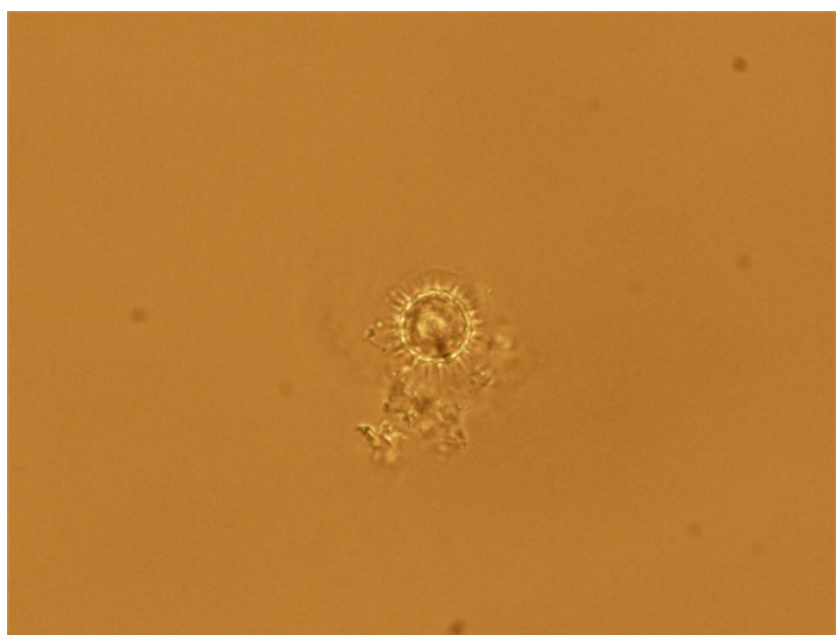


Рисунок Б.5— Видовое разнообразие за 2018 год, класс: эвгленовые, станция АТ18-019