



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

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

«БИОПРОДУКТИВНОСТЬ КАРСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА»

Исполнитель: Зеленева Татьяна Павловна, студентка группы ПО-М19-1-8
Научный руководитель: канд. геогр. наук, доцент, Чанцев Валерий Юрьевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«18» июня 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

Оглавление

Введение	3
1 Физико-географическое описание региона Карского моря	6
1.1 Морфология Карского моря	6
1.2 Водные массы	9
1.3 Климатические особенности	11
1.4 Термохалинная структура	14
1.5 Ледовые условия	16
2 Условия формирования первичной продукции	19
2.1 Факторы, лимитирующие первичную продукцию	20
2.2 Роль хлорофилла «а» в определении первичной продукции	25
2.3 Антропогенное воздействие на первичную продукцию	27
2.4 Влияние первичной продукции на динамику промысловых видов рыб	29
3 Исходные данные и методы анализа	33
3.1 Исходные данные	33
3.2 Кросс-корреляционный анализ	38
3.3 Кластерный анализ	39
3.4 Спектральный анализ	44
4 Межгодовая изменчивость биопродуктивности Карского моря	47
4.1 Кросс-корреляционный анализ первичной продукции Карского моря	47
4.2 Кластерный анализ первичной продукции Карского моря	53
4.3 Районирование Карского моря	55
4.4 Спектральный анализ первичной продукции Карского моря	62
Заключение	78
Список использованной литературы	80
Приложения	86

Введение

Актуальность работы. Рациональное использование биологических ресурсов является одной из актуальных проблем в океанологии, особенно, в условиях изменения климатических условий. Решение этой проблемы основывается на изучении биопродукционных характеристик морских экосистем и мониторинге их состояния.

Воздействие климатических условий на моря арктического региона в последние десятилетия становится все более заметно, так как экосистемы этих морей очень чувствительны к малейшим изменениям, что отражается на экологической и экономической обстановке Арктики. Результаты исследования позволяют увидеть тенденцию увеличения участков открытой воды, и в связи с этим повышения концентрации первичной продукции в водах Карского моря. На основании данной работы можно сделать предположение о росте численности некоторых видов гидробионтов и возможности их промышленного вылова в связи с изменением климата.

В настоящее время данных по биопродуктивности Карского моря не достаточно, так как из-за суровых условий среды регион был мало изучен. До начала 90-х годов исследования первичной продукции затрудняли ледовые условия, но в последние десятилетия прослеживается явная тенденция увеличения пространств открытой воды в теплый сезон, что привело к увеличению охвата областей доступных для исследования.

Одной из основных характеристик акваторий является исследование изменения характеристик первичной продукции в пространстве и времени, что в свою очередь связано с решением основополагающих проблем в области экологии, океанологии, биогеохимии океана. К таким задачам относится описание геохимического цикла углерода, его трансформации под действием изменения климата и, усиливающейся с каждым годом, антропогенной нагрузки, изучением перехода веществ и энергии по цепям питания.

Исследование по данной теме связано с привлечением внимания к данному региону не только для добычи полезных ископаемых, но и возможности промыслового изъятия определенных видов рыб, а так же накоплением базы данных по некоторым показателям (концентрация фитопланктона, концентрация хлорофилла «а», температура, соленость, концентрация фосфатов и нитратов). Созданные базы данных биотических и абиотических характеристик данного региона могут быть полезны в задачах оперативной океанологии, навигации, рыбного промысла и аквакультуры.

Цель работы: исследовать изменение биопродуктивности Карского моря в связи с изменяющимися климатическими условиями.

Объект исследования: сообщество фитопланктона Карского моря.

Предмет исследования - влияние абиотических факторов на процессы первичного продуцирования фитопланктона.

Для достижения поставленной цели работы необходимо выполнить следующие задачи:

- Выявить закономерности в формировании фитопланктонного сообщества и абиотическими факторами, лимитирующими его;
- Оценить влияние абиотических факторов на распределение фитопланктона по акватории Карского моря;
- Выявить области с наиболее высокой концентрацией первичной продукции;

Методы исследования:

Теоретические: анализ, синтез, обобщение.

Практические: кластерный анализ, спектральный анализ Фурье, кросс-корреляционный анализ, описание, сравнение.

Выпускная квалификационная работа на тему: «Биопродуктивность Карского моря в условиях изменений климата» состоит из четырех глав.

В первой главе описаны физико-географические данные региона Карского моря (расположение, береговая линия и рельеф, климат, циркуляция вод, материковый сток, ледовые условия и гидрологические характеристики).

Во второй главе описаны условия, которые определяют существование первичной продукции в водоеме (надводная и подводная освещенность, концентрация биогенов, изменение температуры, материковый сток, ледовые условия, антропогенное воздействие). Так же в этой главе рассмотрена роль хлорофилла «а» в определении первичной продукции и влияние повышения концентрации фитопланктона в водах Карского моря на промысел некоторых видов рыб.

В третьей главе дана характеристика исходных данных, на основе которых было проведено исследование, а так же описаны методы анализа (кросс-корреляционный, кластерный, спектральный).

В четвертой главе обсуждаются результаты исследования. На основании полученных данных выделены отдельные районы (с наибольшим и наименьшим содержанием первичной продукции).

1 Физико-географическое описание региона Карского моря

1.1 Морфология Карского моря

Карское море относится к морям Северного Ледовитого океана, на севере граничит с Полярным бассейном, на востоке с морем Лаптевых, а на западе с Баренцевым морем (рис.1.1). Большая часть моря располагается в шельфовой зоне. Площадь Карского моря составляет 893,4 тыс. км², объем вод 112 тыс. км³, средняя глубина 127 м, наибольшая 620 м [1].

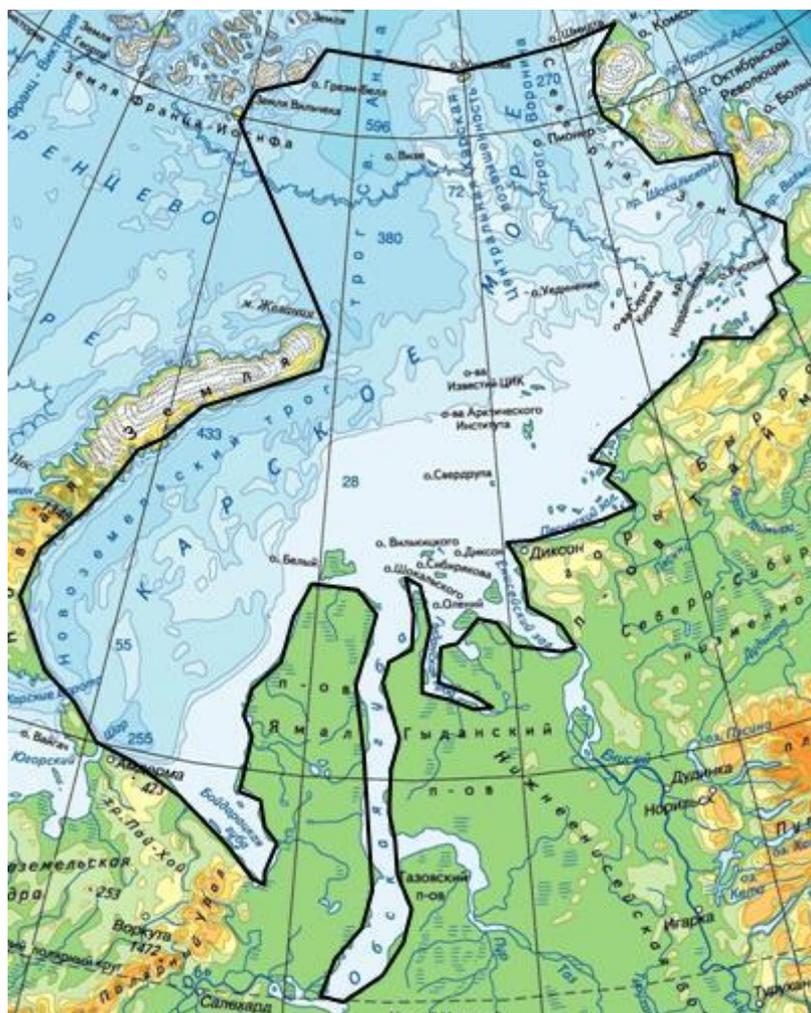


Рис.1.1. Границы Карского моря

Западная граница моря идет по восточным берегам Новой Земли, западной границе пролива Карские Ворота, восточному берегу о. Вайгач и по западной границе пролива Югорский Шар. На востоке граница проходит по западному берегу островов архипелага Северная Земля и восточным границам проливов Красной Армии, Шокальского и Вилькицкого. Южная граница Карского моря идет по материковой части от мыса Белый Нос до мыса Прончищева [1].

Для Карского моря характерно наличие островов, подавляющая часть которых имеет относительно маленькие размеры и располагается рядом с материком. Такие острова в основном группируются в архипелаги, а наиболее крупные расположены поодиночке, такие как о. Диксон, о. Свердруп, о. Нансена, о. Шокальского и др.

Рельеф дна Карского моря помимо мелководных южных и восточных районов имеет на западе и северо-востоке глубоководные желоба Святой Анны, Воронина (глубиной до 200м). Новоземельская впадина имеет глубину до 500 м и располагается с восточной стороны побережья Новой Земли (рис. 1.2). Рельеф дна центрального района Карского моря в основном ровный [2].

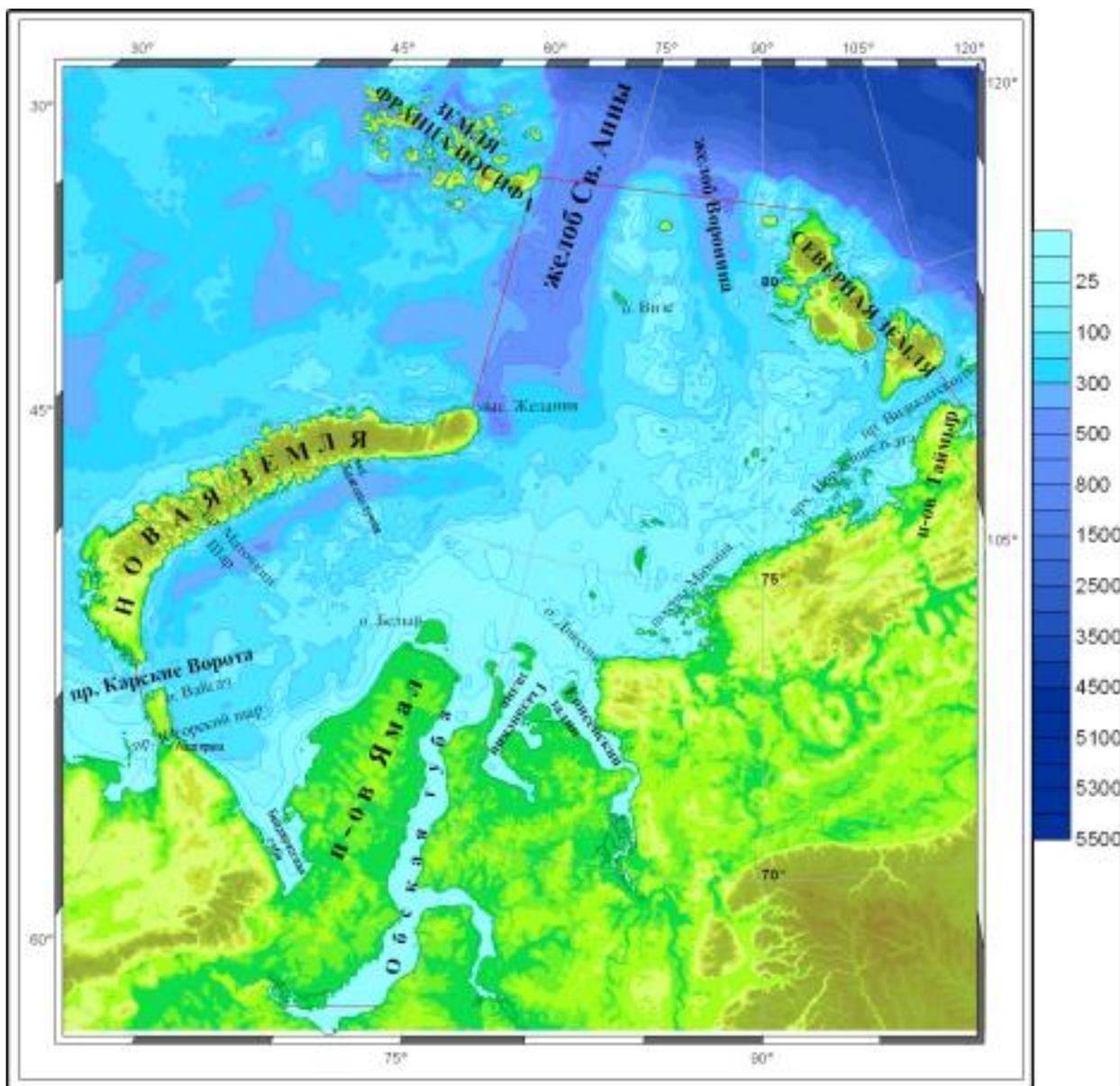


Рис. 1.2. Подводный рельеф Карского моря

Береговая линия Карского моря сложна и извилиста. В восточные берега Новой Земли вдаются многочисленные фьорды (неширокие и извилистые морские заливы со скалистыми берегами). В материковое побережье вклиниваются Байдарацкая и Обская губы, между которыми далеко в море выступает полуостров Ямал, восточнее расположены крупные заливы: Гыданский, Енисейский, Пясинский, начиная от него береговая линия очерчивает много небольших заливов [1]. Западное побережье Северной земли не такое извилистое.

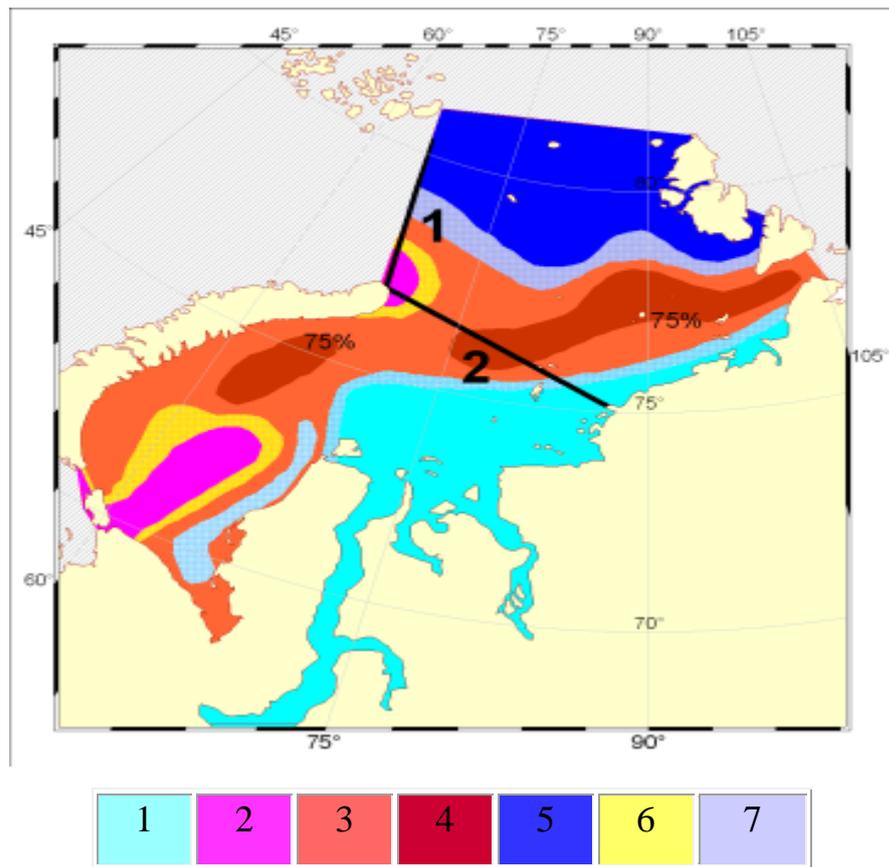
Для побережья Карского моря характерны берега абразионного типа, но могут присутствовать ледяные и аккумулятивные.

1.2 Водные массы

По мнению А.Д. Добровольского: «Водной массой следует называть некоторый, сравнительно большой объем воды, формирующийся в определенном районе Мирового океана - очаге, источник этой массы, - обладающей в течение длительного времени почти постоянным и непрерывным распределением физических, химических и биологических характеристик, составляющих единый комплекс, и распространяющийся как единое целое» [3].

На рисунке 1.3 показано распространение водных масс по акватории Карского моря.

В поверхностной водной массе с возрастанием глубины повышаются значения температуры и солености.



1- речные воды; 2- баренцевоморские воды; 3- поверхностные воды арктических морей (концентрация <75%); 4- поверхностные воды арктических морей (концентрация >75%); 5- поверхностные воды Арктического бассейна; 6 и 7 - зоны смешения

Рис.1.3. Расположение водных масс на поверхности акватории [4]

Для поверхностного слоя вод Карского моря характерны сезонные колебания термохалинного режима. Воды этого слоя охлаждаются и осолоняются благодаря зимнему образованию льда, что приводит к конвекции [5].

Поступающие через пролив Карские ворота воды Баренцева моря характеризуются высокой соленостью и однородным распределением температуры по вертикали.

Воды Атлантического океана проникают в Карское море по глубоководным желобам благодаря Западно-Шпицбергенскому течению. Из-за разницы в солености наиболее плотные воды Атлантического океана опускаются под арктические и распространяются вдоль материка [4].

Материковый сток в большей степени оказывает влияние на Карское море в теплый период, когда нагретые выносимые речные воды разрушают ледовый покров, что, в свою очередь способствует лучшему прогреву вод моря [6].

Значительная вариативность гидрохимического режима обусловлена поступлением водных масс из разных источников с различными гидрометеорологическими условиями [7].

1.3 Климатические особенности

Климат холодный и суровый, температура воздуха на протяжении большей части года не поднимается выше 0 °С, для января характерна самая низкая температура от -20 до -30 °С, в некоторых районах акватории может понижаться до -50 °С. В летние месяцы температура повышается до +1 - +10 °С, в некоторых прибрежных районах может достигать +16°С [2].

На несколько месяцев в году район Карского моря погружается во тьму - наступает полярная ночь. Продолжительной холодной зимой на большей части акватории господствуют южные ветра до 10 м/с, в западном районе преобладают шторма.

В непродолжительный летний период преобладает дождливая погода, так же можно наблюдать туманы. В отличие от зимнего периода, господствуют ветра северных направлений до 5 м/с. С начала сентября характерно преобладание циклонов на данной территории, температура воздуха начинает падать в западных районах до -6 °С, и до -12 °С на востоке.

Изменение климата в арктическом регионе приводит к аномально высоким температурам воды и воздуха, из-за чего происходит сокращение площади многолетних льдов [8].

Так, за последнее десятилетие ледовитость с каждым годом становится все меньше, а теплосодержание вод возрастает [9].

Приповерхностная температура воздуха (ПТВ) зимой 2020 года (рис. 1.4) в области распространения морского льда в Арктике составила $-20,9^{\circ}\text{C}$. Летом ПТВ ($+6^{\circ}\text{C}$) оказалась на уровне самых высоких (в 2012, 2016 и 2019 гг.) летних температур [10].

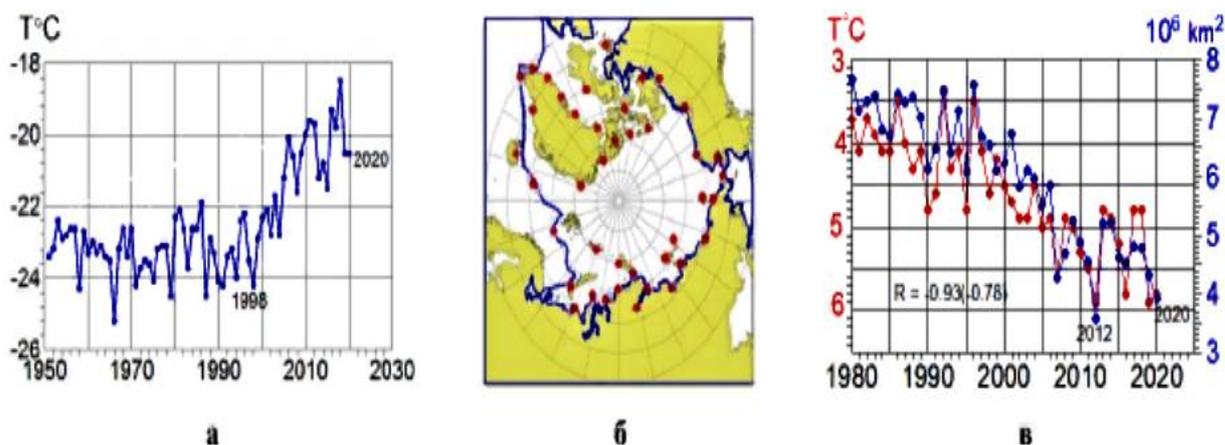


Рис.1.4. Приповерхностная температура воздуха и площадь морского льда в Арктике. а) – ПТВ зимой в морской Арктике (б); в) – ПТВ в морской Арктике летом и площадь морского льда в сентябре. R –коэффициент корреляции между ПТВ и площадью льда.

Среднемесячная площадь морского льда в Северном Ледовитом океане в сентябре 2020 г. составила 3,92 млн. км², что является вторым после абсолютного минимума 2012 г. (3,51 млн. км²).

Сокращение сентябрьской площади льда находится в тесном соответствии с ростом летней температуры воздуха в морской Арктике с коэффициентом корреляции между ними -0,93 за 1979-2020 гг [10].

Изменения средних зимней и летней температур воздуха представлены на рисунке 1.5. Самым тёплым среди летних сезонов за период наблюдений с 1951 г. оказалось лето 2020 г.

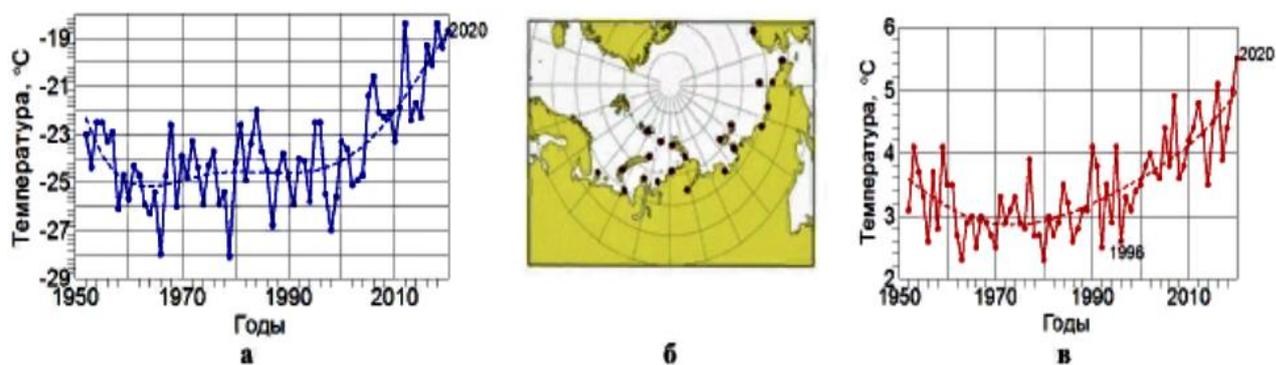


Рис.1.5. Средняя температура воздуха зимой (а) и летом (в) на акватории арктических морей, по которым проходит трасса СМП, по данным 22 метеорологических станций (б).

В 2020 г. летний морской ледяной покров в арктических морях сократился к сентябрю до 26 тыс. км² (рис. 1.6). Быстрое сокращение началось в 2001 г. от площади 1400 тыс. км² в сентябре, которая в 2005 г. составила всего 200 тыс. км².

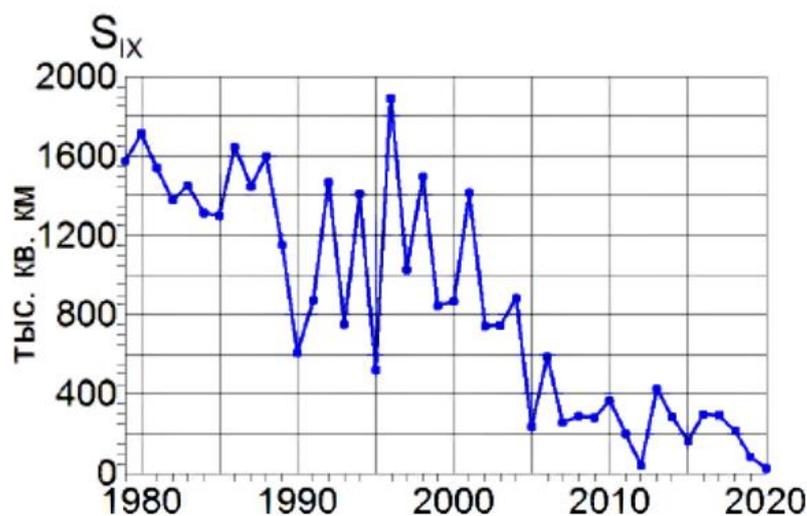


Рис.1.6. Площадь, морского льда за сентябрь в арктических морях (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское), по данным ААНИИ.

За сокращением площади многолетних льдов в Арктическом регионе пристально следит огромное количество ученых, ведутся и фиксируются многолетние измерения различных характеристик ледового покрова, на основании которых составляются ледовые карты. В летние месяцы 2012 и 2020 годов были зафиксированы самые низкие показатели ледовитости, что видно на рисунке 1.6. Изменение климата в арктическом регионе может привести к катастрофическим последствиям [8].

1.4 Термохалинная структура

Распределение температуры воды. В зимний сезон температура Карского моря может иметь значения ниже $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как оно покрыто льдами. Самые низкие температуры характерны для северных районов, повышенные температуры характерны для заливов и устьев рек, что видно на рисунке 1.7.

Для прибрежных районов акватории характерна отрицательная температура, за счет перемешивания вод [2]. В желобах Св. Анны и Воронина температура воды положительна и достигает $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что можно объяснить притоком теплых атлантических вод.

Сезонное распределение льдов, температура воды и воздуха, материковый сток, поступление теплых вод из Атлантического океана и Баренцева моря оказывают существенное влияние на температурный режим Карского моря [1].

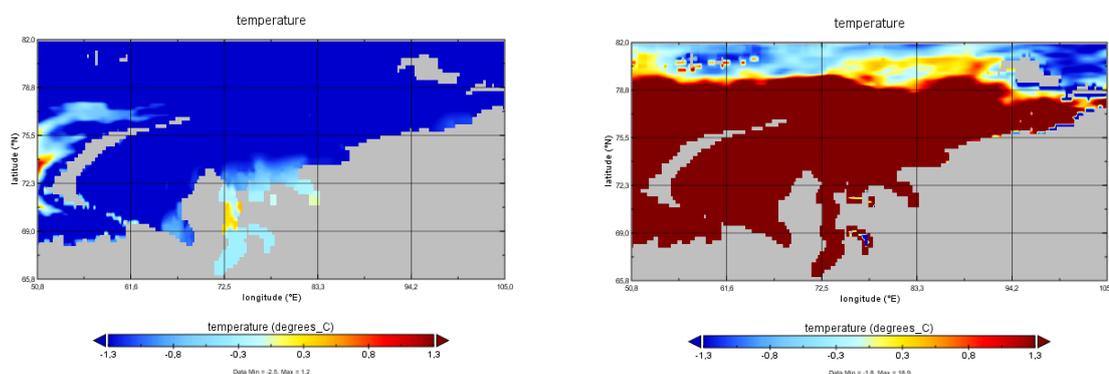


Рис.1.7. Температура воды в феврале и августе 2019 года

Энергия солнца в весенне-летний период затрачивается на таяние льда, поэтому нагрева воды не происходит, а в тех районах, где льда уже нет, постепенно начинается прогрев воды [11].

Летом поверхность воды прогревается до $+2^{\circ}\text{C}$ на севере и до $+6^{\circ}\text{C}$ на юго-западе. При этом в северной и восточной частях моря прогрев распространяется на глубину 10-15 м, на юго-западе-до 60-70 м.

В районах материкового стока температура воды может быть выше $+15^{\circ}\text{C}$.

Распределение солености воды. Показатели солености зависят от материкового стока, ведь он несет с собой распресненные воды, поэтому в южных районах Карского моря наблюдается соленость 3-5‰, кристаллизации и таяния льдов, притока соленых вод Баренцева моря и Северного Ледовитого океана, для которых характерна соленость 33-34‰ (рис. 1.8).

В зимний период характерно ледообразование, при котором пресная вода кристаллизуется, повышая концентрацию соли в образующемся «рассоле»,

также уменьшается приток пресной воды с речным стоком, поэтому значения солености Карского моря несколько возрастают.

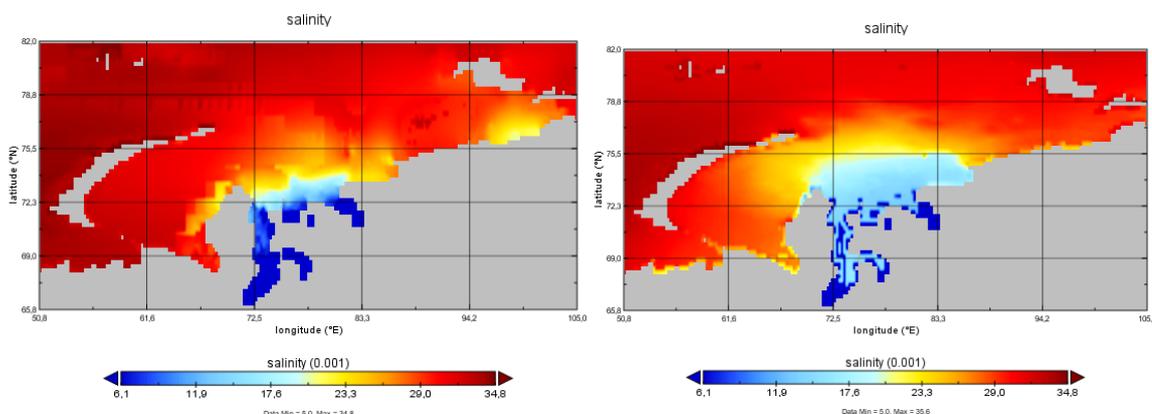


Рис.1.8. Распределение солености за февраль и август 2019 года

В летние месяцы соленость в приустьевых участках и прибрежной полосе значительно снижается (до 5-10‰), это происходит за счет выноса пресных речных вод и понижения концентрации соли в «рассоле» при таянии льдов. Далее значения солености начинают возрастать с юга на север, и в самых северных районах достигают 35‰.

Значения солености в столбе воды возрастает с глубиной (у дна могут достигать 35‰).

1.5 Ледовые условия

Уже в сентябре начинается образование ледяного покрова в северных районах акватории Карского моря, в южных районах несколько позже, в октябре-ноябре.

На протяжении 8-9 месяцев с ноября по июнь море почти полностью покрыто льдами со сплоченностью от 70 до 10% [12], которые на некоторых участках могут достигать толщины до 1,5 м [9].

В конце мая - начале июня в юго-западном районе Карского моря начинает постепенно таять лед, к концу июня происходит взлом и разрушение припая, что приводит к появлению дрейфующих полей.

Для июня характерно понижение сплоченности льдов или их полное таяние во всех окраинных морях южнее 70° с.ш. за счет повышения температур воздуха и воды. Северные районы остаются покрытыми льдами, но их сплоченность значительно уменьшается [12].

На рисунке 1.9 можно увидеть динамику изменения состояния ледового покрова. В Карском море наблюдался значительный отрицательный линейный тренд ледовитости (степень покрытости акватории льдом, которая определяется отношением площади, занятой льдом любой сплочённости, к общей площади акватории водного объекта).

В летние месяцы Карское море почти полностью очищается ото льда, что доказывается понижением средних значений ледовитости на 37 % за последнее десятилетие и существенным снижением толщины припая (на 18 см) в районах полярных станций в зимний период [13].

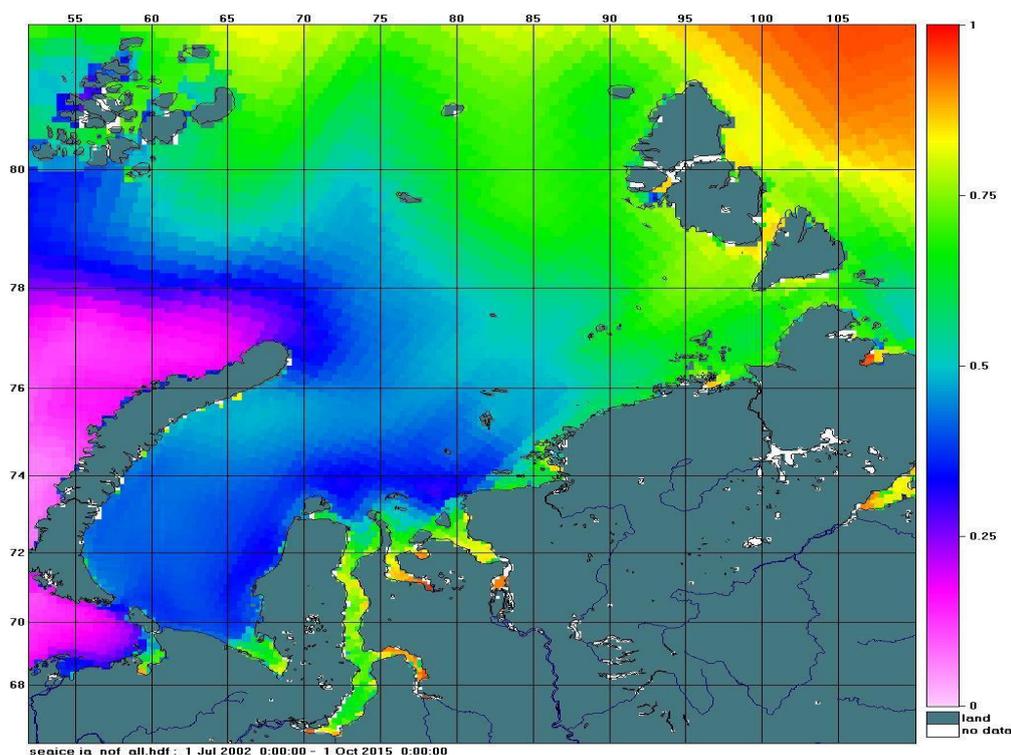


Рис.1.9. Среднегодовое распространение ледового покрова (%) в Карском море в период с апреля по октябрь (2002-2015гг.) по данным NOAA

В годы с высокими значениями ледовитости промышленный лов рыбы будет существенно затруднен, так как доступными районами Карского моря будут только южный и юго-западный. В теплые же годы, когда кромка льда будет отдалена далеко на север, район лова рыбы значительно расширится в северном и восточном направлениях.

2 Условия формирования первичной продукции

Биологической продуктивностью первичной продукции считается воспроизведение биомассы фито- и зоопланктона, которые входят в состав экосистемы [14].

Первым звеном в трофической цепи моря является фитопланктон, он играет очень важную роль в процессах самоочищения и быстро реагирует на изменение качества воды, что позволяет использовать его в экологическом мониторинге водоемов. Для оценки состояния водоемов используются следующие критерии: биоразнообразие, степень устойчивости водной экосистемы и ее сложность структурно-функциональной организации.

Основные абиотические факторы, лимитирующие развитие фитопланктона: температура, наличие биогенных веществ, освещенность, гидродинамические и ледовые условия.

Антропогенными лимитирующими факторами являются: загрязнение, эвтрофирование и закисление.

Так же выедание фитопланктона зоопланктоном сказывается на величине первичной продукции.

Для нормальной жизни организма требуется определенное сочетание условий, несмотря на разнообразие факторов окружающей среды.

Если из всех условий среды неблагоприятно только одно, то именно оно становится решающим в жизни этого организма. Оно ограничивает развитие организма, поэтому называется лимитирующим фактором. Это утверждение основано на идеях немецкого химика-органика Ю. Либиха и американского зоолога В. Шелфорда.

Согласно закону Ю. Либиха: «Жизнедеятельность организма зависит от того ресурса, количество которого минимально».

По закону лимитирующего фактора В. Шелфорда: «Стресс организма зависит от того фактора, вредное действие которого максимально».

По закону толерантности В. Шелфорда: «Лимитирующим фактором процветания популяции или организма может быть как минимум, так и максимум экологического воздействия, а диапазон между ними определяет величину выносливости, то есть предел толерантности, или экологическую валентность организма к данному фактору».

Зоной оптимума считается наиболее благоприятный диапазон действия экологического фактора. При небольшом отклонении действия фактора от оптимума, данный фактор будет угнетать жизнедеятельность популяции. При сильном же отклонении от оптимума, за пределами максимальных и минимальных значений, существование популяции или отдельных организмов будет невозможно.

Все экологические факторы в природе действуют совместно. Зона оптимальных значений и пределы выносливости организма по отношению к любому фактору среды могут смещаться в зависимости от сочетания других одновременно действующих факторов. Под экологической пластичностью понимают способность организмов адаптироваться к определенному диапазону изменчивости факторов окружающей среды. Эта особенность является неотъемлемым свойством всего живого, в том числе и фитопланктона. Таким образом, организмы приобретают возможность выживать и размножаться, подстраиваясь под изменения условий среды.

2.1 Факторы, лимитирующие первичную продукцию

Подводная освещенность. Оптические свойства вод Карского моря определяются высокими концентрациями растворенного органического вещества (РОВ) [15], взвешенного органического вещества (ВОВ) и частичек минеральной взвеси [16].

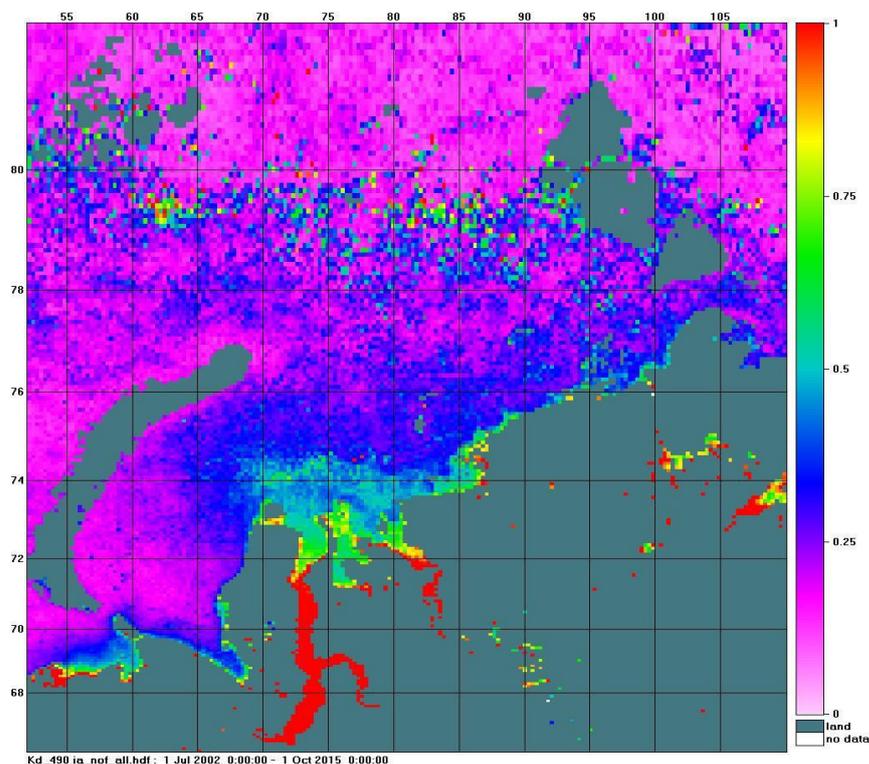


Рис.2.1. Среднемноголетние значения коэффициента диффузного ослабления проходящей солнечной радиации ($K_d(490)$) (m^{-1}) в Карском море по данным MODIS-Aqua

Как видно на рисунке 2.1, в районе стока крупных рек, таких как Обь и Енисей, прозрачность воды наименьшая, по мере продвижения на север, показатели прозрачности воды и КДО проходящей солнечной радиации понижаются, наименее мутные воды характерны для западного и юго-западного района акватории.

Глубина проникновения ФАР в водную толщу зависит от концентрации хлорофилла, РОВ, ВОВ и минеральной взвеси.

В зависимости от показателей прозрачности воды, концентрации РОВ и ВОВ меняется толщина фотосинтетического слоя (Z_{fc}), то есть чем прозрачнее вода и меньше концентрация взвесей, тем больше слой фотосинтеза и, наоборот, при повышении концентрации первичной продукции, показатели

которой определяются благодаря хлорофиллу «а», толщина слоя фотосинтеза уменьшается.

В районах акватории Карского моря, где преобладает речной сток, фотосинтезирующий слой колеблется в пределах 5-15 м из-за большого количества биогенов, выносимых Обью и Енисеем, что в свою очередь положительно влияет на концентрацию первичной продукции и отрицательно на прозрачность вод [17].

Температура воды. Интенсивность роста и фотосинтеза фитопланктона определяется в значительной степени температурным режимом за счет регулирования скорости метаболических реакций [18].

Определение степени влияния, которое оказывает температура возможно только тогда, когда другие абиотические факторы, такие как свет и концентрация биогенных веществ, не лимитируют скорость ассимиляции углерода [19]. Но при этом ТПО хорошо определяется со спутников, что позволяет ее причислить к одним из самых важных абиотических факторов, так как на основе значений температуры можно восстановить некоторые значения фотофизических параметров.

На рисунке 2.2 видно, что значения ТПО возрастают в направлении с севера на юг [20]. Для района акватории возле Новой Земли характерны достаточно высокие среднегодовые значения температуры воды, которые могут достигать +4 °С за счет того, что через пролив Карские ворота поступают достаточно теплые воды Баренцева моря.

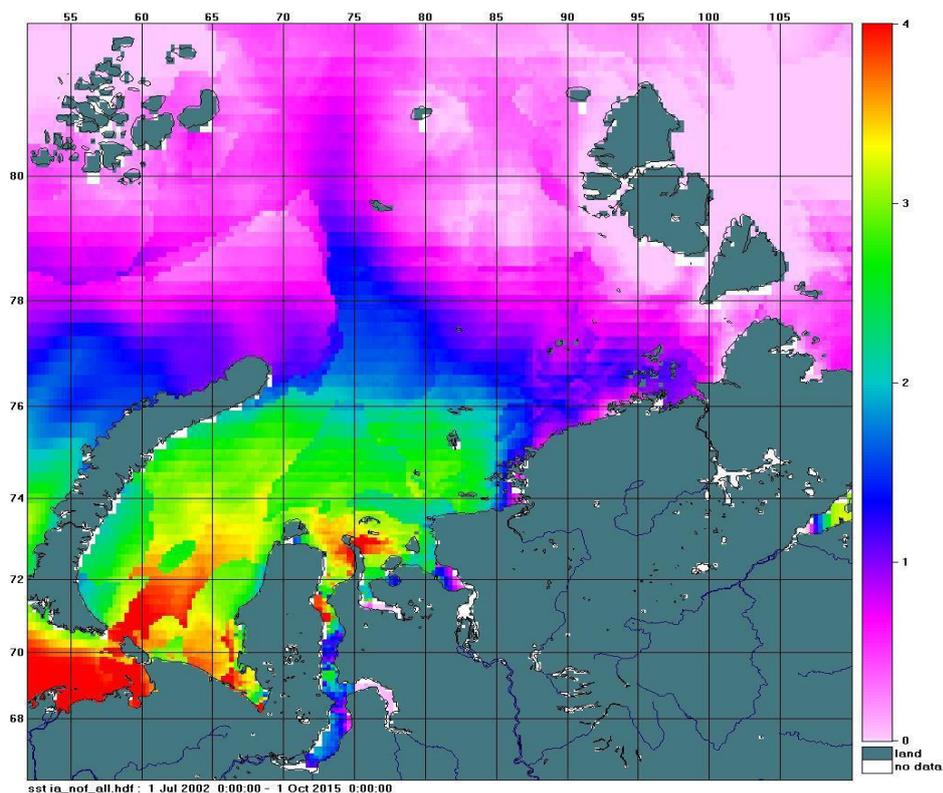


Рис.2.2. Среднегодовые значения ТПО (°С) в Карском море с 2002 – 2015 гг. по данным NOAA [21]

В эстуариях Оби и Енисея широтная зональность распределения температуры нарушается из-за межгодовой динамики ледового покрова и речного стока в этих районах.

Скорость фотосинтеза, при близкой к насыщающей интенсивности света, в Карском море возрастает при повышении ТПО приблизительно до +10 °С. В температурном диапазоне от +10 до +12 °С интенсивность фотосинтеза снижается приблизительно в 1,5 раза, но в диапазоне от +13 до +18 °С скорость фотосинтеза может возрасти в 2 раза

Материковый сток и наличие биогенных элементов. Материковый сток составляет около 1350 км³ в год, что оказывает существенное влияние на большую часть Карского моря и определяет такие показатели состояния акватории, как образование и таяние морского льда, распределение биогенов, первичной продукции и солёности.

Около 75-80% объема материкового стока, который несет с собой большие концентрации биогенов, приходится на Енисей до 600 км³/год и Обь до 450 км³/год, такие реки как: Пяси́на, Пур, Таз поставляют значительно меньший объем вод, около 75-90 км³/год, поэтому, как правило, самые высокие концентрации нитратов и фосфатов характерны для эстуарных участков акватории Карского моря[22].

В теплое время года материковый сток наиболее интенсивен, зимой же он уменьшается в разы из-за ледовых условий.

Речной сток оказывает как положительное, так и отрицательное воздействие на процесс первичного продуцирования [23].

РОВ материкового стока разлагается медленно, в основном благодаря процессу фотодеструкции и бактериям [24], также часть органики идет на питание планктонных организмов, что положительно влияет на значения первичной продукции [25].

Но в основном материковый сток оказывает отрицательное влияние, из-за огромного количества РОВ и различных взвесей, которые снижают прозрачность воды, что в свою очередь уменьшает толщину слоя фотосинтеза, а, следовательно, и концентрацию фитопланктона.

Ледовые условия. Концентрацию первичной продукции лимитируют также и ледовые условия. В период с апреля по октябрь льды Карского моря приостанавливают развитие первичной продукции, поэтому концентрацию фитопланктона лимитирует лишь свет.

За последние десятилетия потепление Арктики и сокращение ледовых площадей привело к уменьшению ледового покрова, увеличению участков открытой воды, что повлекло за собой возрастание концентрации первичной продукции в акватории Карского моря.

2.2 Роль хлорофилла «а» в определении первичной продукции

Главным продуцентом органики в водоемах за счет явления фотосинтеза является фитопланктон, который благодаря хлорофиллу «а» способен преобразовывать воду и углекислый газ в органическое вещество [26].

Первичная продукция составляет основу большинства трофических цепей и в значительной степени определяет экологическую обстановку водоема. Основную роль в процессе фотосинтеза играет хлорофилл "а". Его содержание - важнейшая характеристика, по которой определяют приблизительные показатели биомассы фитопланктона [27].

Для прогнозирования концентрации фитопланктона используют спутниковые данные об изменении хлорофилла «а», несмотря на то, что на распределение фитопланктона влияет множество других показателей, таких как температура, соленость, освещенность и др.

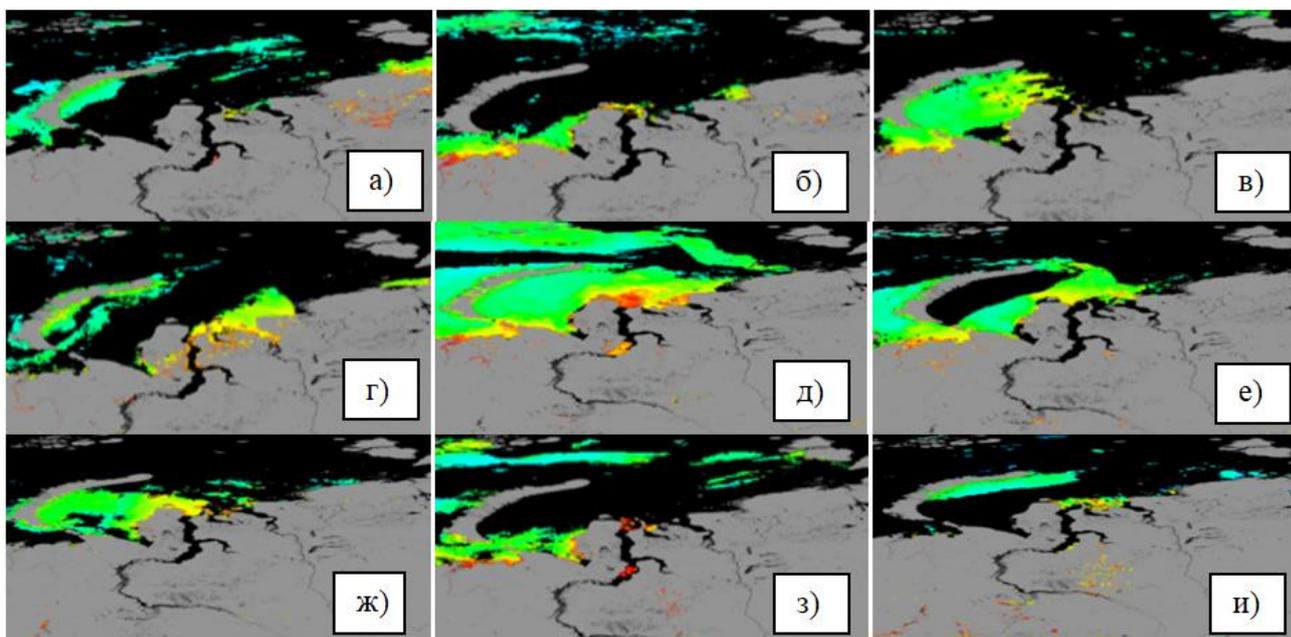
Фитопланктон, в отличие от других гидробионтов, растет относительно быстро и при температуре воды около 20 °С, его скорость роста может составлять от нескольких часов до двух дней. Лимитирующими факторами развития фитопланктона в природных водоемах являются: освещенность, выедание зоопланктоном и концентрация питательных веществ.

Некоторые виды фитопланктона начинают развиваться весной еще подо льдом, когда свет уже проникает в воду. Ранневесенний комплекс диатомей состоит из арктических и арктобореальных видов: *Porosira glacialis*, *Coscinosira polychorda*, *Thalassiosira gravida*, *T. Bioculata* с примесью *Melosira arctica*, *Fragilaria oceanica*, *Achnanthes taeniata*, *Amphiprora hyperborea*, *Nitzschia frigida* и др. Ранневесенний комплекс, вскоре переходит в стадию поздневесеннего, что выражается в появлении *Chaetoceros furcellatus*, *Ch. socialis*, достигающего массового развития, и выпадении из планктона ранневесенних форм [28].

В летнее время преобладает *Chaetoceros atlanticus*, *Ch. borealis*, *Ch. convolutus*, *Ch. debilis*, *Ch. subsecundus*, *Ch. compressus*, *Eucampia zoodiacus*, продолжают еще вегетировать поздневесенние виды *Chaetoceros socialis* и *Ch.*

furcellatus. Летний планктон развивается менее обильно, по сравнению с весенним, и во вторую декаду августа идет на убыль. В осенний сезон развитие фитопланктона не наблюдается. В продолжение вегетационного периода в фитопланктоне присутствуют спорадически и в небольшом количестве виды, развитие которых не приурочено к определенному сезону, например *Coscinodiscus oculusiridis*, *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Rhizosolenia hebetata* f. *hiemalis*, *R. styliformis*, *Nitzschia seriata* [28].

В осенне-зимний период по спутниковым данным наличие фитопланктона в акватории Карского моря не зафиксировано. В весенне-летний период концентрация фитопланктона поверхностного слоя меняется в пределах от 0,1 до 64 мг/м³. Наибольшая биомасса фитопланктона зафиксирована в июне-августе, что можно увидеть на рисунке 2.3.



а) 6.08.2012 Chl-a = 0.1-1 мг/м³, б) 6.08.2013 Chl-a = 1-3 мг/м³, в) 6.08.2014 Chl-a = 0.5-10 мг/м³,
 г) 6.08.2015 Chl-a = 0.2-30 мг/м³, д) 6.07.2016 Chl-a = 3-64 мг/м³, е) 6.07.2017 Chl-a = 0.5-10 мг/м³,
 ж) 6.09.2018 Chl-a = 1-15 мг/м³, з) 6.08.2019 Chl-a = 1-40 мг/м³, и) 6.08.2020 Chl-a = 0.1-10 мг/м³

Рис.2.3. Изменение концентрации хлорофилла "а" в Карском море с 2012 по 2020 год по данным NASA Ocean Color

На рисунке 2.3 видно, что в 2012-2013 годах на малой части акватории Карского моря зафиксирована наименьшая концентрация Chl-a от 0,1-3 до 1-3 мг/м³.

Для 2014, 2017 концентрация Chl-a составила 0,5-10 мг/м³ на достаточно обширной акватории Карского моря.

Для 2016 года концентрация Chl-a составила 3-64 мг/м³, наибольшая концентрация наблюдается на выходе из устья Обской губы, на всей остальной акватории Карского моря концентрация Chl-a не превышает 10-15 мг/м³.

В 2015, 2018, 2019 наибольшая концентрация Chl-a наблюдается возле архипелага Новая Земля (10-15 мг/м³) и в устье Обской губы (15-40 мг/м³).

В 2020 году наибольшая концентрация Chl-a была зафиксирована возле архипелага Новая Земля и составила 0,5-10 мг/м³ [29].

2.3 Антропогенное воздействие на первичную продукцию

Многолетние исследования показали, что за последние десятилетия изменения в организационной структуре и функционировании водных экосистем вызваны не только климатическими процессами, но и промышленным загрязнением. Антропогенное воздействие, как правило, имеет локальный характер.

Из-за изменения климата и уменьшения ледового покрова возникает все больше возможностей для разработки месторождений энергоресурсов, что может привести к ряду экологических проблем.

В Арктике содержится большое количество неразработанных природных ресурсов, таких как газ и нефть, запасы которой составляют до 90 млрд баррелей по оценкам Геологической службы США [30]. По мнению В. Каминского: «Для России арктический шельф одно из наиболее перспективных направлений для восполнения запасов углеводородного сырья».

В связи с этим на восточном берегу Енисейского залива будет построен крупнейший нефтяной терминал «Порт бухта Север» на базе расширяемого морского порта Диксон на Таймыре. Проект даст старт развитию нового, неосвоенного перспективного кластера месторождений Таймырской нефтегазовой провинции. Терминал предназначен для перегрузки на танкеры и дальнейшей транспортировки нефти с Пайяхской группы месторождений по Северному морскому пути в порты России, Европы и стран Азиатско-Тихоокеанского региона [31].

С экологической точки зрения добыча энергетических ресурсов в Арктике очень сложна и опасна, так как вероятность аварийных ситуаций повышается во много раз из-за суровых климатических условий. Ликвидация различных аварий будет затруднена сильными штормами, густым туманом, ледовыми условиями и низкой освещенностью во время полярной ночи. Айсберги также представляют собой опасность, так как столкновение с ними может стать роковым для нефтедобывающей платформы.

Невозможно полностью устранить последствия разлива нефти, так как она моментально загрязняет экосистему, в которую попала.

Углеводороды, которые попадают в морскую среду, вступают в сложное взаимодействие с биотой. Загрязняющие вещества отрицательно влияют на морские организмы и их сообщества, в то же время гидробионты, участвующие в преобразовании этих веществ, разрушают их до простых соединений и включают в общий круговорот вещества и энергии в Мировом океане.

Действие нефти на морской фитопланктон определяется ее концентрацией в воде, длительностью воздействия и видовой чувствительностью водорослей к углеводородам нефти. Разные виды фитопланктона обладают разной чувствительностью к нефтепродуктам, большинство планктонных водорослей обладает очень высокой чувствительностью к сырой нефти — концентрации нефти, равные 0,01 — 1 мг/л, замедляют деление клеток и способствуют их гибели в течение пяти

суток. Концентрации нефти, превышающие 1 мл/л, вызывают гибель большинства изученных видов фитопланктона.

Влияние разных фракций нефти и нефтепродуктов на первичную продукцию различно. Большим ингибирующим эффектом в отношении фитопланктона обладают ароматические углеводороды. Легкая фракция оказывает сильное, но кратковременное токсическое действие. Особи, которые не погибают сразу, через некоторое время восстанавливают свои функции и продолжают развиваться. Тяжелые фракции оказывают долговременное отрицательное воздействие на водоросли и приводят к необратимой гибели всех клеток [32].

Разработка месторождений нефти и газа в арктическом регионе опасна тем, что по сравнению с теплыми морями, в которых разливы нефти очищаются достаточно быстро, загрязнение в северных морях будет сохраняться долгое время во льдах, и устранение таких аварий сильно затруднено погодными условиями [33].

2.4 Влияние первичной продукции на динамику промысловых видов рыб

Потепление климата, увеличение безледного периода и другие факторы повлекли за собой рост концентрации первичной продукции на акватории Карского моря. Таким образом, можно предположить, что вслед за увеличением концентрации фитопланктона последует рост численности некоторых видов рыб, что позволит организовать промышленный лов в районах акватории Карского моря, которые будут свободны ото льда.

Из-за повышения температуры воды за счет усиления притока вод Атлантического океана, в акватории Карского моря были замечены некоторые промысловые виды, такие как черный палтус и атлантическая сельдь.

В связи с достаточно суровым климатом и отсутствием крупных экспедиционных исследований, особенности питания и жизнедеятельности представителей фауны северных морей были плохо изучены [34].

На данный момент в Карском море промыслового лова рыбы нет, вылов рыбы по большей части осуществляется местным населением в устьях рек и прибрежном районе моря [35].

В соответствии с приказом Росрыболовства от 1 декабря 2020 года № 640 «О мерах по реализации постановления Правительства РФ от 25 августа 2008 года № 643 на 2021 год» утверждены рекомендованные объемы вылова водных биоресурсов, ОДУ которых не устанавливается и районов их добычи на 2021 год (табл. 1.) [36].

Для Карского моря в перечень водных биоресурсов вошли: сайка, омуль арктический, корюшка азиатская зубастая, навага, сельдь чешско-печорская, камбала полярная, кольчатая нерпа (акиба), морской заяц (лахтак).

Таблица 1. Перечень видов водных биологических ресурсов, ОДУ которых не устанавливается, и районов их добычи (вылова)

Район добычи (вылова)	Перечень видов водных биоресурсов, ОДУ которых не устанавливается
Обская губа	сайка, ряпушка, омуль арктический, мускун, нельма, пелядь, сиг, чир, корюшка азиатская зубастая, налим, лещ, щука, язь, плотва, окунь пресноводный, елец, ерш пресноводный, бычки, навага, сельдь чешско-печорская, камбала полярная, мойва
Газовская губа	налим, лещ, щука, язь, плотва, елец, ряпушка, ерш пресноводный, пелядь, пресноводный окунь, корюшка азиатская зубастая, чир, сиг
Гыданская губа	гольцы, сайка, ряпушка, омуль арктический, пелядь, сиг, чир, корюшка азиатская зубастая, налим, щука, плотва, окунь пресноводный, ерш пресноводный,

	бычки, навага
Байдарацкая губа	гольцы, сайка, ряпушка, омуль арктический, пелядь, сиг, чир, корюшка азиатская зубастая, налим, щука, плотва, окунь пресноводный, ерш пресноводный, бычки, навага, сельдь чешско-печорская, мойва, камбала полярная
Юрацкая губа	сайка, ряпушка, омуль арктический, пелядь, сиг, чир, корюшка азиатская зубастая, щука, бычки, навага
Енисейский и Пяснинский заливы	налим

В Карском море водятся 54 вида рыб, но в основном ведется промысел ряпушки, пеляди, сига, чира, налима, омуля и ёрша. Наибольшую ценность представляют сиговые виды: нельма, муксун, чир, пелядь, сиг-пыжьян, омуль.

В настоящее время один из основных вопросов, связанных с экосистемами морской Арктики, заключается в том, возрастет ли численность популяций промысловых видов рыб из-за потепления климата.

При сохранении тенденции потепления, экспертные оценки прогнозируют возможное увеличение российского промысла до 2 млн. т. [37].

По разным оценкам вылов рыбы Карского моря может достигать размера 5 тыс. т., но на практике все осложняется суровыми гидрометеорологическими условиями, отсутствием рыбодобывающей и рыбоперерабатывающей промышленности и плохим техническим оснащением флота.

Начальник Управления науки и образования Росрыболовства Сергей Голованов отметил: «Это шельфовое море России, которое не соприкасается ни с международными водами, ни с зонами иностранных государств, что позволяет России принимать самостоятельные решения в отношении его запасов исключительно в интересах нашей страны».

Однако на данный момент нельзя точно сказать, как отразится изменение климата на промышленное рыболовство [38]. Можно предположить, что потепление климата Арктики повлияет на распределение кормовой базы, это в свою очередь приведет к изменению привычных путей миграции рыб. А это повлечет за собой смещение ареалов распространения промысловых видов, что скажется на дислокации рыбного флота [39].

3 Исходные данные и методы анализа

3.1 Исходные данные

Для изучения биопродуктивности Карского моря были использованы данные с сайта marine.copernicus.eu. Программа Copernicus принадлежит Европейскому Союзу и направлена на изучение Земли. Морская служба Copernicus предоставляет бесплатную, открытую, регулярную и систематическую справочную информацию о состоянии, изменчивости и динамике физических и биохимических показателей океанов.

Для исследования динамики и закономерностей распределения выбранных нами характеристик был выбран район с координатами 66° с.ш. 50° в.д. / 82° с.ш. 105° в.д. (рис.3.1).

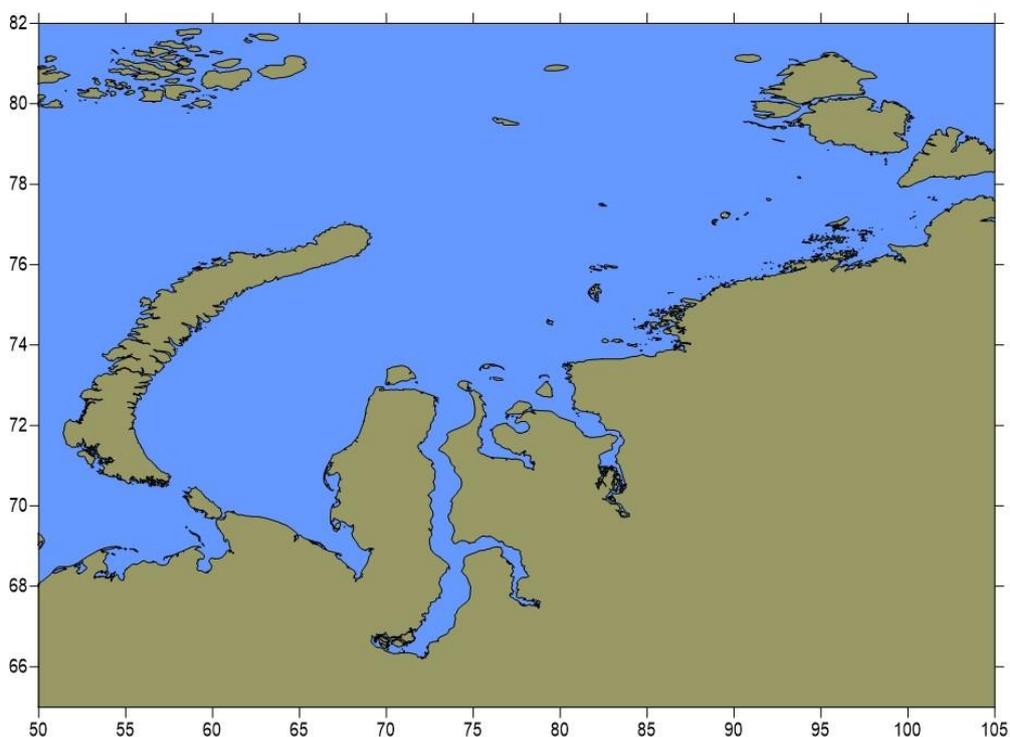


Рис. 3.1. Район Карского моря

Для данного района были взяты массивы данных среднемесячных значений с шагом сетки 0,25 градуса о распределении фитопланктона, хлорофилла «а», температуры воды, солености, концентрации фосфатов и нитратов с 2000 по 2020 год на глубину фотического слоя (100 м).

Далее массивы данных были усреднены по всей глубине по формуле:

$$\bar{C} = \frac{\sum_i (C_i \Delta z_i)}{H} \quad (3.1)$$

Где C_i -значения параметра, Δz_i -толщина слоя, H -глубина.

На первом этапе для оценки интенсивности происходящих изменений на акватории Карского моря был выполнен статистический анализ рядов данных хлорофилла «а», как главного показателя первичной продукции и температуры с целью выявления возможных резких изменений вызванных климатическими условиями.

Среднее арифметическое значение статистического ряда (\bar{x}) – показывает положение, характеризующее центр тяжести исследуемой характеристики (показателей хлорофилла «а» и температуры) [40]. Среднее арифметическое рассчитывается по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (3.2)$$

где N – длина исходного ряда.

На рисунках 3.2 и 3.3 показано распределение средних значений хлорофилла «а» и температуры по акватории Карского моря.

Как видно на рисунке 3.2. самые высокие концентрации хлорофилла «а» зафиксированы для Енисейского залива и Обской губы, средние значения составляют от 2,2 до 1 мг м⁻³. Далее по мере удаления от материковой части концентрации хлорофилла «а» падают, что объясняется ледовыми условиями и уменьшением материкового стока.

На рисунке 3.3 можно проследить ту же тенденцию, что и в случае с хлорофиллом «а». Для Обской губы и Енисейского залива характерны достаточно высокие средние значения температуры от 4,4 до 0,4 °С, это можно объяснить интенсивным прогревом этих участков благодаря малой глубине, по мере удаления от материка температура понижается.

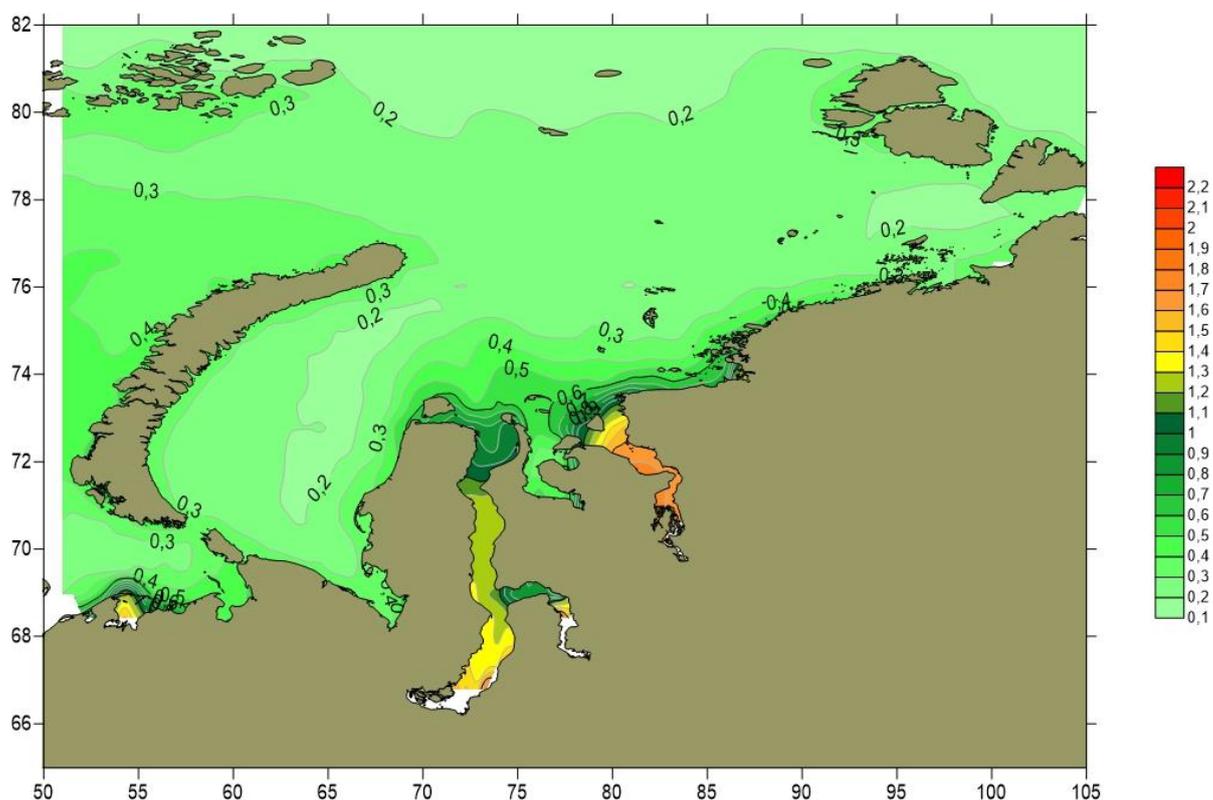


Рис.3.2. Распределение средних значений хлорофилла «а»

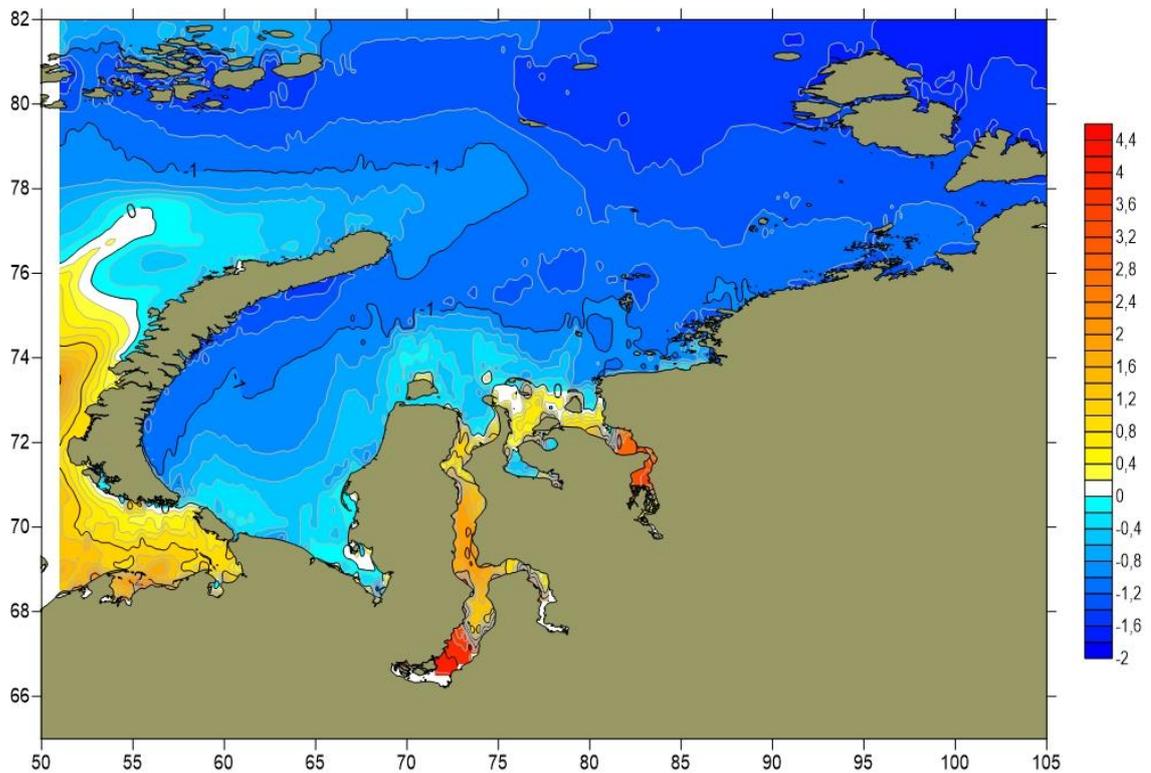


Рис.3.3. Распределение средних показателей температуры

Дисперсия – это мера разброса данных вокруг среднего арифметического значения, рассчитывается по формуле [40]:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.3)$$

На рисунках 3.4 и 3.5 показана дисперсия для значений хлорофилла «а» и температуры по акватории Карского моря.

Можно заметить, что значения дисперсии хлорофилла «а» и температуры для участка акватории, который расположен ближе к Северному Ледовитому океану, характеризуется самыми низкими значениями, это говорит о том, что для данного участка характерны меньшие колебания значений хлорофилла «а» и температуры.

По мере приближения к материковой части значения дисперсии возрастают, что свидетельствует о значительных колебаниях показателей температуры и хлорофилла «а».

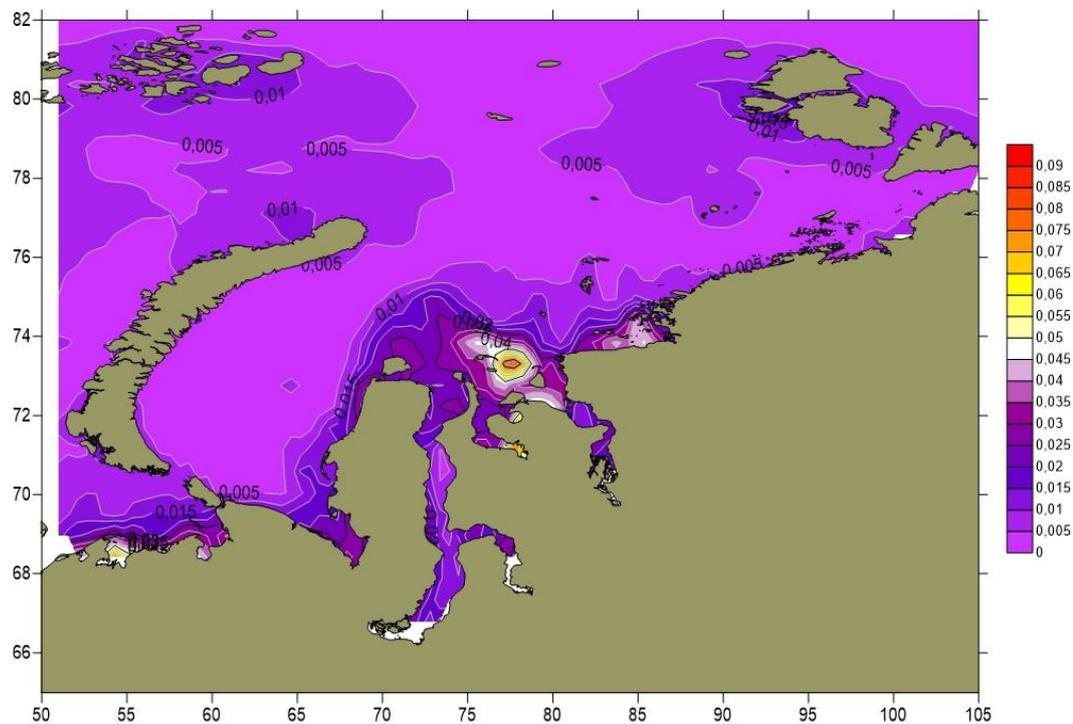


Рис.3.4. Дисперсия значений хлорофилла «а»

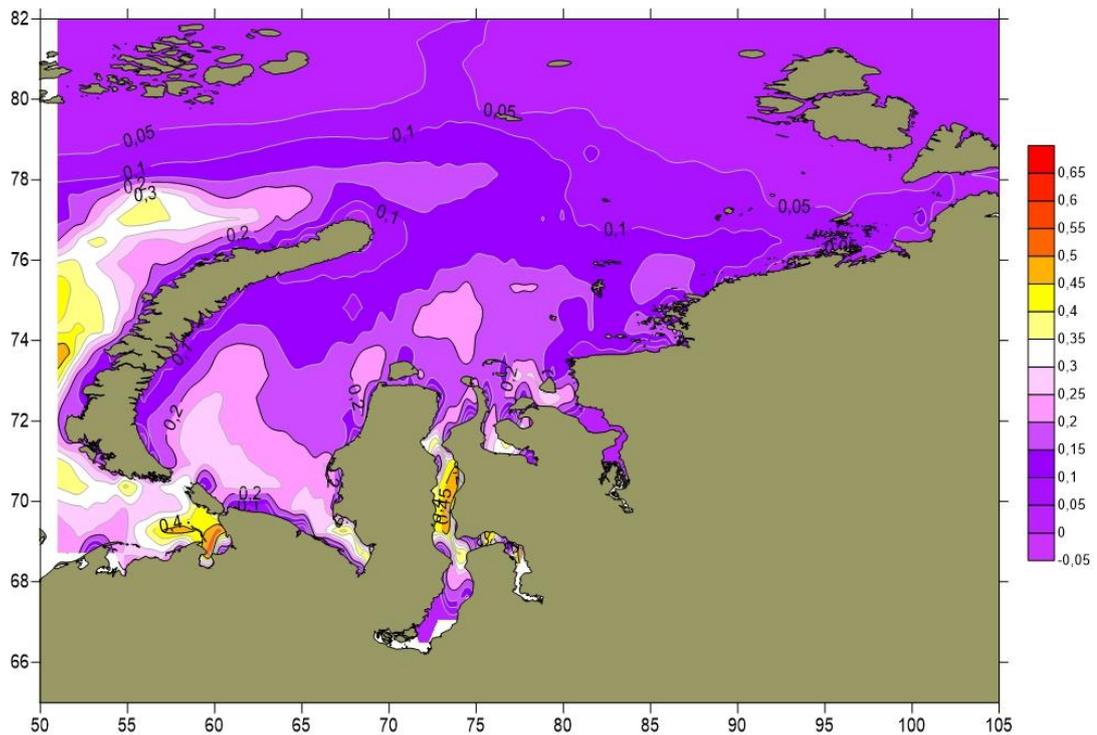


Рис.3.5. Дисперсия значений температуры воды

Далее в программе STATISTICA был проведен кросс-корреляционный анализ, кластерный анализ, на основе которого было проведено районирование акватории Карского моря, и спектральный анализ Фурье для каждого полученного класса.

3.2 Кросс-корреляционный анализ

Взаимная корреляция (кросс-корреляция) – это измерение, отслеживающее движение двух или более наборов данных временных рядов относительно друг друга [41]. Она используется для сравнения нескольких временных рядов и объективного определения того, насколько хорошо они совпадают друг с другом и, в частности, в какой момент происходит наилучшее совпадение. Кросс-корреляция также может выявить какие-либо периодичности в данных.

Кросс-корреляционная функция определяется для двух стационарных временных рядов как коэффициент корреляции между x_t и y_{t+k} в зависимости от k :

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} X_t Y_{t+k} - \sum_{t=1}^{n-k} Y_t \sum_{t=1}^{n-k} X_{t+k} / (n-k)}{\sqrt{\left[\sum_{t=k}^{n-k} Y_t^2 - \sum_{t=k}^{n-k} Y_t^2 / (n-k) \right] \left[\sum_{t=k+1}^n X_t^2 - \sum_{t=k+1}^n X_t^2 / (n-k) \right]}} \quad (3.4)$$

Ряд $r_k = r(k)$ представляет собой таблично заданную корреляционную функцию, которая затухает довольно быстро. Наличие пиков в ККФ указывает на наличие временного лага. Если пики в функции $r(k)$ повторяются через определенное время, то взаимное влияние рядов носит периодический характер [41].

3.3 Кластерный анализ

Кластерный анализ. Кластерный анализ представляет собой совокупность методов и алгоритмов теории распознавания образов, направленных на решение процедуры классификации множества объектов в многомерном пространстве признаков посредством процедуры самообучения [42].

Главная задача кластерного анализа заключается в разбиении данных на определенное число однородных групп, то есть геометрическая близость двух или более объектов означает сходство их физических состояний. Чем ближе данные расположены друг к другу в пространстве признаков, тем меньше различия в их физических характеристиках [43].

Таким образом, главной задачей КА является выделение компактных групп точек в многомерном пространстве исходных признаков. При этом

важным является знание числа выделяемых классов, которое в общем случае до начала классификации может быть и неизвестно. Считается также, что варьированием (изменчивостью) характеристик внутри класса можно пренебречь как несущественным (т.е. дисперсия характеристик внутри класса должна быть малой) [42].

Кластером называется такая группа объектов из рассматриваемого множества, для которой средний квадрат внутригруппового расстояния до центра группы меньше среднего квадрата расстояния до общего центра в исходной совокупности.

Выбор меры расстояния. Метод древовидной кластеризации используется при формировании кластеров несходства или расстояния между объектами. [44].

Евклидово расстояние. Оно является геометрическим расстоянием в многомерном пространстве и вычисляется следующим образом:

$$d(x_j, x_{j+1}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{i,j} - x_{i,j+1})^2} \quad (3.5)$$

где n – число исходных признаков; p_i – вес i -того признака; b и c – параметры, определяемые пользователем, которые могут быть любыми положительными числами. Параметр b ответственен за постепенное взвешивание разностей по отдельным координатам, параметр c ответственен за прогрессивное взвешивание больших расстояний между объектами.

Евклидово расстояние (и его квадрат) вычисляется по исходным данным. Это обычный способ его вычисления, который имеет определенные преимущества (например, расстояние между двумя объектами не изменяется при введении в анализ нового объекта, который может оказаться выбросом) [42].

Манхэттенское расстояние. Это расстояние является средним разностей по координатам. Для этой меры влияние отдельных выбросов уменьшается. Вычисляется по формуле:

$$d(x_j, x_{j+1}) = \sum |x_{ij} - x_{ij+1}|. \quad (3.6)$$

Расстояние Чебышева. Это расстояние полезно, при определении двух объектов как "различных", если они различаются по какой-либо одной координате (каким-либо одним измерением). Вычисляется по формуле:

$$d(x_j, x_{j+1}) = \max |x_{ij} - x_{ij+1}|. \quad (3.7)$$

Правила объединения или связи. На первом шаге, каждый объект представляет собой отдельный кластер, расстояния между этими объектами определяются выбранной мерой. Однако когда связываются вместе несколько объектов, необходимо правило объединения или связи двух кластеров [44].

Метод одиночной связи. Реализуется стратегия ближайшего соседа, при которой расстояние между двумя кластерами определяется как расстояние между двумя самыми близкими элементами этих групп [42].

Метод полных связей. Реализует стратегию наиболее удаленного соседа, когда объединение групп точек в одну совокупность определяется расстоянием между двумя самыми удаленными элементами из этих групп [44].

Метод попарного среднего. Расстояние между двумя различными кластерами вычисляется как среднее арифметическое расстояние между всеми парами объектов в них.

Метод средней связи. Расстояние между двумя кластерами определяется как расстояние между центрами их тяжести.

Метод медианной связи. В данном методе выбирается расстояние от центра i -го кластера до середины отрезка соединяющего центры тяжести двух других кластеров. Стратегия монотонна, а ее свойства полностью зависят от величины β .

Если $\beta=0$, то стратегия сохраняет метрику пространства. Если $\beta>0$, то стратегия сжимает пространство, если $\beta<0$, то растягивает. На практике обычно используется значение $\beta=-0.25$.

Метод Уорда. Отличается от других алгоритмов тем, что использует методы дисперсионного анализа для оценки расстояний между кластерами. Он минимизирует сумму квадратов расстояния для двух кластеров, формирование которых происходит на каждом шаге [44]. Сумма квадратов при этом определяется как:

$$SS = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (x_{i,j} - \bar{x}_{j,k})^2 \quad (3.8)$$

где k – номер кластера; i – номер объекта; j – номер признака; p – количество признаков, характеризующих каждый объект, n — количество объектов в k -м кластере.

Кластеризация методом К-средних. Целью метода k -средних является разделение m наблюдений (из пространства R^n) на k кластеров, при этом каждое наблюдение относится к тому кластеру, к центру (центроиду) которого оно ближе всего [45].

В качестве меры близости используется Евклидово расстояние:

$$\rho(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_p - y_p)^2} \quad (3.9)$$

где $x, y \in R^n$

Например, мы имеем ряд наблюдений $(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)})$, $x^{(i)} \in R^n$.

Метод k -средних разделяет m наблюдений на k групп (или кластеров) ($k \leq m$) $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$, чтобы минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центроидов этих кластеров:

$$\min \left[\sum_{i=1}^k \sum_{x^{(j)} \in S_i} \|x^{(j)} - \mu_i\|^2 \right], \quad (3.10)$$

где $x^{(i)} \in R^n$, $\mu_i \in R^n$; μ_i - центроид для кластера S_i

Если мера близости до центроида определена, то разбиение объектов на кластеры сводится к определению центроидов этих кластеров. Число кластеров k задается исследователем заранее.

Рассмотрим первоначальный набор k средних μ_1, \dots, μ_k в кластерах S_1, S_2, \dots, S_k . На первом этапе центроиды кластеров выбираются случайно или по определенному правилу.

Относим наблюдения к тем кластерам, чье среднее к ним ближе всего [45].

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

$$\mu_j = \frac{1}{s_j} \sum_{x^{(j)} \in S_j} x^{(j)} \quad (3.11)$$

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

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

3.4 Спектральный анализ

Спектральный анализ. Для обработки данных, определённых дискретной зависимостью $y(x_i)$ или непрерывной функцией $f(x)$, используется спектральный анализ, имеющий в своей основе различные интегральные преобразования. Спектром совокупности данных $y(x)$ называют некоторую функцию другой координаты $F(\omega)$, полученную в соответствии с определённым алгоритмом. Примерами спектров являются преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Каждое из них эффективно для решения определенных задач анализа данных [46].

К задачам спектрального анализа относят проблемы сглаживания и фильтрации данных. Они заключаются в построении из исходной экспериментальной зависимости $y(x_i)$ некоторой зависимости $f(x)$, которая должна приблизить её, учитывая к тому же, что данные (x_i, y_i) получены с некоторой погрешностью, выражающей шумовую компоненту измерений.

При этом функция $f(x)$ с помощью определенных алгоритмов уменьшает погрешность, присутствующую в данных (x_i, y_i) (3.12). Такого типа задачи называются задачами фильтрации [46].

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(x) \cdot \exp(-i\omega x) dx \quad (3.12)$$

Одним из простейших видов колебательных смещений является синусоида, описываемая уравнением вида:

$$y = F(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t = a \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.13)$$

где a - амплитуда колебания, φ -фаза.

С помощью этих величин можно определить коэффициенты A и B :

$$A = a \sin \varphi; \quad B = a \cos \varphi \quad (3.14)$$

Такое синусоидальное колебание является монохроматическим по отношению к частоте ω . Оно имеет одно единственное значение амплитуды a и фазы φ в функции частоты [46].

При сложении нескольких синусоидальных колебаний с различными частотами $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ амплитудный спектр суммарного колебания характеризуется наличием n линий, т.е. будет линейчатым. При этом функция, изображающая характер колебаний, выражается суммой:

$$F(\omega) = \sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_n} [A(\omega) \cos \omega t + B(\omega) \sin \omega t] \quad (3.15)$$

Если колебания носят непериодический характер, то функцию $F(t)$ можно представить как предел суммы бесконечно большого количества гармонических колебаний, различающихся по частоте на бесконечно малую величину $d\omega$, т.е. воспользоваться интегралом Фурье [46]:

$$F(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [A(\omega) \cos \omega t + B(\omega) \sin \omega t] d\omega$$

где $A_0 = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt$, $A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt$; $B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt$. (3.16)

Любую периодическую функцию $f(t)$ периода T можно представить в виде дискретного ряда Фурье:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \exp[i\beta \omega_n t] \quad (3.17)$$

где $\omega_n = n\omega_0 = n\frac{2\pi}{T}$ - круговая частота n -ой гармонической составляющей,

C_n – комплексная амплитуда n -ой гармоники

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \exp\{-i\omega_n t\} dt. \quad (3.18)$$

Совокупность коэффициентов C_n называют спектром функции $f(t)$; при этом $|C_n|$ есть амплитуда гармоники частоты ω_n , а $\arg C_n$ – относительный фазовый сдвиг [47].

Современные статистические программы, такие как «Statistica» рассчитывают разложение Фурье методом быстрого преобразования. В качестве результата представляется периодограмма - зависимость дисперсии гармонических составляющих от их частоты, гармоники, имеющие большую дисперсию, представлены «пиками».

4 Межгодовая изменчивость биопродуктивности Карского моря

Под понятием биопродуктивность понимают развитие органического вещества и скорость его воспроизводства в водоеме. На биопродуктивность влияют такие факторы, как географическое положение акватории; глубина и рельеф дна, термохалинный, газовый (количество кислорода, углекислоты, сероводорода) и световой режимы, интенсивность перемешивания вод, характер течений, наличие биогенов, видовой состав экосистемы, интенсивность и характер промысла, загрязненность вод [48].

Знание процессов и объемов образования первичной органики из минеральных соединений, которые входят в состав морской воды, имеет важное значение для определения биопродукционных возможностей водоема.

Растения из энергии солнца и минеральных веществ путем сложных биохимических реакций способны образовывать клетки и ткани.

В нашей работе были использованы осредненные по годам данные среднемесячных значений концентрации фитопланктона, хлорофилла «а», температуры воды, солености, концентрации фосфатов и нитратов с 2000 по 2020 год.

Для оценки изменения биопродуктивности в Карском море нами были использованы следующие статистические характеристики: кросс-корреляционный анализ, кластерный анализ, спектральный анализ.

4.1 Кросс-корреляционный анализ первичной продукции Карского моря

Кросс-корреляционный анализ показывает насколько хорошо два ряда данных совпадают друг с другом и в какой момент происходит наилучшее совпадение.

В данных кросс-корреляционных моделях зависимой переменной будет выступать фитопланктон.

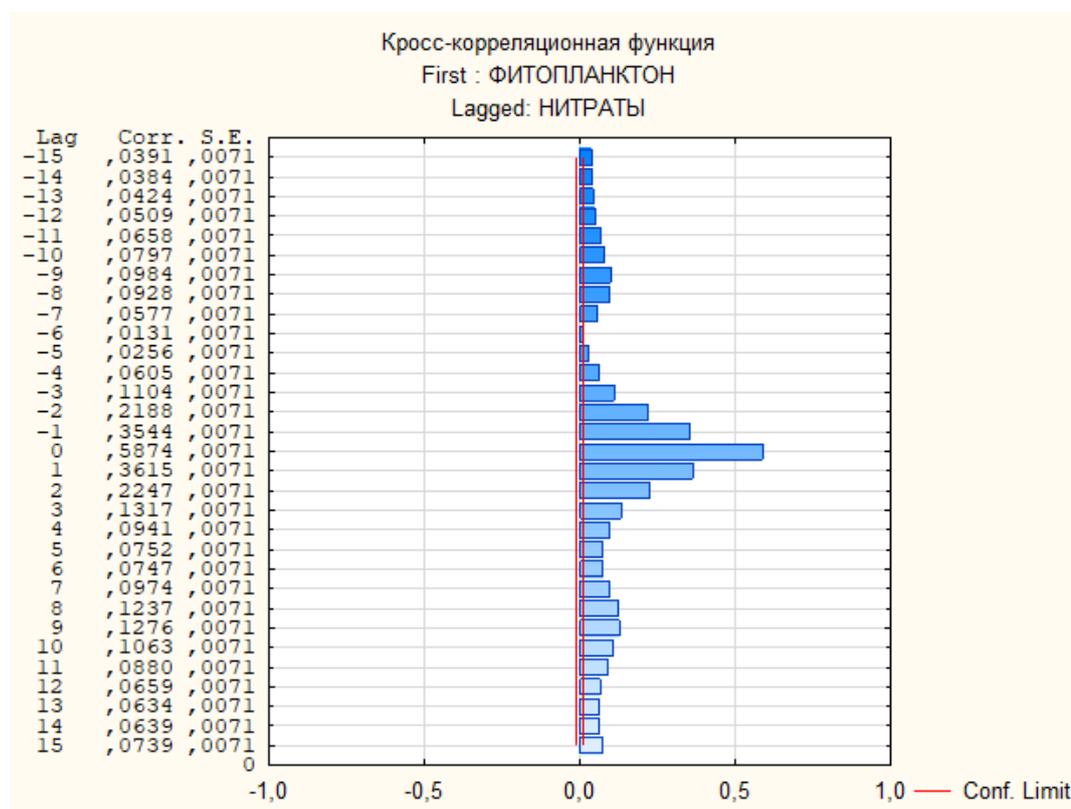


Рис.4.1. Кросс-корреляция между рядами данных концентрации фитопланктона и нитратов

На рисунке 4.1 можно увидеть, что коэффициенты корреляции (КК) находятся в пределах от 0 до +0,6 , это значит, что связь прямая, то есть, когда значения одной переменной (концентрации нитратов) возрастают, то значения второй переменной (концентрации фитопланктона) также возрастают. На 0 лаге линейная связь значительна, т.к. КК лежит в пределах 0,51-0,7. На 1 и -1 лагах теснота линейной связи умеренная, т.к. КК находится в пределах 0,31 до 0,5. Для остальных лагов теснота линейной связи оценивается как слабая. Таким образом, можно сделать вывод, что концентрация нитратов прямо пропорционально влияет на концентрацию фитопланктона в Карском море.

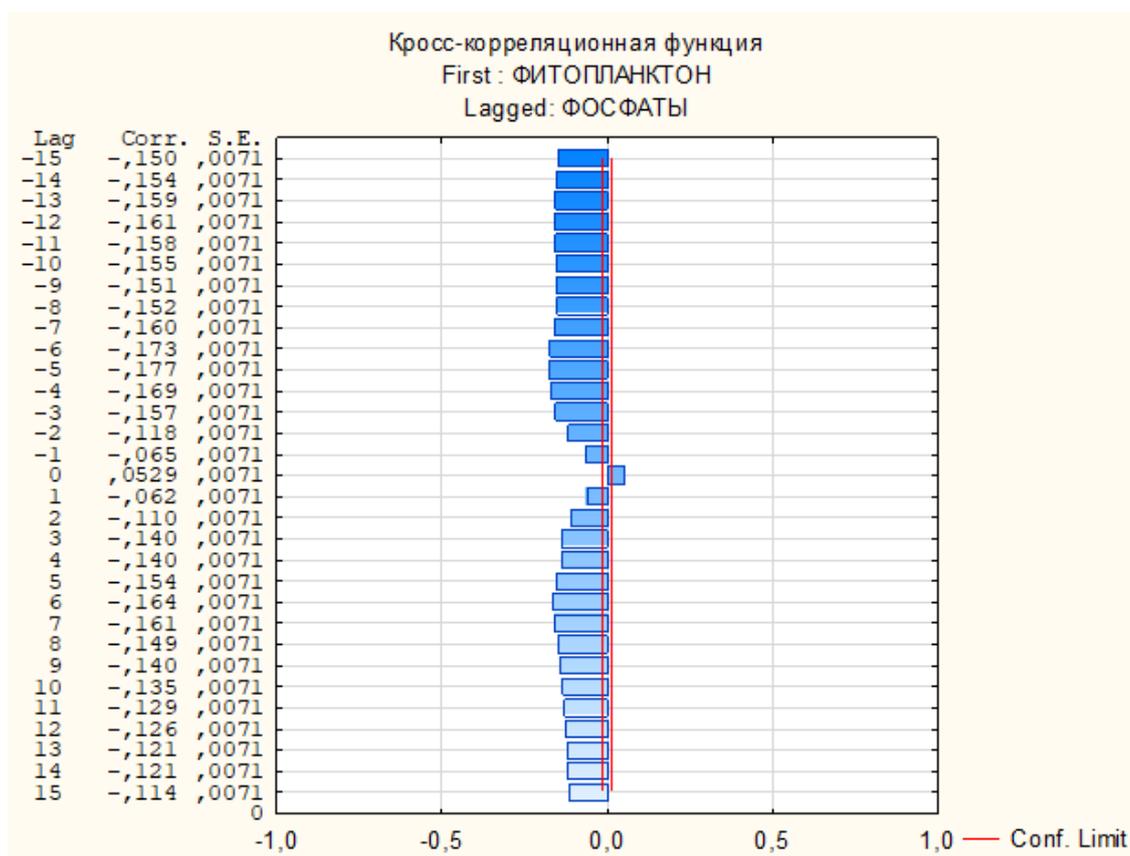


Рис.4.2. Кросс-корреляция между рядами данных концентрации фитопланктона и фосфатов

На рисунке 4.2 можно увидеть, что коэффициенты корреляции находятся в пределах от -0,2 до +0,05 , это значит, что связь обратная, то есть, когда значения одной переменной возрастают (концентрация фосфатов), то значения второй переменной убывают (концентрация фитопланктона). При величине корреляции менее 0,3 линейная связь оценивается как слабая. Таким образом, можно сделать вывод, что концентрация фосфатов влияет обратно пропорционально на концентрацию фитопланктона Карского моря.

Лабораторные и натурные наблюдения показали, что накопление определенных концентраций азота и фосфора приводит к росту продуктивности одних видов и снижению продуктивности других [49].

Фосфаты могут служить лимитирующим фактором развития фитопланктона, некоторые виды хорошо развиваются при повышенных

концентрациях, на других же избыток фосфатов может оказывать угнетающее действие (например, для диатомовых водорослей оптимальный диапазон составляет 0,002 – 0.01 мгР/л) [50].

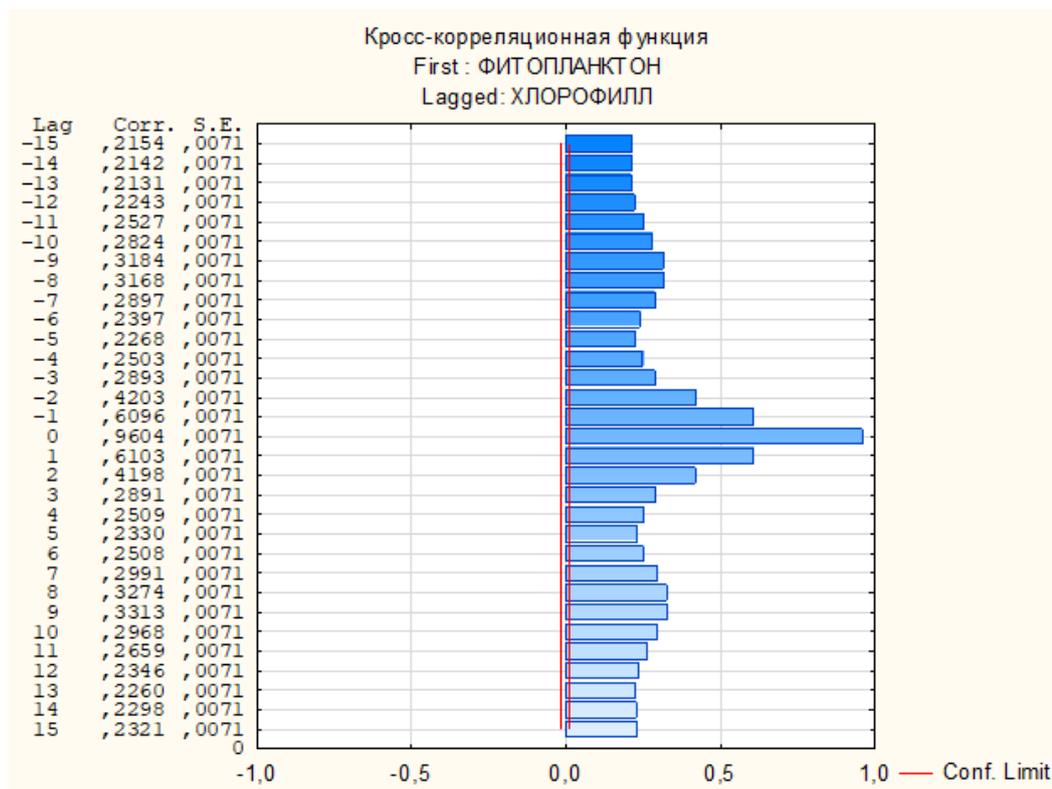


Рис.4.3. Кросс-корреляция между рядами данных концентрации фитопланктона и хлорофилла «а»

На рисунке 4.3 можно увидеть, что коэффициенты корреляции находятся в пределах от 0 до +0,96 , это значит, что связь прямая, то есть, когда значения одной переменной (концентрация хлорофилла «а») возрастают, то значения второй переменной (концентрация фитопланктона) также возрастают. На 0 лаге теснота линейной связи наибольшая и близка к +1, это говорит о том, что связь очень тесная. На -1 и 1 лагах теснота связи значительная. На -2 и 2 лагах теснота линейной связи умеренная. На остальных лагах связь слабая. Основной фотосинтетический пигмент фитопланктона – хлорофилл «а» обнаружен во всех группах водорослей, поэтому является общепринятым показателем

биомассы первичной продукции в океане, что доказывается такой высокой теснотой связи.

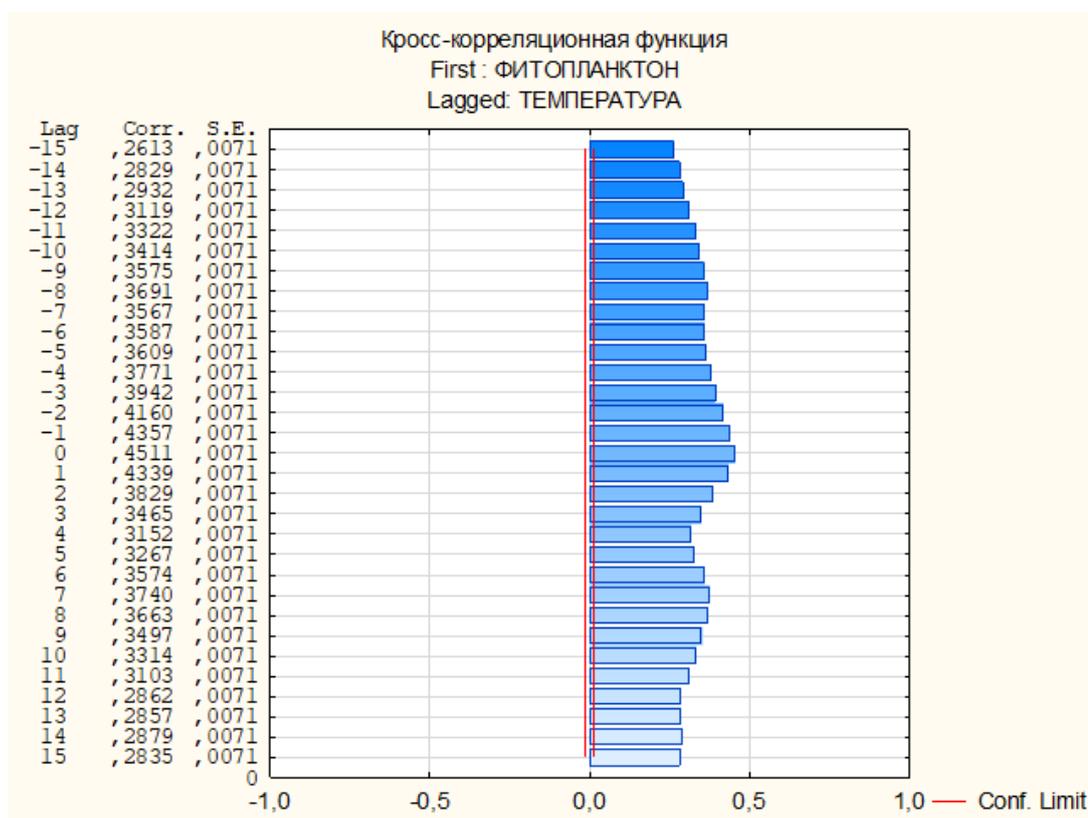


Рис.4.4. Кросс-корреляция между рядами данных концентрации фитопланктона и температуры

На рисунке 4.4 можно увидеть, что коэффициенты корреляции находятся в пределах от 0 до +0,45 , это значит, что связь прямая. Теснота линейных связей на большинстве лагов характеризуется как умеренная, после -12 и +12 как слабая. Таким образом, можно сделать вывод, что температура прямо пропорционально влияет на концентрацию фитопланктона в Карском море.

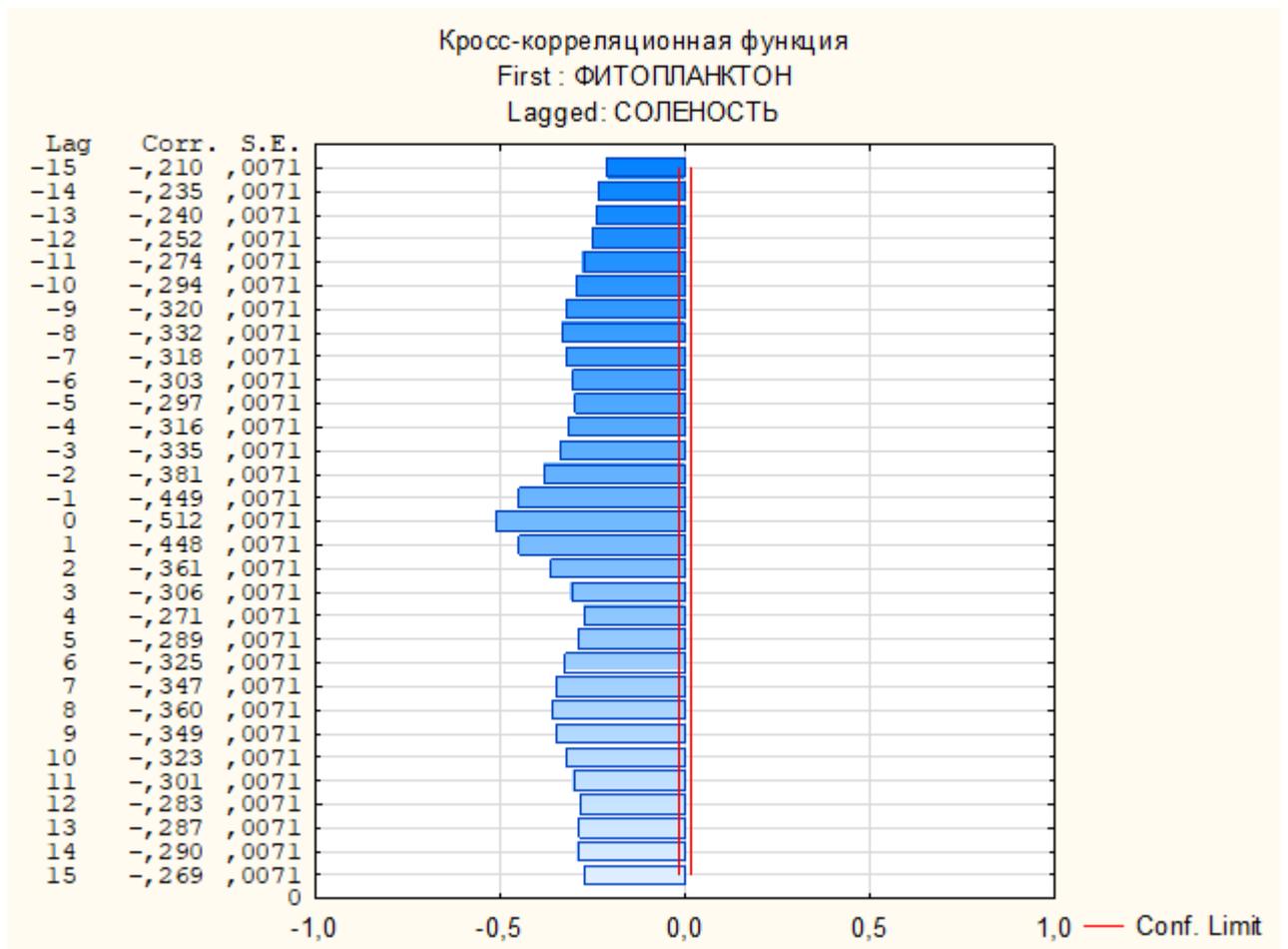


Рис.4.5. Кросс-корреляция между рядами данных концентрации фитопланктона и солености

На рисунке 4.5 можно увидеть, что коэффициенты корреляции находятся в пределах от -0,51 до 0, связь обратная, то есть, когда значения одной переменной возрастают (показатели солености), то значения второй переменной убывают (концентрация фитопланктона). Теснота линейных связей характеризуется как умеренная и слабая. Таким образом, можно сделать вывод, что для акватории Карского моря в большей степени характерно наличие пресноводных видов фитопланктона.

4.2 Кластерный анализ первичной продукции Карского моря

Кластерный анализ используется для разбиения определенного количества наблюдений по нескольким классам.

Для определения количества классов был использован метод кластерного анализа К-средних в программе Statistica. Среднегодовые данные о распределении хлорофилла «а», нитратов, фосфатов и температуры были стандартизированы.

Стандартизация преобразует исходные данные к набору значений из распределения с нулевым средним стандартным отклонением, равным 1 для того, чтобы их можно было сравнивать друг с другом.

Стандартизация данных осуществляется по формуле:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma_x} \quad (4.19)$$

Где x_i — исходное значение признака, \bar{X} и σ_x — среднее значение и стандартное отклонение признака, оцененные по набору данных.

Далее встала задача выбора числа кластеров таким образом, чтобы среднее внутриклассовое расстояние было как можно меньше, а среднее межклассовое расстояние как можно больше. Для этого были рассчитаны критерии оптимальности J по формулам:

$$J_1 = (cpVKрасст / cpMKрасст) \quad (4.20)$$

$$J_2 = cpMKрасст - cpVKрасст \quad (4.21)$$

Где $cpVKрасст$ — среднее внутриклассовое расстояние, а $cpMKрасст$ — среднее межклассовое расстояние

На основании этого было выбрано распределение по восьми классам (табл.2), так как критерий оптимальности J_1 для данного разбиения оказался наименьшим (0,2690), а критерий оптимальности J_2 – наибольшим (1,5271).

Таблица 2. Выбор наилучшего разбиения в классы

Число классов	Среднее межклассовое расстояние	Среднее внутриклассовое расстояние	Критерий оптимальности J_1	Критерий оптимальности J_2
3	2.0620	0.7642	0.3706	1.2978
4	1.8839	0.7059	0.3747	1.1780
5	1.7637	0.6163	0.3494	1.1474
6	1.7502	0.5952	0.3401	1.1550
7	1.7243	0.5463	0.3169	1.1780
8	2.0891	0.5619	0.2690	1.5271
9	1.5903	0.4933	0.3102	1.0970
10	1.7300	0.4840	0.2798	1.2460

Для лучшего понимания особенностей акватории и закономерностей приводящих к тем или иным результатам, применяется районирование моря, в нашем случае по нескольким характеристикам (концентрации фосфатов, нитратов, хлорофилла «а» и температуре).

На основании данного разбиения по восьми классам было проведено районирование акватории Карского моря и прилегающих к нему районов Баренцева моря и Северного Ледовитого океана, что более подробно будет рассмотрено в пункте 4.3.

4.3 Районирование Карского моря

Результаты разбиения по восьми классам можно увидеть на рисунке 4.6 и в приложении 1.

Районы Баренцева моря и Северного Ледовитого океана были включены в анализ для более полного рассмотрения динамики процессов, влияющих на распределение первичной продукции Карского моря.

1 класс - на рисунке 4.6, можно увидеть, что к нему относятся прилежащие районы моря к эстуариям Оби и Енисея. Исключение составляет 2020 год, для которого площадь первого класса увеличилась и занимает район акватории от Новой Земли до п-ва Таймыр.

2 класс – к нему относится район Обской губы и частично Енисейский залив. В 2020 году площадь района распространилась на районы прилежащие к эстуариям Оби и Енисея.

3 класс – к нему относится район акватории от Новой Земли до п-ва Таймыр, но в 2020 году площадь этого района уменьшилась, остались небольшие участки возле Новой Земли и Северной Земли.

4 класс – расположен севернее района третьего класса от Новой Земли до Северной Земли. Для 2020 года характерно увеличение площади этого класса, большее распространение к берегам Новой Земли.

5 класс – относится район Байдорацкой губы и часть Баренцева моря возле пролива Карские ворота.

6 класс – относится район расположенный севернее 77° с.ш.

7 класс – относится район, расположенный севернее шестого класса до 70° в.д. Для 2000 года характерно расположение еще и севернее Северной Земли. В 2020 году не выделяется в отдельный класс.

8 класс – к нему относится район Енисейского залива.

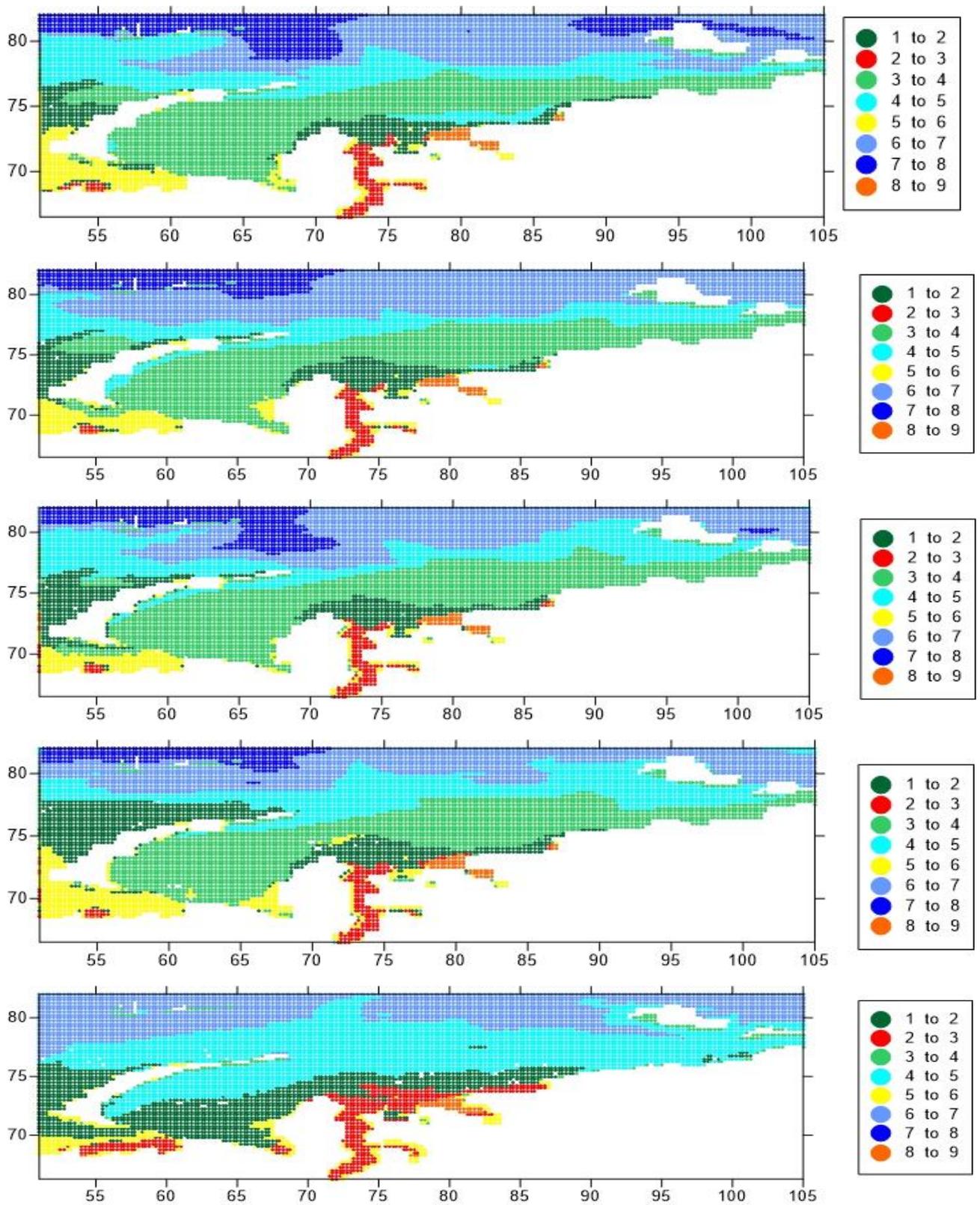


Рис.4.6. Районирование Карского моря по 8-ми классам за 2000, 2005, 2010, 2015 и 2020 года.

По акватории максимальные значения первичной продукции находятся у поверхности, затем она постепенно убывает с глубиной. Совсем другая картина характерна для Обской губы и Енисейского залива, там максимальные значения фитопланктона приходятся на глубину 12 метров и могут достигать концентрации до 46 ммоль м^{-3} .

Для примера приведем распределение значений фитопланктона за июль месяц (т.к. почти во все годы концентрация фитопланктона в данный месяц характеризуется наивысшими значениями), на глубине 0,5 м, 5 м, 12 м, 23 м, 41 м, 77 м для 2000, 2010 и 2020 года.

Как видно на рисунке 4.7, основная концентрация фитопланктона в 2000 году располагается в Обской губе, Енисейском заливе и районе акватории от Новой Земли до полуострова Таймыр, так же небольшие концентрации зафиксированы возле Северной Земли. В Обской губе и Енисейском заливе на глубине 12 метров происходит значительное повышение концентрации фитопланктона. Малые концентрации, до $0,1 \text{ ммоль м}^{-3}$ присутствуют по всей акватории до глубины 100 м.

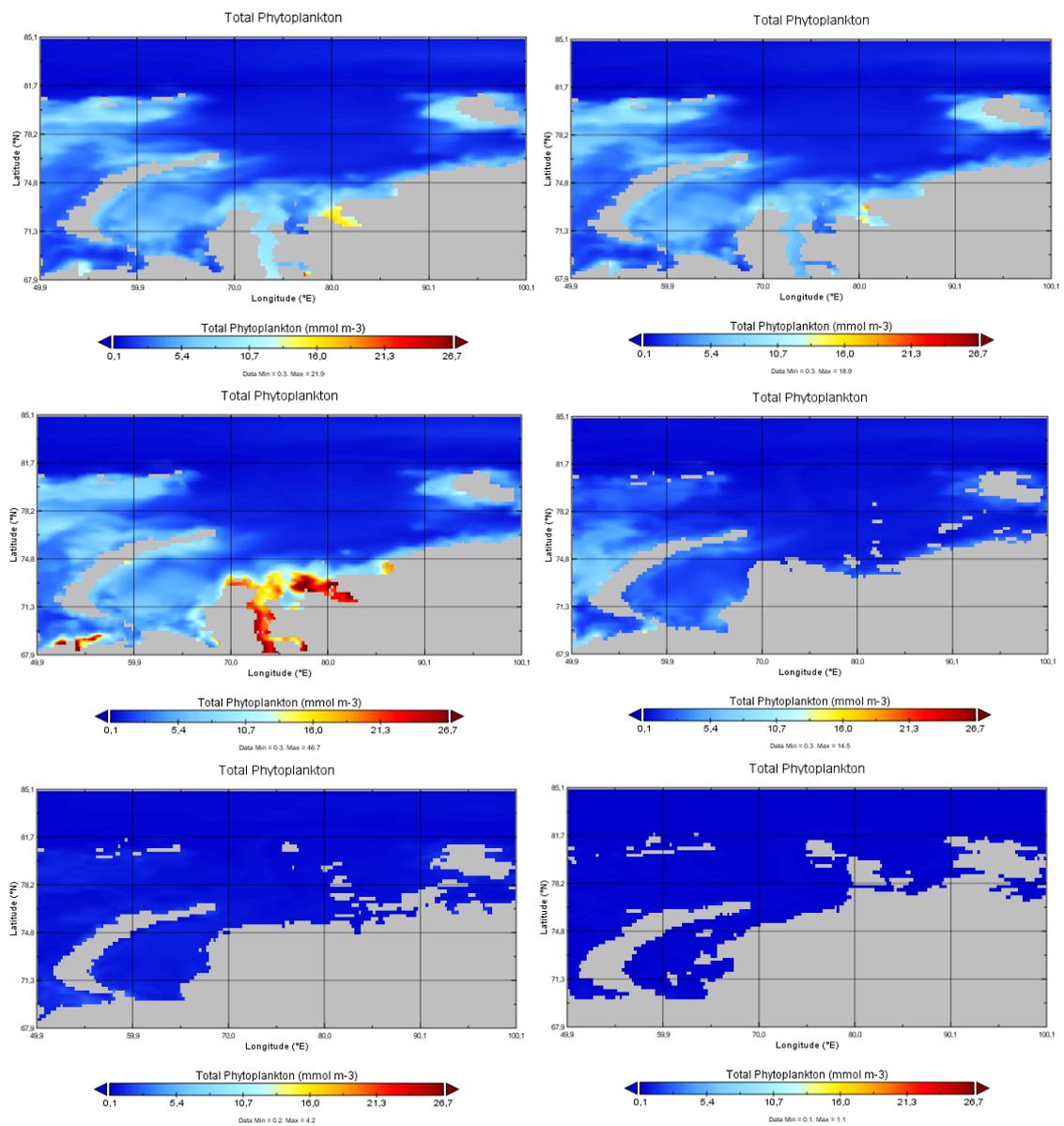


Рис.4.7. Распределение значений фитопланктона по глубине за июль 2000
года

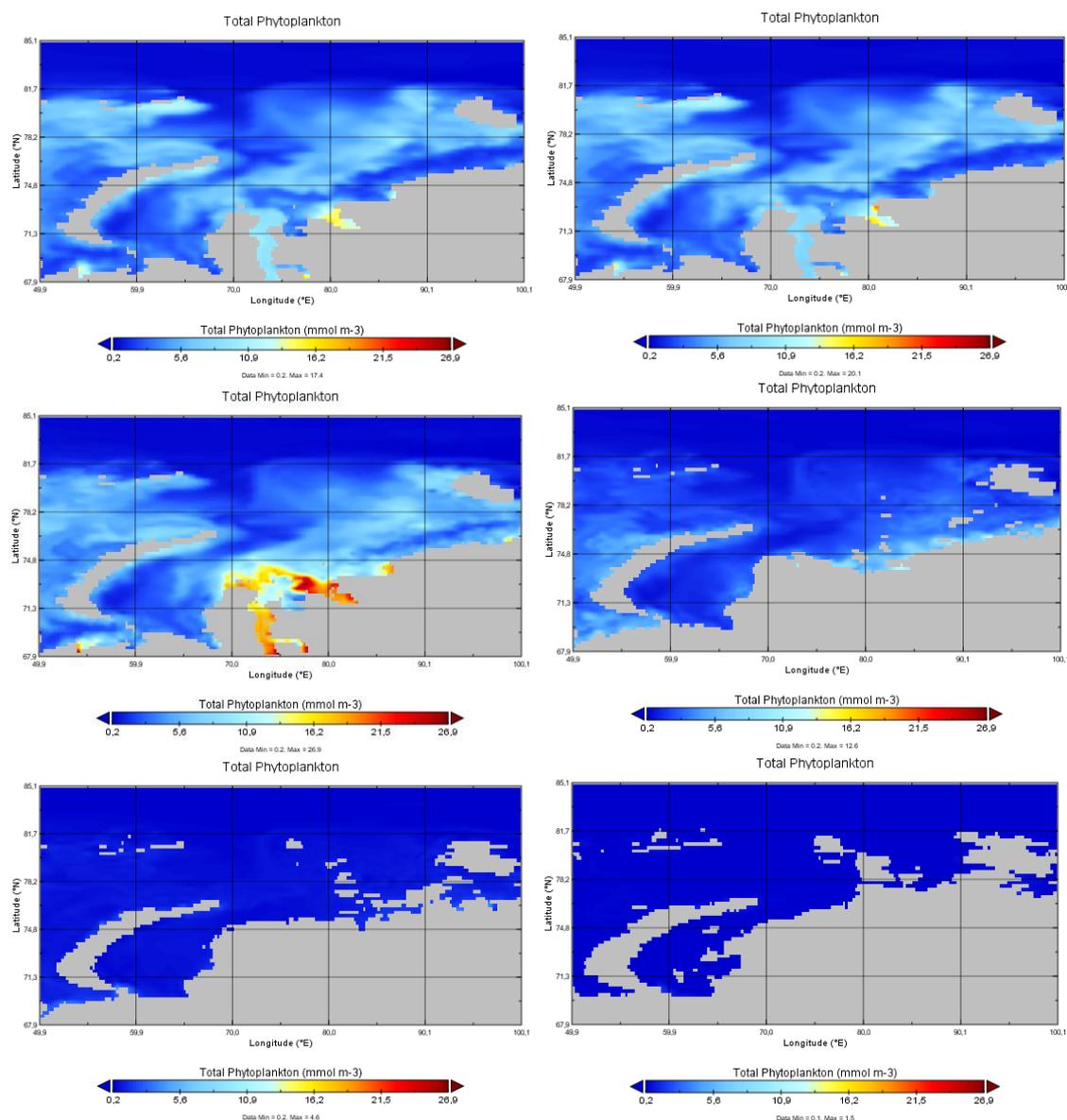


Рис.4.8. Распределение значений фитопланктона по глубине за июль 2010 года

На рисунке 4.8 можно заметить, что для 2010 года по сравнению с 2000 годом большая площадь акватории занята фитопланктоном, теперь занимает почти полностью район от Новой Земли до Северной Земли. Так же как и для 2000 года наибольшие концентрации зафиксированы для Обской губы и Енисейского залива на глубине 12 метров и составляют от 16 до 26 ммоль м⁻³.

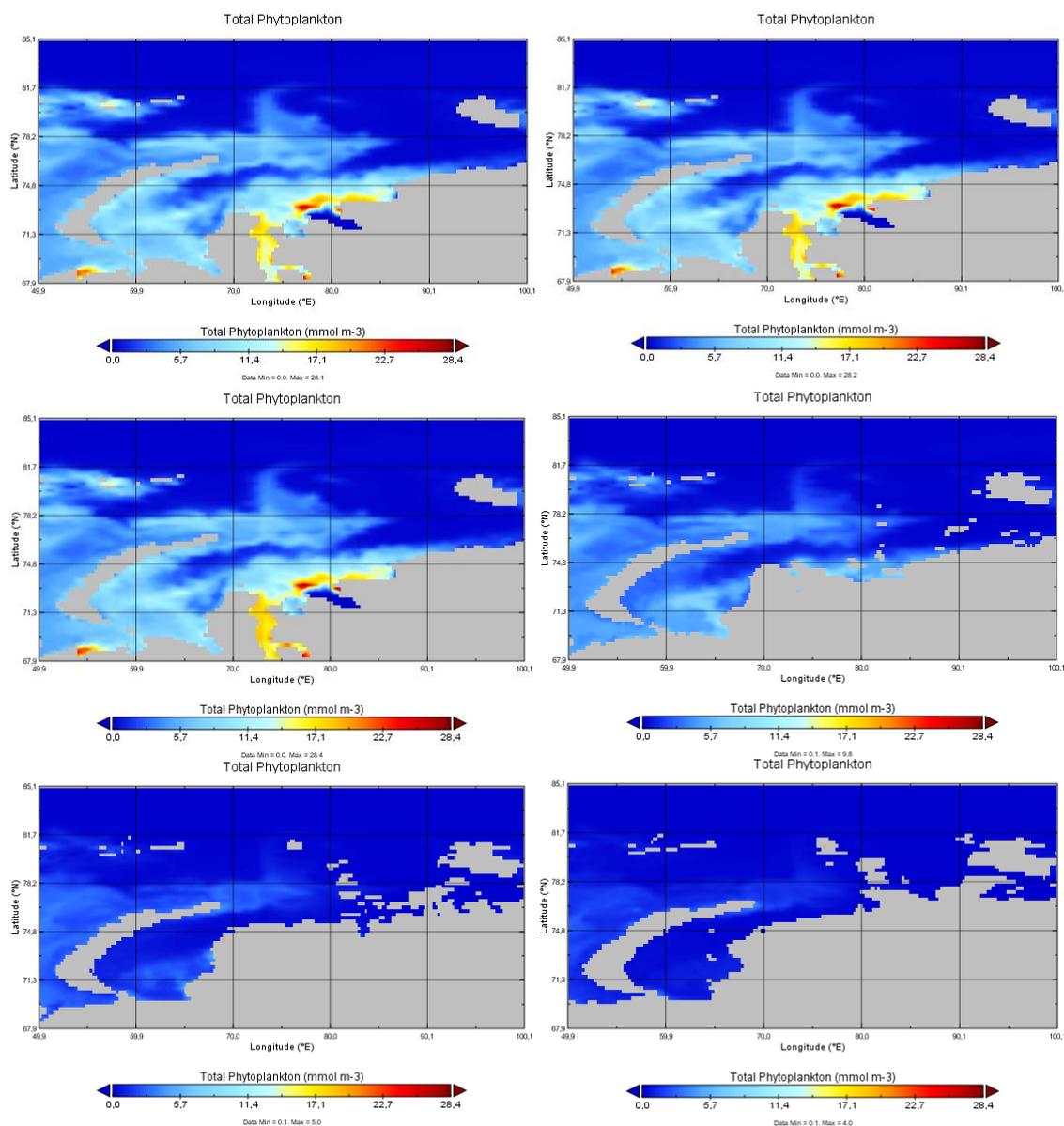


Рис.4.9. Распределение значений фитопланктона по глубине за июль 2020 года

В 2020 году распределение фитопланктона по акватории Карского моря похоже на 2000 год, как видно на рисунке 4.9, за исключением распределения на глубину. В 2020 году даже на глубине 77 метров присутствуют концентрации до 4 ммоль м⁻³. Так же как для 2000 и 2010 года наибольшие концентрации зафиксированы для Обской губы и Енисейского залива на глубине 12 метров.

На основании всего вышесказанного можно выделить 5 районов по концентрации первичной продукции и глубине (рис. 4.10).

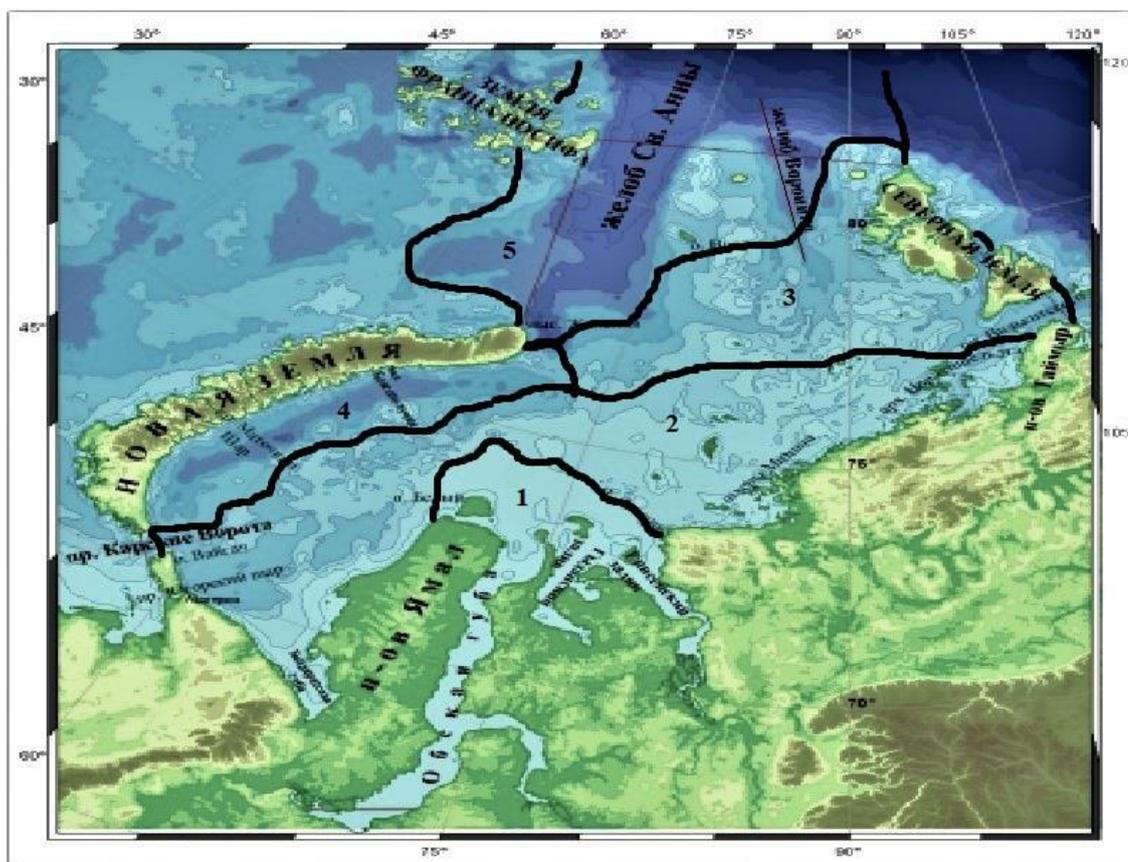


Рис.4.10. Продукционные районы Карского моря. 1-эстуарный, 2-внутренний шельф (с глубиной до 100 м), 3-район внешний шельф, 4-район Новой Земли, 5-глубоководный северный район

Район 1 – эстуарный включает в себя Обскую губу, Енисейский залив и прилежащие к ним районы Карского моря. Характеризуются малой глубиной до 20 м и большим содержанием фитопланктона от 26 до 46 ммоль м⁻³ в летние месяцы. Можно предположить, что за счет сильно распресненных вод, в этом районе преобладает в большей части пресноводный планктон.

Район 2 – внутренний шельф характеризуется глубиной от 20 до 100 м. Этот район круглый год находится под воздействием притока вод из Баренцева моря через полив Карские Ворота и речного стока, поэтому, скорее всего, в данном районе, как и в эстуарном, преобладает пресноводный планктон. Концентрация фитопланктона достаточно высока и составляет в летние месяцы от 7 до 15 ммоль м⁻³.

Район 3 – внешний шельф характеризуется глубинами от 100 до 200 м. Этот район так же находится под действием материкового стока, но в меньшей степени. Концентрации фитопланктона в летние месяцы находятся в пределах от 3 до 12 ммоль м⁻³.

Район 4 – район Новой Земли характеризуется глубиной до 300 м (находится Новоземельская впадина), так же находится под действием речного стока. Концентрация фитопланктона достаточно высока и составляет в летние месяцы от 7 до 13 ммоль м⁻³.

Район 5 – глубоководный северный характеризуется глубиной до 600 м (желоба Св. Анны и Воронина). Благодаря влиянию Северного Ледовитого океана даже в летние месяцы может быть покрыт льдом, но в последние годы в связи с изменением климатических условий, кромка льда дальше отодвигается на север, открывая все большие пространства акватории. Концентрация фитопланктона в летние месяцы самая низкая от 0,1 до 3 ммоль м⁻³.

4.4 Спектральный анализ первичной продукции Карского моря

Спектральный анализ – разложение комплексных стационарных рядов данных с циклическими составляющими на основные синусоидальные функции с заданной длиной волн, появление которых особенно существенно и значимо. В результате анализа можно обнаружить всего несколько основных периодических компонент (функций синусов или косинусов) в изучаемом временном ряду, который, на первый взгляд, выглядит как случайный шум, что позволит изучить интересующее явление.

Для спектрального анализа Фурье было взято по 1 точке акватории из каждого класса таким образом, чтобы на протяжении всего временного периода с 2000 по 2020 года данная точка находилась в этом классе, что можно увидеть в таблице 3 и на рисунке 4.11.

Таблица 3. Координаты точек акватории, характеризующие классы

Номер класса	Цвет	Широта	Долгота
1	Зеленый	73.25	74
2	Красный	71.5	72.5
3	Светло-зеленый	79.75	93.25
4	Синий	76.75	72
5	Желтый	72	77.75
6	Светло-голубой	79	85
7	Темно-синий	81.75	60
8	Оранжевый	72.5	80

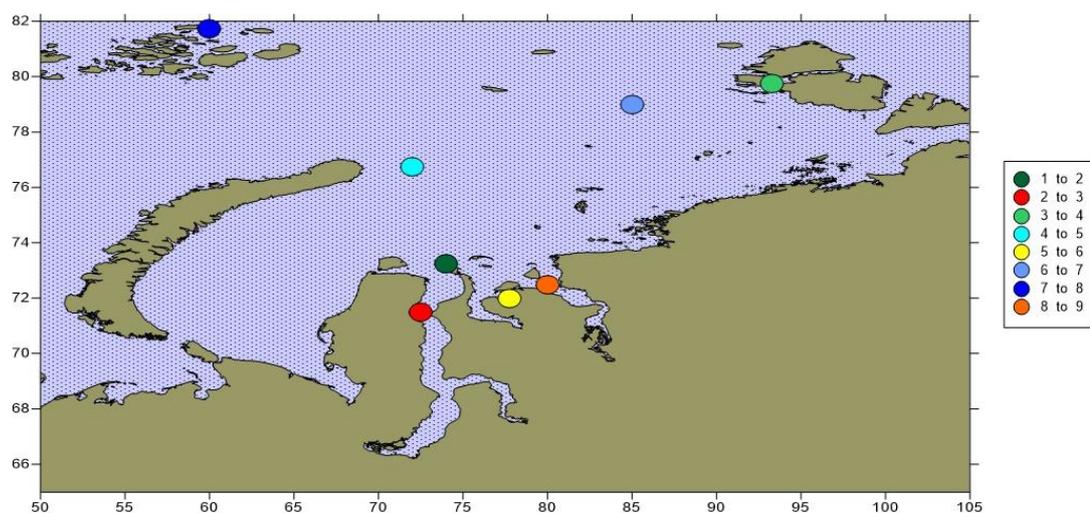


Рис. 4.11. Точки акватории, для каждого из восьми полученных классов

Для исследования периодичности спектральным анализом Фурье были взяты ряды среднемесячных значений концентрации нитратов, фосфатов, хлорофилла «а» и температуры для каждого из 8 классов.

На рисунке 4.12 можно увидеть динамику изменения концентрации нитратов по месяцам в каждом классе.

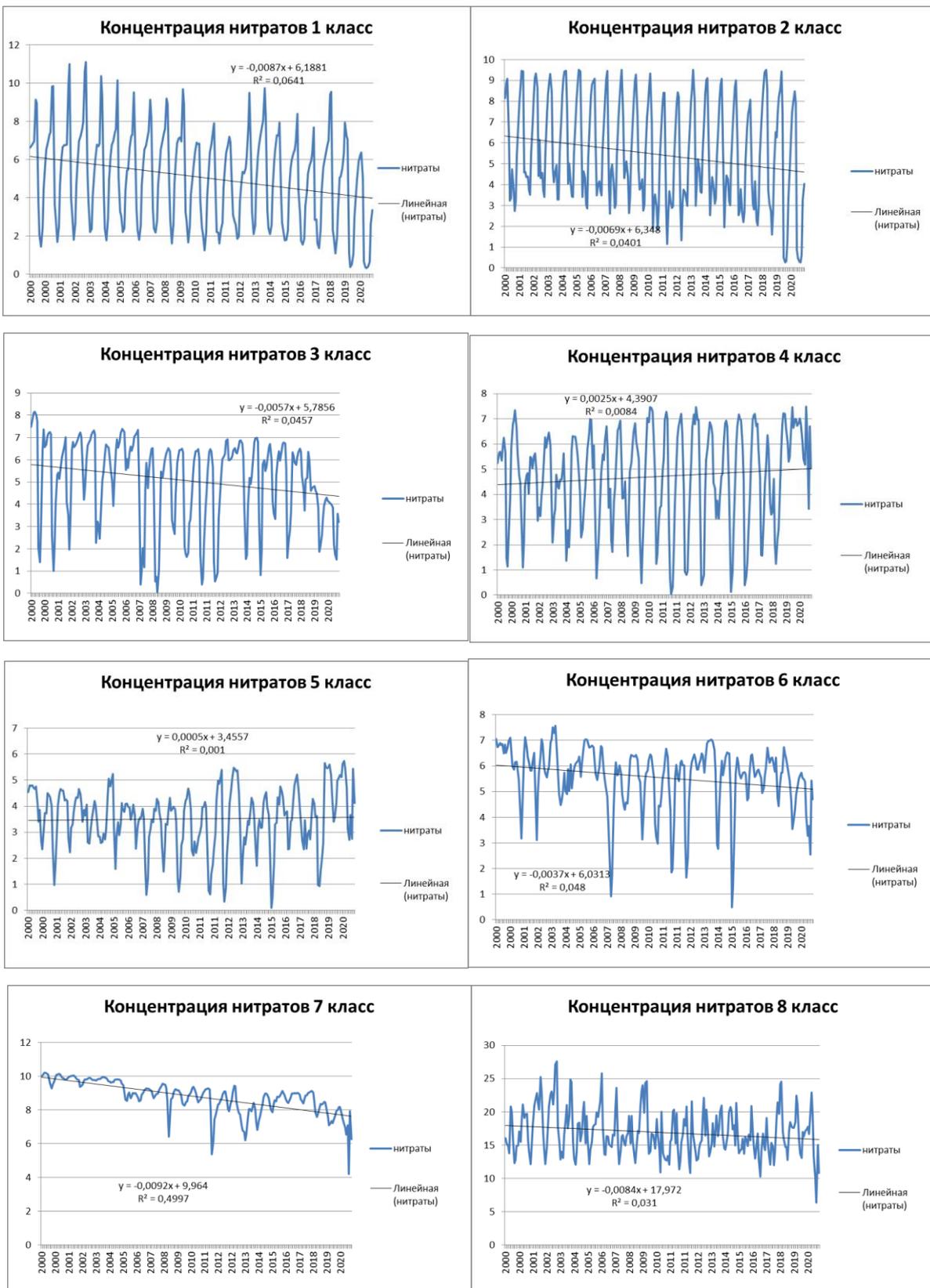


Рис. 4.12. Среднемесячная динамика изменения концентрации нитратов для восьми классов

На рисунке 4.12 видно, что концентрация нитратов имеет цикличность и повторяется из года в год, то есть в период с января по май концентрация нитратов возрастает, с июня по август начинает снижаться, а с сентября по декабрь вновь начинает повышаться. Так же почти для всех классов заметен явный отрицательный линейный тренд. Такое резкое снижение концентрации нитратов в летнее время и отрицательный линейный тренд с 2000 по 2020 год могут быть связаны с двумя причинами.

Во-первых - нитраты потребляются фитопланктоном, высшими растениями и денитрифицирующими бактериями, которые используют кислород нитратных соединений для окисления органических веществ.

Во-вторых - в теплое время года начинают преобладать процессы нитрификации при достаточной насыщенности кислородом воды [51].

С начала октября концентрация нитратов начинает постепенно возрастать за счет отмирания и процессов разложения фитопланктона и высших растений [52]. Пик концентрации нитратов приходится на январь-март, что обусловлено затрудненными процессами нитрификации из-за ледовых условий и отсутствием фитопланктона и высших растений в зимний период.

Не во всех классах данная динамика прослеживается достаточно хорошо, это объясняется тем, что на классы оказывается различное влияние условий среды (ледовый покров, материковый сток, соленость, температура и т.д.).

Наибольшие концентрации характерны для 1, 2 и 8 классов, которые расположены в Обской губе, Енисейском заливе и прилегающих к ним районам акватории. Такие высокие концентрации от 30 до 5 ммоль м⁻³ формируются за счет материкового стока.

На рисунке 4.13 можно проследить динамику изменения концентрации фосфатов по месяцам за период с 2000 по 2020 год в каждом классе.

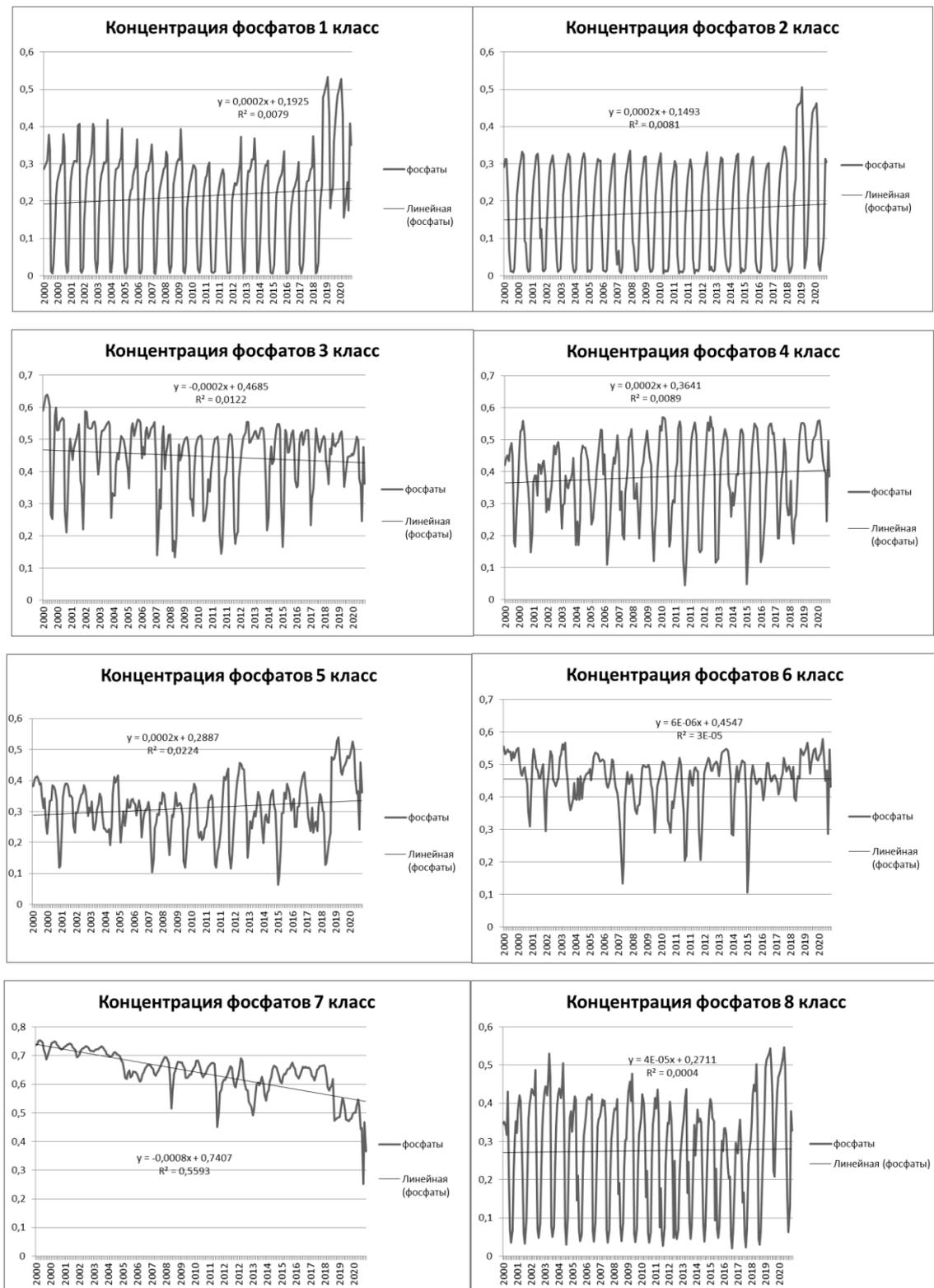


Рис. 4.13. Среднемесячная динамика изменения концентрации фосфатов для восьми классов

На рисунке 4.13 видно, что концентрация фосфатов, так же как и концентрация нитратов имеет сезонный характер, то есть в период с января по

май концентрация фосфатов возрастает, с июня по август начинает снижаться, а с сентября по декабрь вновь начинает расти. Для большинства классов заметен явный положительный линейный тренд. Такое резкое снижение концентрации фосфатов в летнее время, так же как и для нитратов, может быть связано с минеральным питанием фитопланктона, высших водных растений и сезонной динамикой вод. Помимо необходимого потребления фосфора для роста и развития цианобактерии запасают фосфор в своем организме в виде полифосфатов [53].

В целом для всех классов концентрация фосфатов не превышала значения $0,8 \text{ ммоль м}^{-3}$.

На рисунке 4.14 можно проследить динамику изменения температуры по месяцам за период с 2000 по 2020 год в каждом классе.

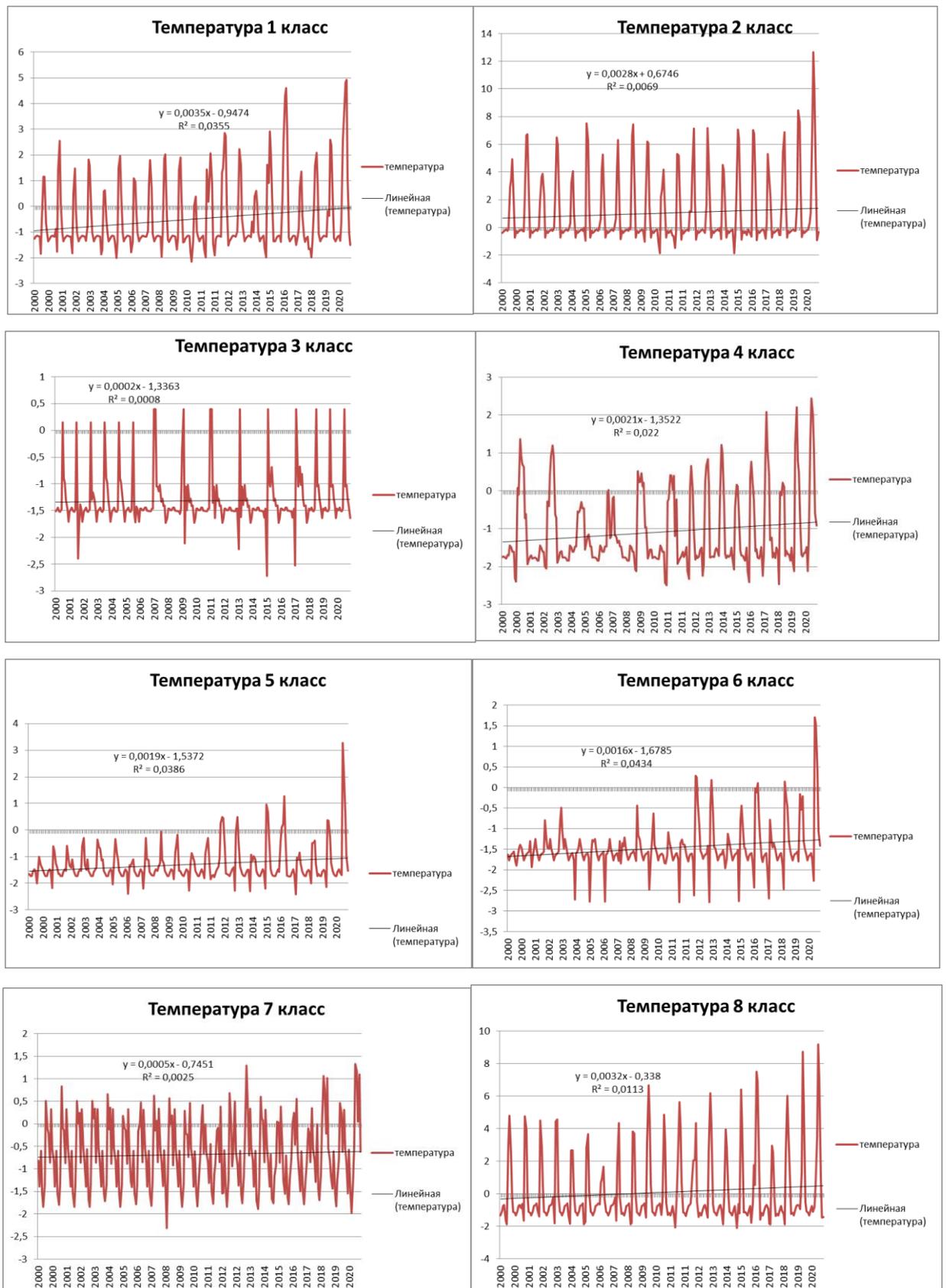


Рис. 4.14. Среднемесячная динамика изменения температуры
 ДЛЯ ВОСЬМИ КЛАССОВ

На рисунке 4.14 видно, что значения температуры, имеют сезонный характер. Период с января по май характеризуется температурами ниже 0 °С, затем, с июня температура начинает резко повышаться, самая высокая температура характерна для июля, затем она начинает постепенно снижаться и в октябре характеризуется уже отрицательными значениями.

Для всех классов заметен положительный линейный тренд, что доказывает потепление климата в Арктическом регионе. Значительное повышение температуры началось с 2018 года, что хорошо видно на рисунке 4.14.

Наибольшие значения температуры характерны для 1, 2 и 8 классов, которые расположены в Обской губе, Енисейском заливе и прилегающих к ним районам акватории, это связано с лучшим прогревом и выносом нагретого материкового стока в акваторию Карского моря, а так же с ледовыми условиями данных районов.

На рисунке 4.15 показана динамика изменения концентрации хлорофилла «а» по месяцам за период с 2000 по 2020 год в каждом классе.

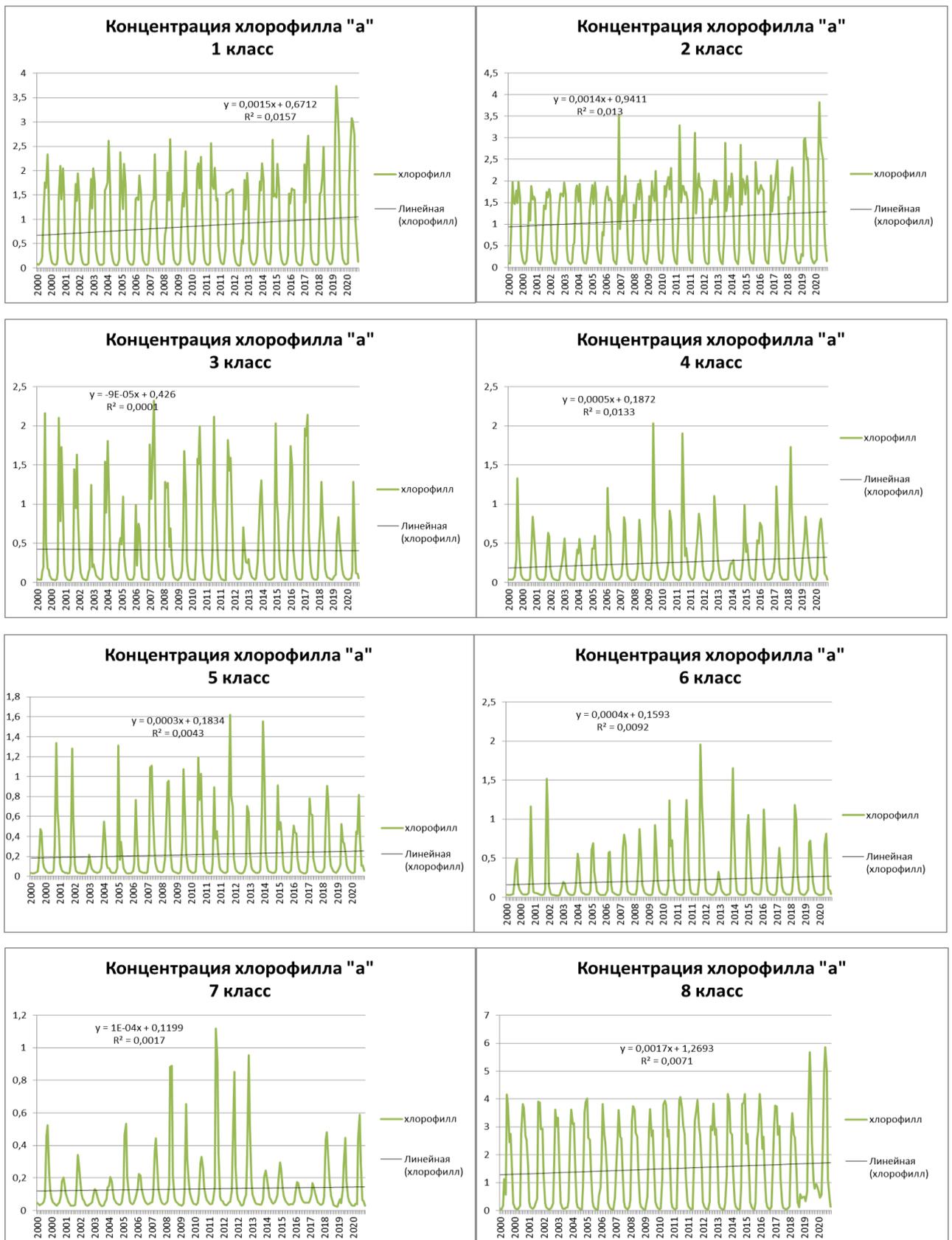


Рис. 4.15. Среднемесячная динамика изменения концентрации хлорофилла «а» для восьми классов

На рисунке 4.15 видно, что концентрация хлорофилла «а», так же подвержена заметным сезонным колебаниям, то есть в период с января по май концентрация хлорофилла «а» начинает возрастать, в июне-июле наблюдается самая высокая концентрация, затем количество хлорофилла «а» начинает постепенно снижаться. Пик в июне-июле обусловлен благоприятной для развития фитопланктона температурой воды, почти полным освобождением акватории Карского моря ото льда и достаточными концентрациями минерального питания (нитратами и фосфатами).

Для всех классов заметен положительный линейный тренд, это доказывает наше предположение о том, что при потеплении климата в Арктическом регионе, заметно возрастет концентрация первичной продукции.

Наибольшие концентрации от 7 до 0,5 ммоль м⁻³ характерны для 1, 2 и 8 классов, которые расположены в Обской губе, Енисейском заливе и прилегающих к ним районам акватории, так как эти районы достаточно хорошо прогреваются, и в них сосредоточено большое количество фосфатов и нитратов, необходимых для минерального питания фитопланктона.

Для каждого класса в программе Statistica был проведен спектральный анализ Фурье с целью обнаружения повторяющихся циклов. В качестве сигнала использовалась зависимость концентрации нитратов, фосфатов, хлорофилла «а» и температуры от времени. Периодами в данном исследовании выступали месяцы.

На рисунках 4.16-4.19 показаны периодограммы для концентрации нитратов, фосфатов, хлорофилла «а» и температуры по всем классам.

На рисунке 4.16 можно увидеть, что значимые пики по концентрации нитратов приходятся на июнь и декабрь 2000 года, а так же для 7 класса характерный пик приходится на декабрь 2006 года.

На рисунке 4.17 видно, что значимые пики по концентрации фосфатов также приходятся на июнь и декабрь 2000 года, а для 5-6 классов характерный пик приходится на декабрь 2020 года. Для 7 класса значимый пик характерен для декабря 2006 года.

На рисунке 4.18 значимые пики по концентрации хлорофилла «а» также приходятся на июнь и декабрь 2000 года, а для 2 и 5 классов характерный пик приходится на апрель 2000 года.

На рисунке 4.19 видно, что значимые пики температуры приходятся на апрель, июнь и декабрь 2000 года, а для 3 и 4 классов характерные пики приходится на февраль 2000 года и декабрь 2001 года.

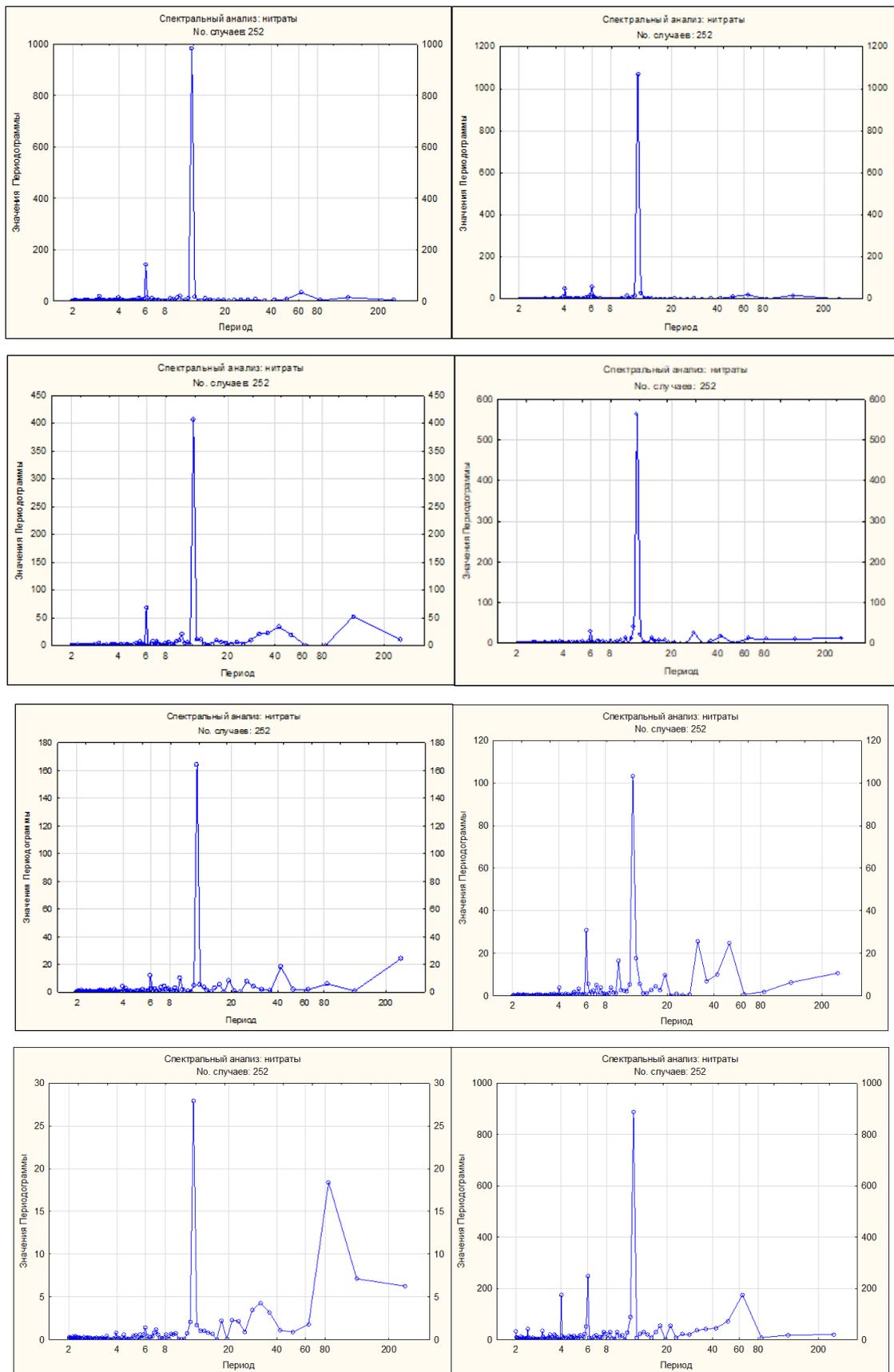


Рис.4.16. Периодограммы для концентрации нитратов по всем классам

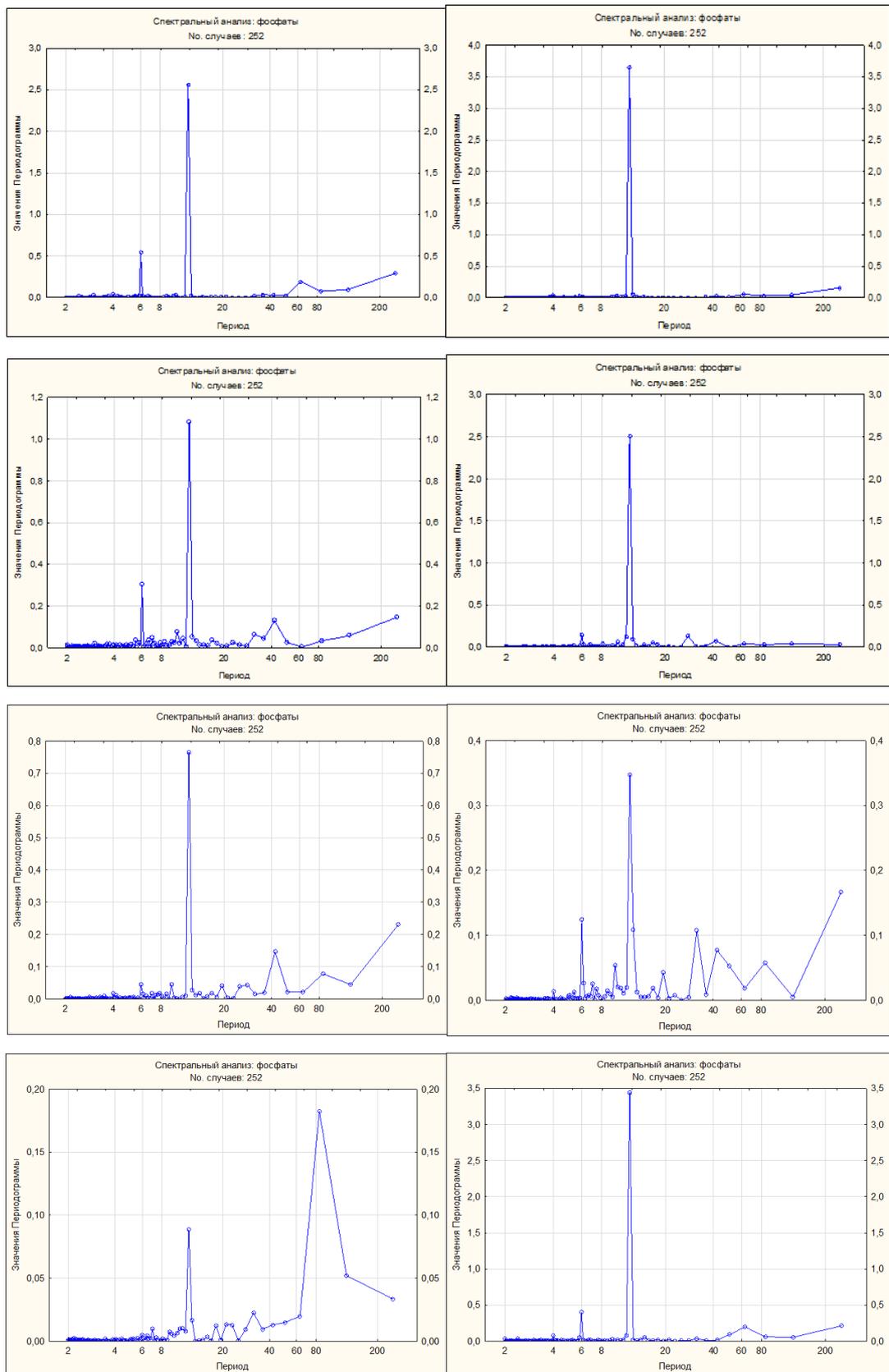


Рис.4.17. Периодограммы для концентрации фосфатов по всем классам

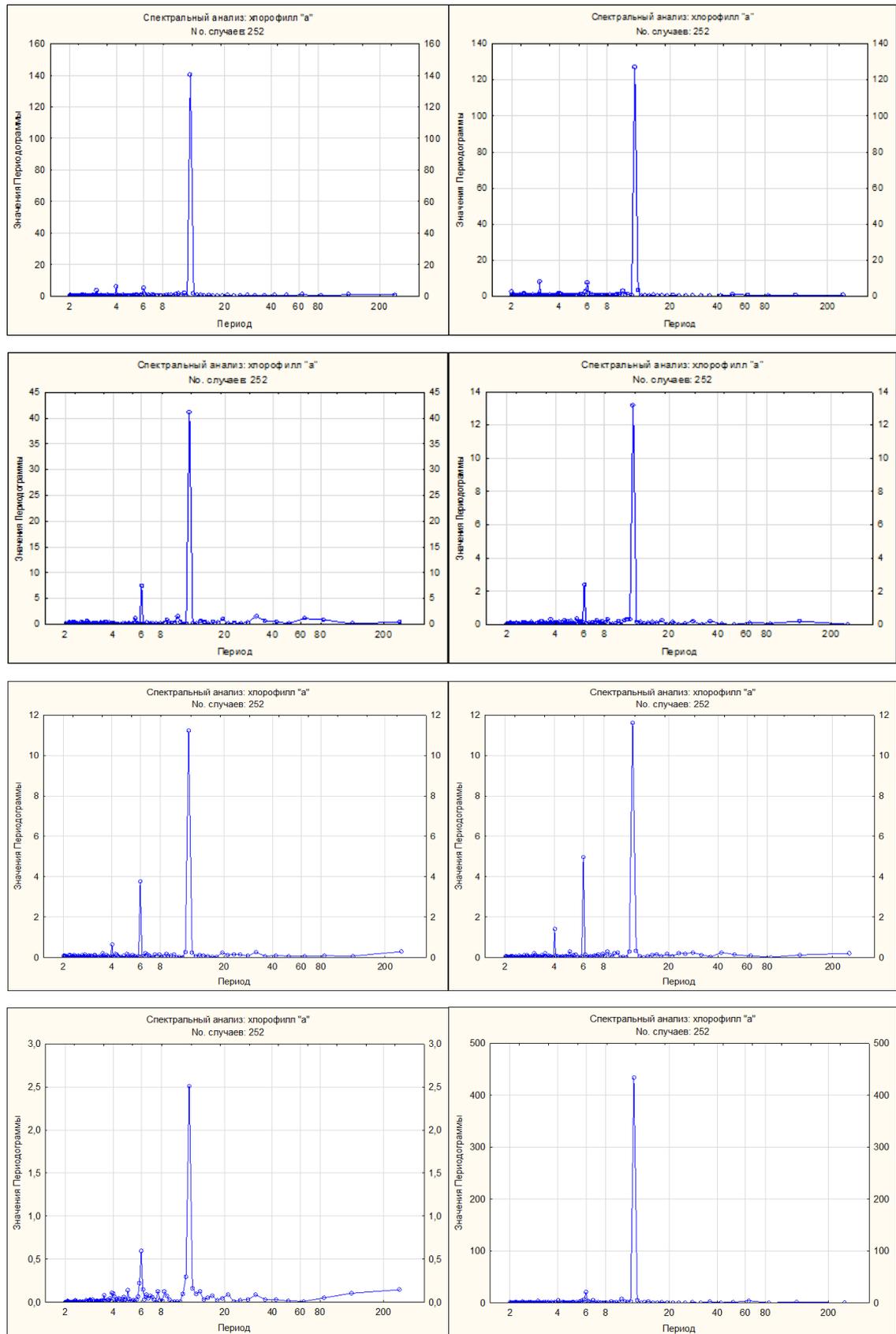


Рис.4.18. Периодограммы для концентрации хлорофилла «а» по всем классам

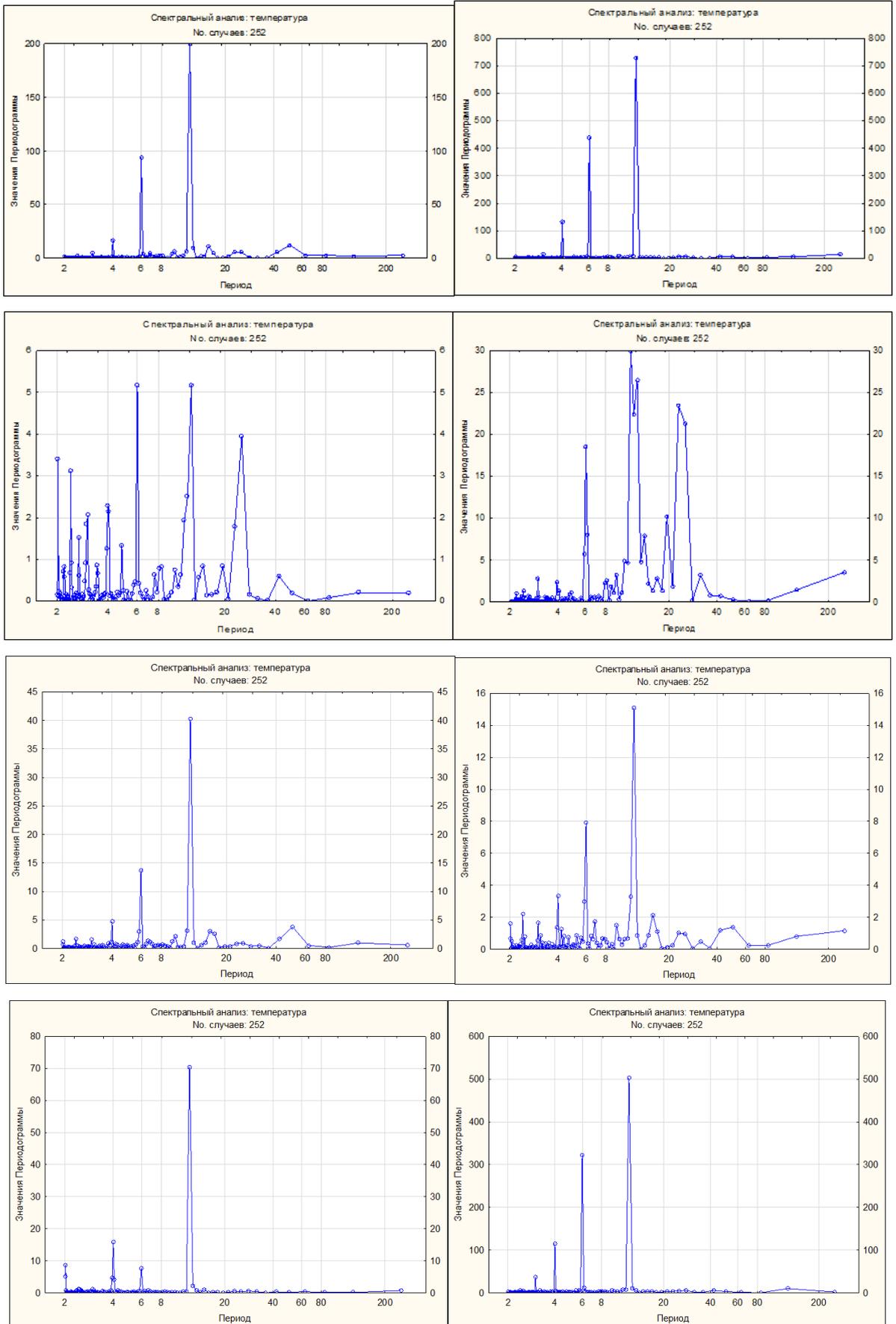


Рис.4.19. Периодограммы для температуры по всем классам

Характерной особенностью климатических изменений в Арктике являются колебания температуры воздуха. Для 20-40 годов прошлого века было зафиксировано потепление, считающееся в климатологии как «период потепления Арктики», за которым последовало похолодание с 50-70 годов, сменившееся новым потеплением. Можно заметить, что продолжительность данных колебаний занимает приблизительно 60 лет [54].

Для Карского моря в начале 2000 года наблюдалась аномалия температуры воды на 2 °С выше среднего, также этот год характеризовался пониженной ледовитостью, что, скорее всего, и послужило образованию пиков в 2000 году для всех исследуемых характеристик в спектральном анализе. То есть понижение ледовитости привело к повышению температуры воды, что в свою очередь повлекло за собой интенсивный вынос в акваторию биогенов с материковым стоком, а все эти факторы положительно повлияли на рост фитопланктона, о чем свидетельствует повышение значений хлорофилла «а».

На климат Земли так же может оказывать влияние изменения солнечной постоянной, характеризующей внеатмосферную интенсивность солнечной радиации.

Расстояние между Землей и Солнцем может меняться под действием крупных планет Солнечной системы, что приводит к изменению величины внеатмосферной интенсивности солнечной радиации. Периодичность этих явлений составляет около 60 лет. [55].

Заключение

В настоящее время биопродуктивность Карского моря представляет особый интерес в связи с потеплением климата и увеличением пространств открытой воды. Данная работа позволяет получить достаточное представление об изменении биопродуктивности в период с 2000 по 2020 гг. Использование данных с искусственных спутников Земли показало возможность ежемесячного прослеживания концентрации фитопланктона, хлорофилла «а», нитратов, фосфатов, температуры, солености и многих других показателей Карского моря. В результате проведенного исследования, мы подтвердили гипотезу о том, что в настоящее время изменения климатических условий, снижение ледовитости Карского моря приводит к повышению концентрации первичной продукции, а следовательно, и повышению концентрации хлорофилла «а». Все это сказывается на освоении данной территории. В связи с повышением концентрации фитопланктона, можно предположить, что количество рыбы в данном регионе возрастет, что повлечет за собой промышленный лов. Но с нарастающими темпами судоходства будут так же расти и риски экологического загрязнения.

В работе было исследовано влияние таких абиотических факторов, как концентрация нитратов, фосфатов, соленость и температура на концентрацию фитопланктона, а так же взаимосвязь концентрации хлорофилла «а» и фитопланктона. Кросс-корреляционный анализ показал обратную линейную связь концентрации фитопланктона с соленостью и концентрацией фосфатов, то есть, концентрация фитопланктона возрастает, когда понижаются показатели солености и концентрации фосфатов. Для всех остальных переменных связь оказалась прямой. Наибольшая теснота связи была у фитопланктона и хлорофилла «а», что подтверждает нашу гипотезу.

В ходе кластерного анализа акватории Карского моря и прилежащих к нему восточной части Баренцева моря и Северного Ледовитого океана было выделено 8 классов различными концентрациями хлорофилла «а», биогенов и отличающимся температурным режимом, на основании всего вышеперечисленного было проведено районирование Карского моря.

Для Карского моря были выделены 5 районов по концентрации первичной продукции и глубине. Эстуарный район имеет наибольшие концентрации фитопланктона (от 26 до 46 ммоль м⁻³ в летние месяцы), а глубоководный северный район наименьшие концентрации (0,1 до 3 ммоль м⁻³), что объясняется ледовыми условиями, низкой температурой, почти полным отсутствием материкового стока. В остальных районах концентрации фитопланктона в летние месяцы колеблются в пределах от 7 до 15 ммоль м⁻³, но отличаются по глубине. Можно сказать, что из-за больших объемов материкового стока, который несет с собой распресненные воды, для Карского моря характерно преобладание пресноводного планктона

Далее был проведен спектральный анализ Фурье для каждого из 8 классов, полученных в ходе кластерного анализа. Для концентрации хлорофилла «а» и температуры во всех классах был выявлен положительный линейный тренд, который свидетельствует о потеплении арктического климата. Для всех исследуемых характеристик по всем классам был выделен значимый пик в декабре 2000 года, который, скорее всего, связан с 60-ти летним циклом «периода потепления Арктики».

В связи с изменением климатических условий, изучение и прогнозирование оценок первичной продукции, ее распределения по акватории Карского моря является актуальной проблемой в области экологии и промысловой океанологии.

Список использованной литературы

1. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 192 с.
2. Добровольский А.Д., Залогин Б.С.. Моря СССР "Природа и хозяйство". Издательство "Мысль", Москва, 1965 г., 350 стр.
3. Добровольский А. Д., Леонтьева. В. В., Кукса В. И. К характеристике структур и водных масс западной и центральной частей Тихого океана. - "Тр. Ин-та океанологии АН СССР", 1960, т. 40, с. 47-57
4. Никифоров Е. Г., Шпайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Гидрометеиздат, Ленинград, 1980 г., 269 стр
5. Трешников А.Ф. Поверхностные воды в Арктическом бассейне. "Проблемы Арктики", 1959, вып. 7, с 5-14.
6. Антонов В. С. Новые данные о величине жидкого стока сибирских рек, впадающих в арктические моря. - "Тр. ААНИИ", 1968, т. 285, с. 148
7. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Костылева А.В. и др. Гидрохимические особенности акватории Карского моря летом 2015 г. // Океанология. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 57–66.
8. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф. Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. №1(103). С. 32–41.
9. Жичкин А.П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вестник Кольского научного центра РАН – 2015. №1. С. 55–64.
10. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. – Москва, 2021 –104 стр.
11. Щука С.А., Кременецкий В.В., Недоспасов А.А, Очередник В.В. Характеристики термохалинного режима Карского моря // Материалы

- научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая 2015 года. М.: АПР, 2015. С.23–28.
12. Букатов А.Е., Букатов А.А. Изменчивость положения кромки морского льда в Арктике. Материалы научной конференции «Прикладные задачи математики». Севастополь. 2017. С.59–65.
13. Ашик И.М., Карклин В.П., Кириллов С. А., Радионов В. Ф., Тимохов Л.А. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации Арктические моря России 2014 год
14. Саускан В.И. Экология и биологическая продуктивность океана: Учебное пособие/ Калинингр. ун-т. - Калининград, 1996 - 72 с.
15. Дроздова А.Н., Пацаева С.В., Хунджуа Д.А. Флуоресценция растворенного органического вещества как маркер распространения пресных вод в Карском море и заливах архипелага Новая Земля // Океанология. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 49–56.
16. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Суханова И.Н. и др. Генезис и пространственное распределение концентрации взвеси в Карском море в период наибольшего сокращения арктической ледовой шапки // Океанология. – 2015. – Т. 55. – № 4. – С. 687–708.
17. Morel A., Berthon J.-F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications // *Limnol. Oceanogr.* – 1989. – V. 34. – P. 1545–1562.
18. Brown J.H., Gillooly J.F., Allen A.P. et al. Toward a metabolic theory of ecology // *Ecology.* – 2004. – V. 85. – P. 1771–1789.
19. De Castro F., Gaedke U. The metabolism of lake plankton does not support the metabolic theory of ecology // *Oikos.* – 2008. – V. 117. – P. 1218–1226.
20. Singh R.K., Maheshwari M., Oza S.R., Kumar R. Long-term variability in Arctic sea surface temperatures // *Pol. Sci.* – 2013. – V. 7. – P. 233–240.

21. Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C. et al. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature // *J. Clim.* – 2007. – V. 20. – № 22. – P.5473–5496.
22. Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J. et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas // *Estuaries and Coasts.* – 2012. – V. 35. – P. 369–382
23. Флинт М.В. 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море // *Океанология.* – 2010. – Т. 50. – № 5. – С. 677–682.
24. Kaiser K., Benner R., Amon R.M.W. The fate of terrigenous dissolved organic carbon on the Eurasian shelves and export to the North Atlantic // *J. Geophys. Res.* – 2017. – V. 122. – P. 4–22.
25. Суханова И.Н., Флинт М.В., Сергеева В.М. и др. Структура сообществ фитопланктона Енисейского эстуария и прилежащего Карского шельфа // *Океанология.* – 2015б. – Т. 55. – № 6. – С. 935–948.
26. Мордасова Н.В. Косвенная оценка фитопланктона по содержанию хлорофилла Труды ВНИРО том 152 2014 год Среда обитания водных биологических ресурсов
27. Демидов А. Б., Мошаров С.А. Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла «а» в Карском море. *Океанология.* 2015. Т. 55. № 4. С.577–591.
28. Глезер З.И., Жузе А.П., Макарова И.В., Прошина-Лавренко А.И. (ответственный редактор), Шешукова-Порецкая В.С. \ \ Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Том 1' - Ленинград: Наука, 1974 - с.403 ил
29. Зеленева Т.П., Чанцев В.Ю., Труды IV Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»/МГО 2020 имени Л. Н. Карлина. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2020. – 459 с. 170-173

30. Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle Публикация USGS. — 2008.
31. Арктический бюллетень. Мониторинг социально-экономического развития Арктической зоны России. ИРК, выпуск №62, 2021 - 33 с.
32. Пиковский, Ю. И. Основы нефтегазовой геоэкологии: учебное пособие / Ю. И. Пиковский, Н. М. Исмаилов, М. Ф. Дорохова; под ред. А. Н. Геннадиева. — Москва : ИНФРА-М, 2020. — 401 с.
33. Матишов Г. Г., Бердников С. В., Савицкий Р. М. Экосистемный мониторинг и оценка воздействия нефтепродуктов в Керченском проливе: Аварии судов в ноябре 2007 — Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008 — 80 с.
34. Кобелев Е.А., Новоселов А.П. 2000. Состав ихтиофауны и структура популяций промысловых рыб Байдарацкой губы Карского моря // Биологические ресурсы побережья Российской Арктики: Материалы к симпозиуму. М.: Изд-во ВНИРО. С. 57–63.
35. Долгов А.В., Бензик А.Н., Четыркина О.Ю. Питание непромысловых рыб и их роль в продуктивности экосистемы Карского моря // Труды ВНИРО / Водные биологические ресурсы.-2014 г. Том 152.
36. Приказ Росрыболовства от 1 декабря 2020 года №640 «О мерах по реализации постановления Правительства РФ от 25 августа 2008 года №643 на 2021 год»
37. ФЛИНТ М.В. БИОРЕСУРСЫ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ//ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК /Издательство: Российская академия наук (Москва) 2015 г. Том 85.
38. Росрыболовство: Карское море обладает большим потенциалом для развития арктического промысла. — URL: http://fishkamchatka.ru/articles/the_far_east_and_siberia/24103/ (дата обращения 15.04.2021). — Текст: электронный.
39. Второй оценочный доклад РОСГИДРОМЕТА об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. — URL:

- http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/1.htm (дата обращения 6.11.2019). – Текст: электронный.
40. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» – СПб.: РГГМУ, 2010. – 74с.
41. Розенберг Г.С., Шитиков В.К., Брусиловский П.М. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов). - Тольятти, 1994. - 182 с.
42. Дубровская Л.И., Князев Г. Б. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: Учебное пособие. - Томск: ТМЛ-Пресс, 2011, - 120 с.
43. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник.– СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 404 с.
44. Электронный учебник по статистике СТАТСОФТ. – URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html> (дата обращения 13.05.2021). – Текст: электронный.
45. Кластеризация: метод k-средних. – URL: <http://statistica.ru/theory/klasterizatsiya-metod-k-srednikh/> (дата обращения 20.05.2021). – Текст: электронный.
46. Спектральный анализ. – URL: <http://profbeckman.narod.ru/ZastZond.files/Glava2.pdf> (дата обращения 29.05.2021). – Текст: электронный.
47. Белоцерковский А. В. Спектральный анализ в гидрометеорологии. Учебное пособие. СПб, изд. РГГМ И, 1993 г., 64 с.
48. Биопродуктивность Мирового океана. – URL: https://studwood.ru/1153841/ekologiya/bioproductivnost_mirovogo_okeana (дата обращения 17.10.2020). – Текст: электронный.
49. Water Pollution Microbiology. Edited by R. Mitchell. Wiley- Interscience, a Division of John Wiley a. Sons, Inc. New York. London. Sydney. Toronto. 1972.

50. Ботвинков В.М., Дегтярев В.В., Седых В.А. Гидроэкология на внутренних водных путях: Учебник для воднотранспортных вузов. – Новосибирск: Сибирское соглашение, 2002. – 356 с.
51. Соловьева Ю.А. и др. // ВОДА: ХИМИЯ и ЭКОЛОГИЯ 3, март 2013 г. с. 16–22
52. Никаноров А. М. Внутриводоемные процессы и контроль качества природных вод. Спб.: Гидрометеиздат, 1999 156 с.
53. Баранов Е. Е. Трансформация соединений фосфора в водных системах на примере водоемов волжского бассейна // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2014. №3.
54. Малинин В.Н., Вайновский П.А. О причинах первого потепления Арктики в XX столетии. Ученые записки РГГМУ, №53, с. 34-55 2018
55. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа. Проблемы Арктики и Антарктики, №75, с. 149-160 2007

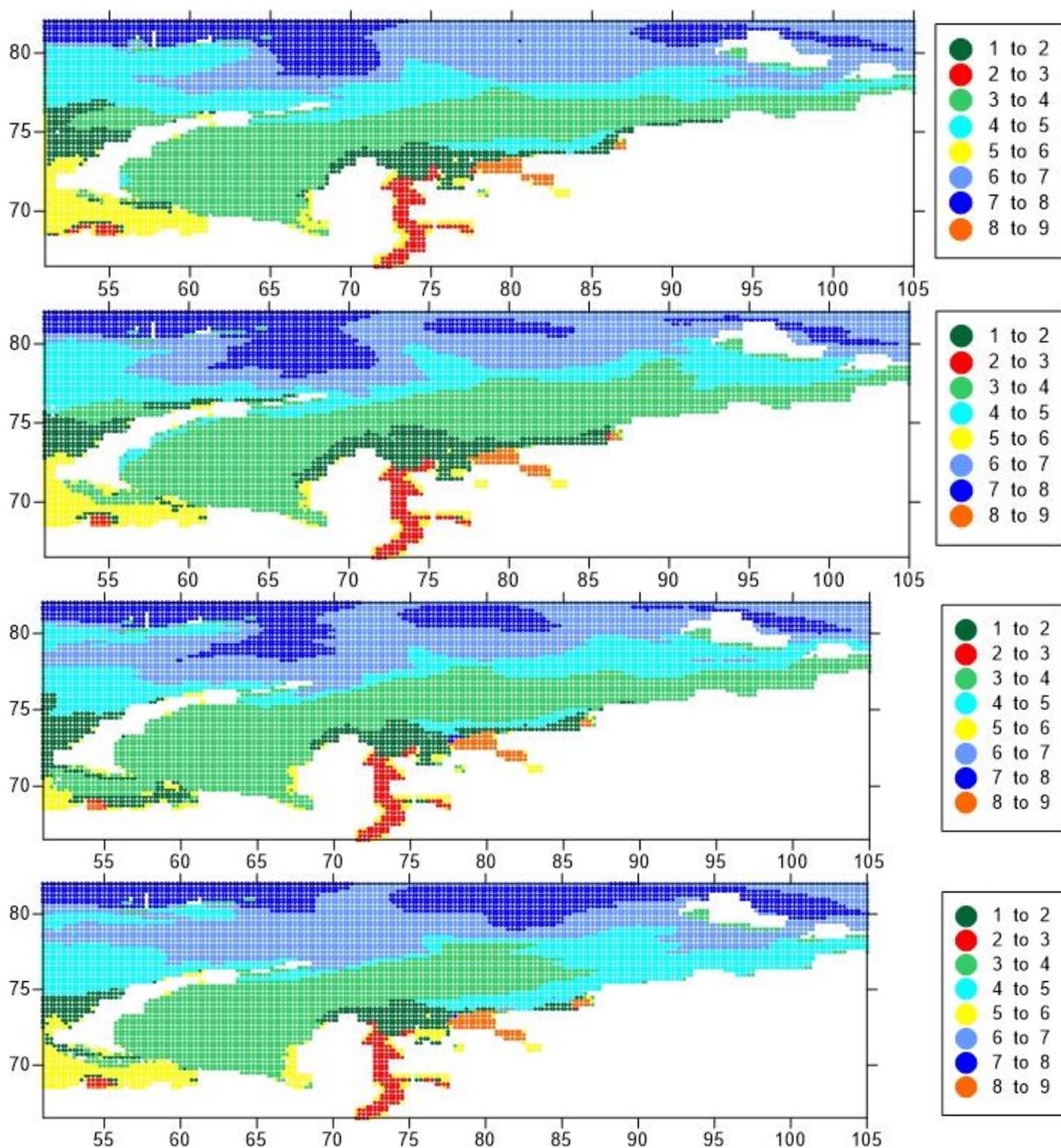


Рис.П.1. Районирование Карского моря по 8-ми классам за 2000-2003 год

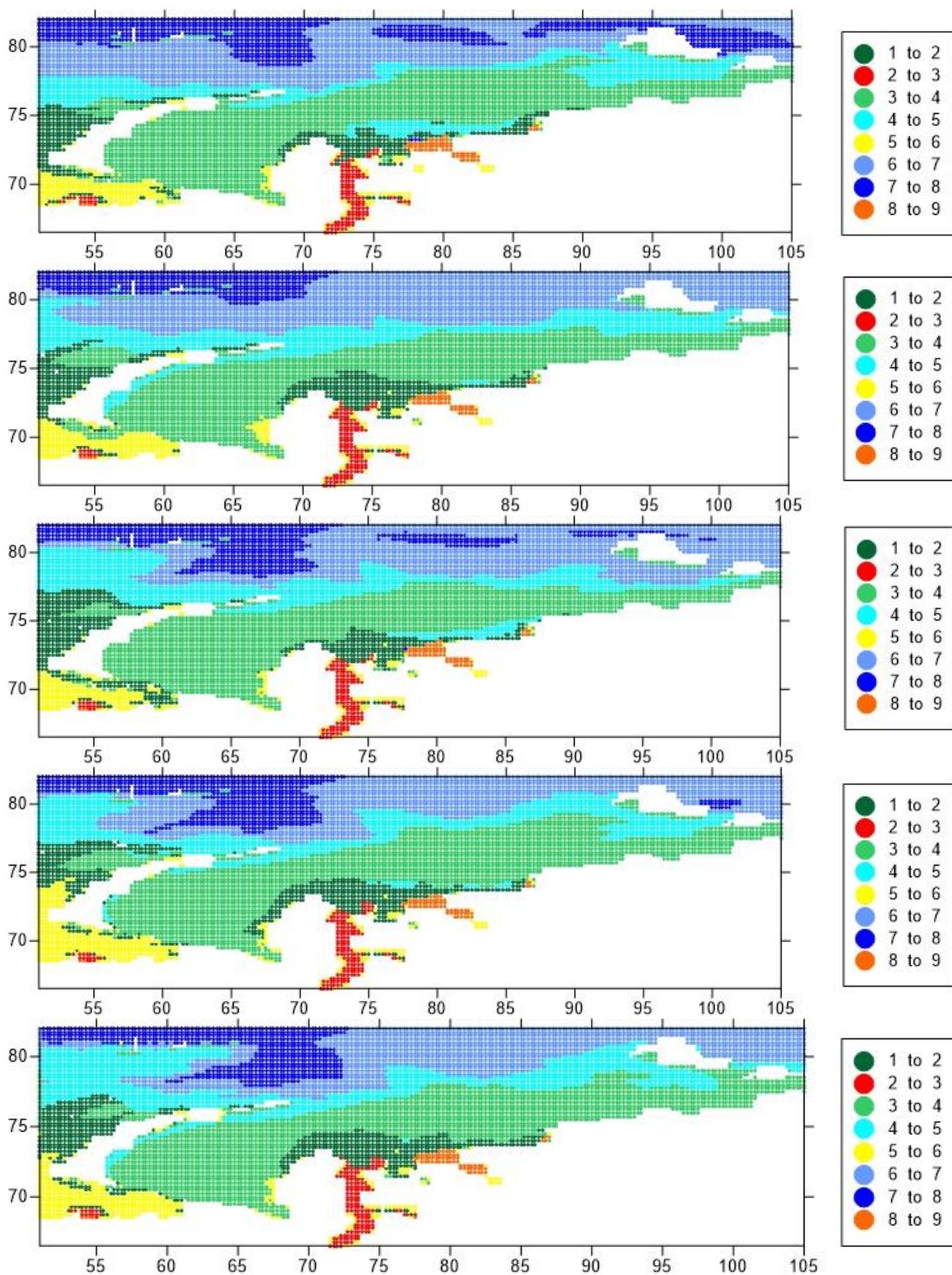


Рис.П.2. Районирование Карского моря по 8-ми классам за 2004-2008 год

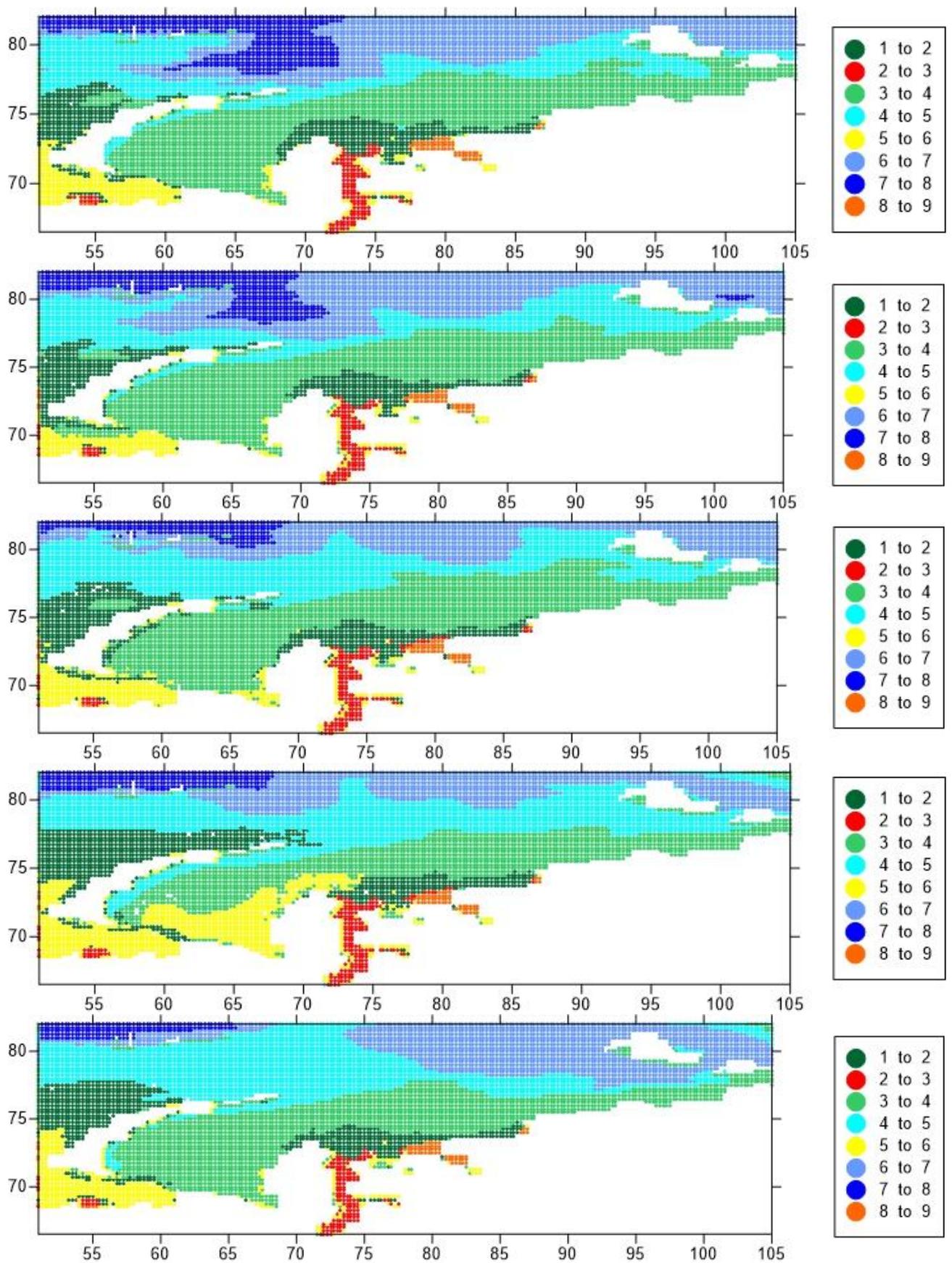


Рис.П.3. Районирование Карского моря по 8-ми классам за 2009-2013 год

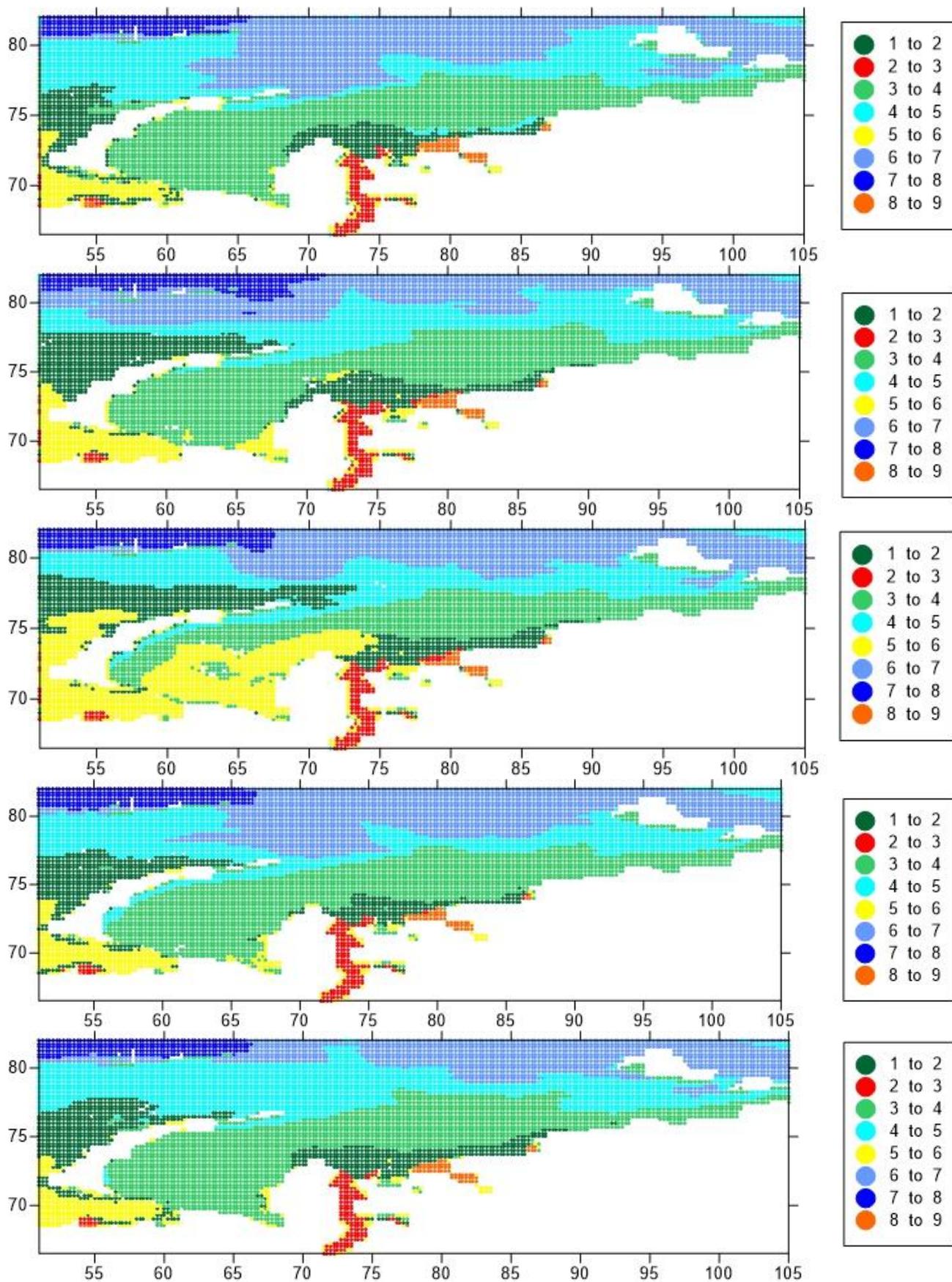


Рис.П.4. Районирование Карского моря по 8-ми классам за 2014-2018 год

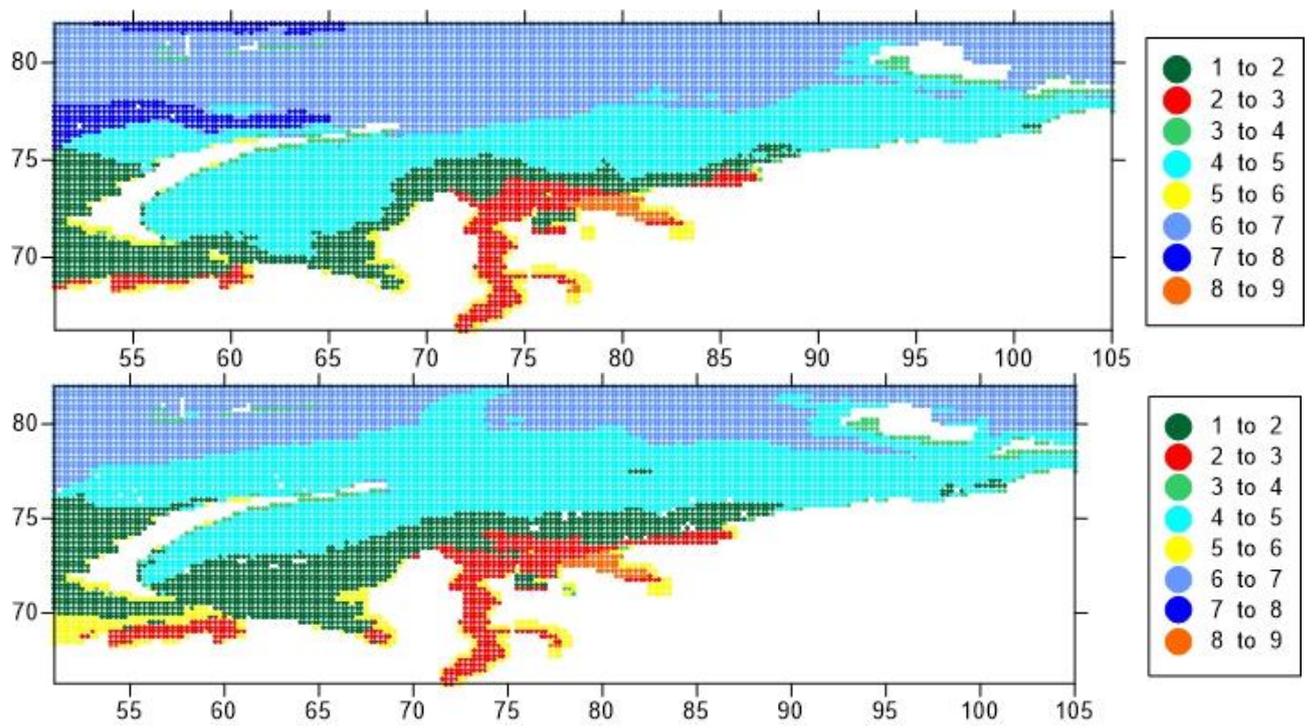


Рис.П.5. Районирование Карского моря по 8-ми классам за 2019-2020 год