



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

Кафедра прикладной океанографии и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: "Оценка изменчивости экологического состояния
Печорского моря в условиях антропогенной нагрузки"

Исполнитель: Петрова Дарья Михайловна

Руководитель: канд. геогр. наук Хаймина Ольга Владимировна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

канд. геогр. наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«11» марта 2025 г.

Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Эколого-географическая характеристика акватории Печорского моря	
1.1 Краткая физико-географическая характеристика.....	5
1.2 Изученность гидрохимического состояния моря.....	9
1.3 Современное хозяйственное использование акватории и источники поступления загрязняющих веществ.....	18
1.4 Антропогенное эвтрофирование.....	19
Глава 2. Материалы и методика	
2.1 Описание района исследования.....	22
2.2 База данных.....	23
2.3 Описание методов обработки информации.....	25
Глава 3. Исследование экологического состояния Печорского моря	
3.1 Факторы, определяющие уровень антропогенной нагрузки.....	29
3.1.1 Нефтяное загрязнение.....	30
3.1.2 Интенсивность транспортной нагрузки.....	33
3.1.3 Рыбный промысел и экономическая освоенность территории.....	38
3.2 Эколого-химическое состояние Печорской губы и открытой части моря	42
Глава 4. Пути улучшения экологической ситуации в Печорском море.....	60
Заключение.....	64
Список использованных источников.....	67
Приложение А.....	74
Приложение Б.....	81

Введение

Арктическая зона относится к наиболее значимым, с точки зрения геополитики и экономики, регионов России. Ввиду значительных запасов природных ресурсов, в особенности месторождений нефти и газа, Арктический регион обладает существенным экономическим потенциалом, а разработка местных месторождений полезных ископаемых является ключевой стратегической задачей развития нефтегазовой отрасли и в целом топливно-энергетического комплекса страны.

Однако, всё более возрастающая хозяйственная деятельность, как на самой акватории, так и в прибрежных зонах, неуклонно влечёт за собой загрязнение природной среды, что ведёт к деградации экосистем Крайнего Севера, наиболее уязвимых к антропогенным нагрузкам, в особенности экосистем прибрежных зон и акваторий морей Арктики. Загрязнение нефтью и химическими соединениями в результате добычи углеводородов на континентальном шельфе, морских транспортных перевозок, а также бытовых и промышленных стоков, может иметь катастрофические последствия для окружающей среды арктического региона. В связи с чем возникает необходимость мониторинга изменчивости экологического состояния морей бассейна Северного Ледовитого океана и их прибрежных зон.

Объектом исследования работы было выбрано Печорское море, юго-восточная часть Баренцева моря, в настоящее время подвергающееся активному хозяйственному освоению. Предмет изучения – временная изменчивость эколого-химического состояния открытой части акватории моря и Печорской губы.

Актуальность данной научно-исследовательской работы заключается в исследовании изменения экологического состояния Печорского моря за последние несколько десятилетий, как одной из наиболее эксплуатирующихся

частей Северного Ледовитого океана, особо чувствительных к постоянно возрастающему антропогенному воздействию.

Целью работы является оценка изменчивости эколого-химического состояния Печорского моря за последние десятилетия, выявление факторов антропогенного характера, несущих наибольшую угрозу нормальному функционированию морских и прибрежных экосистем, а также определение возможных путей улучшения экологического состояния исследуемого объекта.

К поставленным задачам научно-исследовательской работы относятся:

- характеристика экономико-географического положения объекта исследования и его природно-ресурсного потенциала;
- изучение современного хозяйственного использования акватории Печорского моря и выявления основных угроз окружающей среде;
- оценка изменчивости эколого-химического состояния Печорской губы и открытой части моря посредством нескольких видов статистического анализа;
- выявление возможных путей улучшения экологической ситуации в Печорском море.

Глава 1. Эколого-географическая характеристика акватории Печорского моря

1.1 Краткая физико-географическая характеристика

Печорское море относится к Баренцеву морю, являясь его юго-восточной окраиной, имеющей особую историю развития, своеобразный донный рельеф и особую структуру осадочной толщи, а также отличающееся от остальной баренцевоморской акватории метеорологическим, гидрологическим и ледовым режимом [1]. Омывает Печорское море берега двух российских регионов: Ненецкого автономного округа (НАО) и Архангельской области (рисунки 1). Площадь акватории моря составляет 81,3 тыс. км² [2].



Рисунок 1. Печорское море на карте Ненецкого Автономного округа [3]

Официальные границы, фиксирующие акваторию Печорского моря, были утверждены 28 ноября 1935 года Постановлением Центрального исполнительного комитета СССР «О единых географических наименованиях

частей Северного Ледовитого океана, прилегающих к территории СССР» [2].
Западная граница моря пролегает от мыса Святой Нос (Тиманский) вплоть до западной оконечности мыса Плоских Кошек (юго-восточный берег острова Колгуев) и затем от северной оконечности данного острова до мыса Черный, находящегося на архипелаге Новая Земля при входе в пролив Костин Шар [1].

Печорское море достаточно мелководно, его глубины постепенно возрастают в меридиональном от материка направлении. Большая часть дна моря – слабо расчленённые пологонаклонные и субгоризонтальные аккумулятивные равнины. Средняя глубина Печорского моря – 6 метров. [4].
Вдоль берега материка находится обширное мелководье, ширина которого доходит до 150 км [5]. К характерным морфологическим элементам донного рельефа моря относятся также подводные террасы. Выделяется на данном геоморфологическом фоне достаточно глубокий (до 210 метров) тектонический жёлоб (Южно-Новоземельский) [6].

Вдаются в берега исследуемого объекта, Печорского моря, несколько губ (заливов). К ним относятся: Раменка, Колоколкова, Хайпудырская губы, а также Печорская губа, где в акваторию моря впадает река Печора, крупнейшая из всех впадающих в Печорское море рек.

К августу температура поверхностного слоя вод Печорского моря прогревается до отметок 10–13 °С, солёность вод Печорского моря варьируется в течение года, а также достаточно неоднородна в различных частях его акватории. В летний период, вследствие максимума опреснения, солёность открытых районов моря снижается до 32–33 ‰, в прибрежных районах до 25 ‰ [2]. в зимний период, с января по март, в результате минимизации влияния речного стока, солёность увеличивается до отметок в 34,0–34,5 ‰, близких к типичным значениям солёности баренцевоморских вод [7].

Довольно сложная атмосферная циркуляция в исследуемом районе определяется взаимодействием Исландского минимума, Арктического и Сибирского антициклонов. В результате чего Печорское море входит в число

районов атлантико-евразийского сектора с развитой циклонической циркуляцией [6].

Общая циркуляционная система формируется за счёт потоков тёплых солёных вод, имеющих атлантическое происхождения – Канинское течение, стоковых течений (Колгуево-Печорское, Беломорское и Печорское) и холодных вод, проникающих из Карского моря (течение Литке). Также в поверхностном слое Печорского моря происходит перенос баренцевоморских вод в Карское море (рисунок 2) [8].

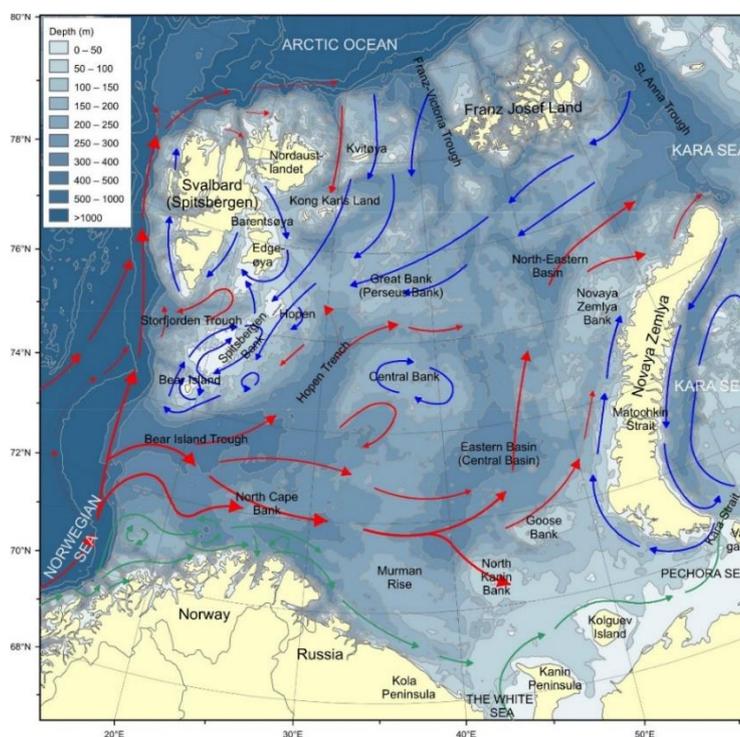


Рисунок 2. Карта течений Баренцева море [9]

Для Печорского моря характерно преобладание однолетних сплошных льдов местного образования, которые каждый год покрывают акваторию моря [10]. Как правило, образование ледового покрова Печорского моря приходится на конец октября – ноябрь, но сроки появления льда каждый год довольно сильно колеблются. Распространение ледяной кромки во время зимнего периода происходит в направлении с востока на запад, продолжаясь вплоть до

апреля включительно, на этот же месяц приходится максимум ледовитости Печорского моря. Однако, целиком море замерзает редко. Как правило, около четверти площади Печорского моря в западной части остаётся свободной ото льда весь год в результате влияния тёплых атлантических вод, играющих роль своеобразного барьера относительно льдов, надвигающихся с северного направления. В период с мая по июль кромка льда отступает на восток и отмечается разрежение, происходящее, главным образом, вследствие вытаивания более тонких льдов. В июле наблюдается отсутствие ледяного покрова на всей акватории моря [6]. Так, в районе порта Варандей установлено, что устойчивое ледообразование в среднем начинается 29 октября, а к ноябрю, чаще всего, в акватории пролива Варандейский Шар уже устанавливается припай. Максимальная толщина льда (порядка 158 см) отмечается в апреле. В первой половине мая в районе пролива начинается разрушение ледового покрова (средняя дата первого взлома – 31 мая). Окончательный взлом припая наблюдается в проливе Варандейский Шар в среднем 19 июня, в то время как окончательное очищение ото льда наступает 30 июня. Таким образом, средняя продолжительность ледового периода в районе порта Варандей составляет 246 дней [11].

Вследствие суровых климатических условий животный и растительный мир Печорского моря являются крайне скудными. Среди представителей животного мира встречаются тюлени, белуги, различные рыбы (около 26 видов). Из Баренцева моря в акваторию Печорского моря проникает атлантический лосось (сёмга), а также некоторые другие промысловые виды. [12]. Растительности в районе Печорского моря очень мало, и её количество постепенно сокращается. Большинство видов водорослей, наблюдающихся в Печорском море, относятся к бореально- и высокобореально-арктическим. Для прибрежных районов характерны песчано-илистые грунты, на которых формируются сообщества красных водорослей (багрянок). Кроме багрянок в Печорском море встречаются отдельные экземпляры бурых и зелёных водорослей [13].

В районе Печорского моря присутствуют некоторые особо охраняемые природные территории, в том числе Государственный природный заповедник федерального значения «Ненецкий», Государственный природный заказник «Хайпудырский», Государственный региональный комплексный природный заказник "Вайгач" и другие, образованные ради сохранения флоры, фауны (в том числе и рыбных запасов) и в целом биоразнообразия бассейна Баренцева моря. Также часть прибрежных территорий Печорского моря включены в перспективный список водно-болотных угодий Рамсарской конвенции, обладающей международным значением [14].

Уникальность района Печорского моря заключается в его высоком нефтегазоносном потенциале. Его южные районы относятся к Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, где в последнее время активно ведётся поиск и добыча углеводородного сырья, а также производится его транспортировка (перевалка) [1]. На континентальном шельфе Печорского моря обнаружен целый ряд месторождений и перспективных структур [15].

1.2 Изученность гидрохимического состояния моря

Изучение химического состава вод Печорского моря, как составной части акватории Баренцева моря, началось ближе к концу XIX века. Однако, начало активного изучения моря, производившееся Мурманской биологической станцией, Институтом по изучению севера, а также Плавучим морским институтом, датируется уже 20-ми – 30-ми годами XX века. Регулярные работы по исследованию химического состава вод стали проводиться в Печорском море с 1933 года усилиями Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО) и Государственного океанографического института (ГОИН). В послевоенные годы ведущая роль в гидрохимических исследованиях Печорского моря перешла Мурманскому морскому биологическому институту (ММБИ) [16].

В настоящее время значимость гидрохимических исследований возрастает в результате необходимости проведения комплексных исследований экологического состояния водоёма, в первую очередь, в связи с крупномасштабной разработкой здесь нефтяных месторождений, а также для прогноза изменений климата и оценки возрастающего антропогенного воздействия на окружающую среду [17].

Ввиду большого водообмена, гидрохимия Печорского моря во многом схожа с гидрохимией остальной части Баренцева моря, но существуют и значительные различия, связанные, главным образом, с географическим положением Печорского моря. Являясь юго-восточной окраиной Баренцева моря, оно удалено от источника поступления атлантических вод, и, следовательно, их влияние на гидрохимию Печорского моря ослаблено, а влияние вод, поступающих из Карского и Белого морей, напротив, повышено. Вследствие сниженного влияния тёплых атлантических вод, большая часть Печорского моря, в отличие от остальной акватории Баренцева моря, в зимний период покрывается льдом [16]. Значительное влияние на гидрохимический режим Печорского моря оказывает также материковый сток. Река Печора в течение года вносит в море порядка 130 км^3 воды, что дополняется водами менее крупных рек, таких как Чёрная, Ома, Индига, Пеша и др. [17].

Таким образом, формирование гидрохимического состава Печорского моря происходит вследствие взаимодействия вод, имеющих различное происхождение: трансформированных атлантических, открытой части Баренцева моря, Белого и Карского морей, материкового стока. Также определённое воздействие на формирование гидрохимии Печорского моря оказывают атмосферные осадки. В результате этого взаимодействия образуется прибрежная водная масса, имеющая достаточно высокие значения температуры в летний период (от 1°C в открытых районах моря до $7\text{-}13^\circ\text{C}$ в прибрежной зоне) и более низкие значения солёности (от 26 до 31‰). В мелководной части акватории, в тёплый период, когда акватория Печорского моря свободна ото льда, наблюдается двухслойная структура, представленная

верхним квазиоднородным слоем (ВКС), довольно прогретой и распреснённой водной массой, мощность которой составляет от нескольких метров в восточной части до 20 м и более в западной, и нижним слоем холодных относительно солёных вод. Разделены эти слои тонким слоем скачка, снизу ограниченного нулевой изотермой. Многослойная структура вод присуща более глубоководной части Печорского моря, в районе о. Колгуев – Новая земля.

Растворённый кислород. На поверхности открытой части акватории Печорского моря содержание растворённого кислорода в свободный ото льда тёплый сезон в среднем составляет чуть более 7 мл/л, однако, диапазон возможных изменений его содержания довольно значительный (от 3,8 до 9,2 мл/л), вследствие воздействия речных вод, которые богаты нестойким органическим веществом, и образования кислорода во время активной фотосинтетической деятельности морской биоты. С глубиной происходит плавное возрастание средних величин содержания растворённого кислорода (до 8 и более мл/л в слое 40-50 м). Насыщение кислородом вод открытой части акватории Печорского моря немногим превышает 100%, составляя, в среднем, до 105%. В слое 50-80 м наблюдается снижение абсолютного содержания растворённого кислорода (порядка 6,6 мл/л) и степени его насыщения (около 80%). В глубинных водах величина растворённого кислорода в среднем составляет около 7 мл/л при среднем насыщении чуть более 80%. В холодный сезон среднее содержание растворённого кислорода вод открытой части акватории Печорского моря в слое от 0 до 10 м составляет порядка 8,5 мл/л, почти не меняясь до отметки в 100 м (находясь на уровне около 8,0 мл/л), далее от 100 м до дна содержание растворённого кислорода снижается до 7 мл/л. Насыщение вод кислородом слоя до 80 м составляет 95%, плавно понижаясь с глубиной до 70%. Такое уменьшение значений насыщения вод кислородом с глубиной связано с процессами потребления кислорода при разложении органического вещества в глубинных и придонных водах [16].

В мелководной части Печорского моря, до 50 м, в тёплый сезон наблюдается увеличение с глубиной среднего содержания растворённого кислорода (с 6,96 до 7,6 мл/л), насыщение вод кислородом в среднем составляет менее 100% [18]. В районе дна среднее насыщение вод растворённым кислородом понижается вплоть до 80%. В холодный период содержание растворённого кислорода и степень его насыщения меняется по вертикальному профилю незначительно, находясь, в среднем, в пределах от 7,7 до 7,9 мл/л и от 94 до 96% соответственно.

Такие значения содержания растворённого кислорода, а также степени его насыщения указывают на относительно невысокую активность процесса фотосинтеза в Печорском море, но хорошую вентиляцию, что присуще морям Арктического бассейна.

Величина рН. В глубоководной части Печорского моря в тёплый сезон вертикальное распределение средних величин рН хорошо коррелируется с положением о слоистой структуре вод. Довольно высокие и стабильные значения рН, составляющие примерно 8,17 ед. рН (немного повышающиеся у поверхности, в связи с активностью морской биоты, поглощающей двуокись углерода), наблюдаются в верхнем слое глубиной до 20 м. При переходе от поверхностных к подповерхностным водам отмечается рост величины рН до 8,2 и более ед., сменяющееся значительным падением в глубинных водах до 8,05 ед. рН, вследствие накопления в них двуокиси углерода при окислении органического вещества, поступающего из фотического слоя.

Общая тенденция падения средних значений величины рН поверхностных вод в период с мая по октябрь свойственна водам открытой части Печорского моря, изменяясь в пределах от 8,4 до 8,0 ед. рН. Максимальные величины рН отмечались в весенний пик цветения фитопланктона. С ноября по январь происходит небольшое увеличение значений рН поверхностных вод, ввиду их выхолаживания [16].

В мелководной части Печорского моря вертикальное распределение величин рН составляет 8,12-8,19 ед. рН. Диапазон распределения величин рН

на поверхности достаточно велик, находится в пределах от 7,66 ед. рН при влиянии вод материкового стока, до 8,3 ед. рН и более во время максимального развития фотосинтетической деятельности морской биоты. В холодный сезон среднее значение рН почти не меняется по вертикали, составляя 8,1-8,13 ед. рН [18].

В Печорской губе наименьшие средние величины рН поверхностных вод приходятся на июнь-июль, так как в это время воды губы наиболее подвержены влиянию речных вод. Минимальные значения рН поверхностных вод Печорской губы фиксировались на уровне менее 7 ед. рН, что объясняется повышенным воздействием материкового стока, а также подкислением вод в результате процесса термоабразии берегов. В период с июля по октябрь наблюдается слабый рост величин рН, в среднем, достигающих значения 8 ед.

Общая щёлочность. В водах Печорского моря величина общей титруемой щёлочности (Alk) варьируется в довольно широких пределах вследствие влияния материкового стока, а также процессов образования и таяния льда. Так, в открытой части акватории Печорского моря предел изменчивости величины Alk находится в диапазоне от 1,1 до 2,5 мг-экв/л, в Печорской губе величина общей титруемой щёлочности изменяется в пределах от 0,25 до 2,5 мг-экв/л.

В тёплый период в поверхностном слое наблюдается понижение величины Alk (воздействие материкового стока), рост значений Alk происходит до отметки в 100 м в глубокой части моря, составляя 2,4 и более мг-экв/л, или до дна в мелководном районе Печорского моря (2,3-2,4 мг-экв/л).

Небольшое увеличение средних величин общей титруемой щёлочности в поверхностных водах происходит в холодный сезон, в период активного процесса образования ледяного покрова. С глубиной, также как и в тёплый период, наблюдается относительно равномерный рост величин Alk, составляющих приблизительно те же значения, что и в свободный ото льда сезон.

В поверхностных водах Печорской губы минимальные средние величины Alk приходятся на июнь (весенний паводок) и составляют порядка 0,6-0,7 мг-экв/л, возрастают с октября, в период ослабления интенсивности речного стока и начала активного формирования ледяного покрова, достигая 1,4 мг-экв/л.

Район исследования испытывает сильное влияние материкового стока, поэтому показательным здесь является величина щёлочно-хлорного соотношения (Alk/Cl). Когда происходит смешивание вод речного и морского происхождения наблюдается рост отношения Alk/Cl ввиду того, что отношение гидрокарбонатного иона к общей минерализации в речных водах значительно выше, чем в морских. Уменьшение величины соотношения Alk/Cl происходит при процессах поглощения карбонатов или выпадения их в осадок, а также в процессе формирования льда. В основной толще вод Печорского моря соотношение Alk/Cl находится в пределах 0,123-0,144. В прибрежных районах моря, где особенно сильно влияние материкового стока, значения Alk/Cl достигают 0,18 и более.

Основные биогенные элементы. Фосфаты. Значения содержания в Печорском море нерастворённого неорганического фосфора (фосфатов) варьируется от аналитического нуля, предела обнаружения применяемой методикой, до 95,8 мкг P/л.

В тёплый период минимальные значения содержания фосфатов отмечаются в августе-сентябре в поверхностной, подповерхностной и трансформированной атлантической водах открытой части акватории Печорского моря, а максимальные – в поверхностных водах прибрежной части моря.

Среднее содержание фосфатов в поверхностных водах открытой акватории Печорского моря находится в пределах 5-6 мкг P/л. По вертикальному профилю распределение фосфатов довольно сложное, для обоих сезонов имеющее достаточно выраженный максимум, отмеченный на горизонтах 40-50 м и минимум на 70 м, однако, в холодный сезон среднее

содержание фосфатов по вертикали, в целом, ниже. В тёплый период в мелководной части Печорского моря среднее многолетнее распределение фосфатов по вертикальному профилю практически равномерно уменьшается от поверхности (7,1 мкг Р/л) ко дну (4-5 мкг Р/л). В холодный период наиболее высокие значения содержания фосфатов, составляющие более 7 мкг Р/л, распространяются не только на поверхности, но и захватывают также слой воды до горизонтов 10-20 м. Ко дну среднее содержание фосфатов, также, как и в тёплый сезон, составляет немногим более 4 мкг Р/л.

Содержание фосфатов в Печорской губе составляет от аналитического нуля до 142 мкг Р/л. Также, как и в открытом море, сезонные изменения средних многолетних содержаний фосфатов в поверхностном слое (5-10 м) выражены довольно слабо. Небольшое снижение средних концентраций фосфатов наблюдается в июле, в связи с их активным поглощением фитопланктоном.

Кремний. В Печорском море содержание нерастворённого неорганического кремния (силикатов) находится в диапазоне от аналитического нуля (в период его потребления диатомовыми водорослями) до 2600 мкг Si/л в открытой акватории, в Печорской губе максимальное содержание нерастворённого неорганического кремния достигает 4400 мкг Si/л и более.

В Печорском море приток силикатов, в тёплый период активно расходующихся в фотическом слое, происходит, в основном, с материковым стоком, а также при подъёме глубинных вод. Таким образом, максимальные средние многолетние содержания силикатов в поверхностном слое, превышающие значения 800-1000 мкг Si/л, наблюдаются в тех районах, где идёт приток кремния с выходящими из Печорской губы и новоземельского района водами (совместное действие поднятия глубинных вод и материкового стока). На основной акватории Печорского моря содержание нерастворённого неорганического кремния близко к аналитическому нулю.

Для открытой части моря максимальные величины содержания нерастворённого неорганического кремния по вертикали отмечается на горизонте 30 м. На поверхности его содержание снижается больше чем в 2 раза, вследствие деятельности морской биоты, а на глубине более 40 м, где отсутствует значительное влияние материкового стока, происходит снижение содержания силикатов до 100 мкг Si/л и затем довольно равномерно возрастает с глубиной до 300 и более мкг Si/л в глубинных водах.

В холодный период наблюдается значительное снижение содержания нерастворённого неорганического кремния в слое от 0 до 40 м. Причиной этому становится практически прекращающийся приток его с суши. На глубине более 40 м среднее содержание силикатов на открытой акватории Печорского моря практически соответствует его содержанию в тёплый сезон.

Соединения азота. В Печорском море содержания нитритного азота колеблется в пределах от аналитического нуля до 12,9 мкг N/л в открытых районах акватории и до 33,6 мкг N/л в Печорской губе. В течение обоих сезонов среднее содержание нитритного азота в поверхностном слое составляет немногим менее 1 мкг N/л, уменьшаясь к слою 5-10 м до значений 0,1-0,2 мкг N/л. В тёплое время выделяются 2 отчётливых минимума на горизонтах 40 и 80 м. Ко дну происходит рост среднего содержания нитритного азота (до 2-3 мкг N/л). В тёплый сезон отмечается наибольший диапазон изменчивости содержания нитритного азота в поверхностных водах, от 0 в открытом море до 12,9 мкг N/л прибрежных районах.

В мелководной части Печорского моря вертикальное распределение среднего содержания нитритного азота носит более равномерный характер по сравнению с глубоководной частью. На поверхности его содержание составляет в среднем примерно 4 мкг N/л, на горизонте 10-15 м – около 2 мкг N/л. Содержание нитритного азота, в течение холодного сезона, значительно меньше, составляя в среднем 0,5-0,8 мкг N/л.

Содержание нитратного азота в Печорском море колеблется в пределах от аналитического нуля до 192 мкг N/л в открытой акватории и до 160 мкг N/л

в районе Печорской губы. В глубоководной части Печорского моря, независимо от сезона, наблюдается рост средних значений нитратного азота в водах с увеличением глубины.

В безлёдный период в поверхностных водах глубокой части моря содержание нитратов находится на уровне 10-20 мкг N/л, в более глубоких слоях среднее содержание нитратного азота возрастает до значений 60-80 мкг N/л. В холодный период содержание нитратов моря значительно выше.

Среднее содержание нитратного азота в поверхностных водах резко возрастает от 80 до 100-110 мкг N/л в слое от 0 до 10 м, практически не изменяясь до глубины 60 м. В мелководной части акватории среднее содержание нитратов по вертикальному профилю изменяется мало, составляя примерно 10-20 мкг N/л. В холодный сезон среднее содержание нитратного азота на порядок выше, максимум (до 100-110 мкг N/л) приходится на придонный слой.

Карбонатная система. Наибольшие значения общего содержания нерастворённого неорганического углерода в поверхностных водах открытой части акватории Печорского моря приходится на май-июнь, составляя до 28 мг C/л, в последствие, когда лёд вскрывается, эта величина постоянно уменьшается, минимальные значения (до 24 мг C/л) отмечаются в октябре, ввиду его потребления для образования нового органического вещества.

Содержание нерастворённого неорганического углерода в поверхностных водах Печорской губы возрастает в тёплое время от 10 мг C/л (июнь-июль) до 20 мг C/л (октябрь), что является результатом двух процессов: разложения органического вещества, поступившего в воды губы с речным стоком, в основном, в весенний паводок, и увеличения солёности вод Печорской губы вследствие ослабления интенсивности материкового стока.

Таким образом, формирование химического состава вод Печорского моря происходит в результате взаимодействия трансформированных атлантических вод, вод открытой части акватории Баренцева моря, вод Белого и Карского морей, а также материкового стока и атмосферных осадков. Такое

взаимодействие вод различного происхождения приводит к формированию довольно сложной слоистой структуры распределения гидрометеорологических параметров, часто даже в мелководной части Печорского моря.

К наиболее значимым природным процессам, оказывающим непосредственное влияние на формирование химической структуры вод Печорского моря, относятся:

- изменчивость гидрофизических параметров среды;
- сезонные изменения температуры вод и процессы образования ледового покрова;
- материковый сток;
- сезонность развития морской биоты и связанных с этим биохимических процессов синтеза и окисления органического вещества;
- сильная периодическая (суточная и сезонная) и неперодическая (синоптического и межгодового масштабов) изменчивость гидрологических и биологических условий Печорского моря [16].

1.3 Современное хозяйственное использование акватории и источники поступления загрязняющих веществ

Ввиду суровых условий Крайнего Севера, прибрежная зона Печорского моря слабо заселена. Наиболее значимыми и крупными населённым пунктам здесь относятся город Нарьян-Мар (столица НАО), посёлки Варандей, Вангурей, приходящиеся на берега Печорской губы, селения Бугрино и Кортаиха.

Печорское море – это важнейший район арктического шельфа страны в контексте добычи углеводородов. Исключительную значимость он имеет также с точки зрения транзита грузов из акваторий морей принадлежащих СМП (Северному морскому пути), прежде всего нефти из Обской губы [19].

Следовательно, наиболее значимыми отраслями хозяйственной деятельности, с одной стороны, негативно влияющими на акваторию изучаемого объекта, с другой – играющими исключительную роль в экономике субъектов РФ, чьё побережье оно омывает, и в целом в российской экономике, являются: разведка, добыча и морская транспортировка углеводородного сырья и судоходство. Определённый вклад в экономику местных регионов вносит рыболовство, в основном, прибрежные промыслы, сосредоточенные, главным образом, в устьевой зоне реки Печора [16]. Данные отрасли оказывают значимую нагрузку как на саму акваторию Печорского моря, так и на его прибрежные зоны, являясь главными источниками загрязнения.

Большую опасность для местных экосистем несёт сток реки Печора, вносящий в юго-восточную часть Баренцева моря загрязняющие вещества из основных промышленных районов Европейского севера страны (Республики Коми и НАО), где основными загрязнителями являются газонефтедобывающая и горнодобывающая промышленности. Ежегодно в акваторию моря со стоком Печоры вносится около 0,40 тонн детергентов, 6 тысяч тонн нефтяных углеводородов. Кроме того, воды реки загрязнены соединениями цинка, железа, меди, а также фенолами [7].

К ещё одному источнику поллютантов, поступающих в морскую акваторию, можно отнести разрушение многолетнемёрзлых тундровых грунтов, усиливающееся в последние несколько десятилетий как результат климатических изменений. Загрязняющие вещества, накопленные в почвах и надмерзлотных таликовых водах ввиду антропогенного воздействия, вследствие увеличения их дренирования поступают в местные поверхностные водотоки и в дальнейшем неминуемо попадают в Печорское море [1].

1.4 Антропогенное эвтрофирование

Под термином антропогенное эвтрофирование подразумевается ускорение увеличения биологической продуктивности водоёмов вследствие

хозяйственной деятельности, что ведёт к серьёзным структурным преобразованиям в жизнедеятельности водных сообществ, усилению развития на водном объекте фотосинтезирующих существ, вызывающих «цветение» воды и, как следствие, ухудшение её качества [20].

Учитывая крайнюю уязвимость местных экосистем, в условиях всё возрастающей антропогенной нагрузки, оказываемой на водоём, исключительно важно проводить в районе исследуемого объекта регулярные исследования состояния его окружающей среды, уделяя особое внимание процессам эвтрофирования Печорского моря и Печорской губы.

Уровень эвтрофирования, его тенденция в работе были характеризованы на основе анализа концентрации в поверхностном слое хлорофилла «а», как важнейшего показателя биомассы фитопланктона, который используется для оценки состояния водного объекта с экологической точки зрения [21].

Хлорофиллы представляют собой универсальные зелёные пигменты способных к фотосинтезу растений, водорослей, а также бактерий. По своей химической природе они являются сложными эфирами дикарбоновой хлорофиллиновой кислоты и двух остатков спиртов, а именно метанола и фитола. Хлорофилл «а» ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$) – наиболее широко распространённая природная форма хлорофилла, основной пигмент процесса фотосинтеза. Данная форма хлорофиллов – составляющая часть реакционных центров, а также светособирающих комплексов всех оксигенных фотосинтезирующих организмов кроме пурпурных и зелёных серобактерий [22].

Поскольку именно фитопланктон в процессе фотосинтеза образует первичную продукцию, определяющую уровень развития живого мира, при оценке состояния водоёма ему, как основному продуценту первичного органического вещества, уделяется особое внимание, а концентрация хлорофилла «а» является показателем состояния фитопланктона и позволяет делать выводы, как о трофности водоёма, так и о его токсичности [23]. Таким образом, исследования изменчивости концентрации хлорофилла "а" водных

объектов незаменимы при изучении многих процессов, связанных, прежде всего, с изменением климата и антропогенным воздействием [24].

Глава 2. Материалы и методика

2.1 Описание района исследования

Анализ изменчивости эколого-химической ситуации в районе Печорского моря основан на исследовании содержания в поверхностных водах (глубина 0,5 м) хлорофилла "а" в период с 1993 по 2020 гг. (среднемесячные данные) и его зависимости от концентрации биогенных элементов, в значительной степени зависящей от уровня антропогенной нагрузки, оказываемой на водоём.

Для выполнения исследования были проанализированы данные по содержанию в поверхностном слое растворённого кислорода, фосфатов, нитратов, силикатов и хлорофилла "а" в 14 точках (рисунок 3).

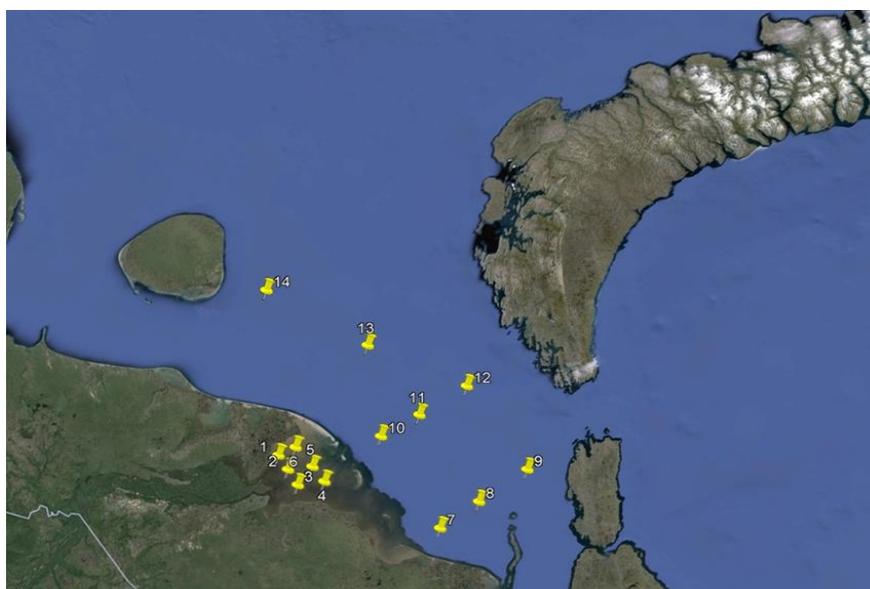


Рисунок 3. Схема станций наблюдений. Печорское море. Данные портала Copernicus

Точки 1-6 расположены в устьевой области Печорской губы, остальные рассредоточены по открытой акватории Печорского моря. Точки 7, 9 и 14

расположены вблизи п. Варандей, о. Вайгач и о. Колгуев соответственно. Остальные (8, 10-13) находятся в центральной части акватории. Координаты выбранных точек приведены в таблице 1.

Таблица 1. Координаты точек

Точка	Координаты
1	68°30'42.61" с. ш., 54°5'28.68" в. д.
2	68°28'53.29" с. ш., 54°27'33.14" в. д.
3	68°26'40.21" с. ш., 54°50'52.13" в. д.
4	68°36'34.72" с. ш., 55°10'60.00" в. д.
5	68°37'56.41" с. ш., 54°46'4.11" в. д.
6	68°39'6.03" с. ш., 54°12'31.79" в. д.
7	68°56'27.67" с. ш., 57°39'40.93" в. д.
8	69°18'11.06" с. ш., 57°50'50.32" в. д.
9	69°44'44.77" с. ш., 58° 6'6.20" в. д.
10	69°10'51.74" с. ш., 55°17'28.10" в. д.
11	69°30'45.01" с. ш., 55°31'3.66" в. д.
12	69°56'0.33" с. ш., 55°46'20.47" в. д.
13	69°38'3.86" с. ш., 53°33'42.08" в. д.
14	69°22'13.51" с. ш., 51° 6'51.23" в. д.

2.2 База данных

Данные, по которым была произведена оценка изменчивости экологического состояния Печорского моря, были выбраны из базы данных MERCATOR FREEBIORYS2V4, с портала программы Copernicus (рисунок 4). Данные доступны по следующему адресу: <https://data.marine.copernicus.eu/products>.

Программа Copernicus представляет собой компонент наблюдения за планетой в ходе реализации космической программы Европейского Союза. Copernicus предоставляет информационные услуги, базирующиеся на спутниковом наблюдении планеты и данных in-situ. Copernicus Marine Service

значится морским элементом данной программы, предоставляющий разноплановую информацию о Мировом океане. Целью Copernicus является снабжение пользователей глобальными, непрерывными, автономными, а также высококачественными данными для исследования происходящих на нашей планете процессов.

Copernicus собирает значительные объёмы разноплановых данных со специальных космических спутников, относящихся к семейству Sentinel, из космических миссий вспомогательного характера (запущенных ранее различных коммерческих и общественных спутников), а также со множества датчиков, расположенных на наземных станциях, воздушных и морских системах наблюдения [25].

Морская часть программы являет собой регулярную и систематическую информацию об обстановке в Мировом океане в глобальном и в региональном масштабах. В базах данных, относящихся к вышеупомянутой программе, содержится информация, характеризующая физические процессы, протекающие в океане, состояние ледяного покрова, его биогеохимию.

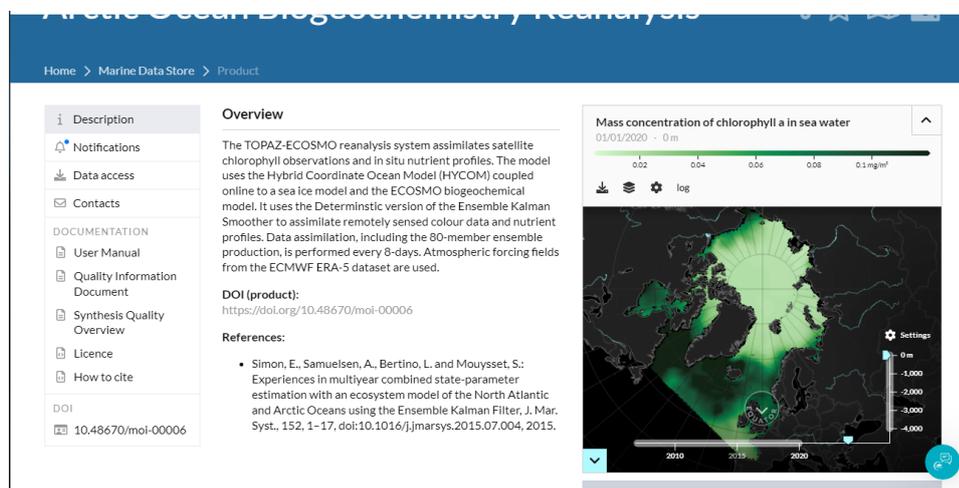


Рисунок 4. Интерфейс портала Copernicus, откуда были взяты данные [26]

С помощью базы данных Copernicus были получены исходные данные для выполнения работы. Для выбранных точек в Печорском море и Печорской губе были извлечены и проанализированы данные по содержанию в

поверхностном слое биогенных элементов и хлорофилла "а" в период с 1993 по 2020 гг., а также данные по температуре и солёности с 2002 по 2020 гг.

2.3 Описание методов обработки информации

При выполнении работы по исследованию эколого-химического состояния открытой акватории Печорского моря и Печорской губы были использованы несколько видов статистического анализа – анализ тренда временного ряда, корреляционный и кластерный анализ. Также был произведён SWOT-анализ хозяйственного использования акватории Печорского моря.

Анализ тренда временного ряда. В процессе исследования был проанализирован тренд временного ряда. Тренд – изменение, определяющее общее направление развития (основную тенденцию временного ряда). Представляет собой аналитическую функцию, связывающую все последовательные уровни временного ряда.

В работе были использованы линейный и нелинейный виды тренда. Линейный тренд указывает на то, идёт ли развитие процесса во времени в сторону понижения или повышения. Нелинейный тренд может иметь один экстремум (максимум или минимум), одновременно характеризуя рост (снижение) и снижение (рост) процесса во времени.

Уравнение линейного тренда:

$$y = a_1 t + a_0 + \varepsilon, \quad (1)$$

Уравнение нелинейного (квадратичного) тренда:

$$y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 + \varepsilon, \quad (2)$$

При анализе тренда крайне важна оценка его значимости (насколько существен вклад тренда в изменчивость случайного процесса), которая была

произведена по коэффициентам тренда и по коэффициенту корреляции. Для проверки использовался критерий Стьюдента.

Корреляционный анализ. Основной задачей корреляционного анализа является выявление связи между переменными и оценка её тесноты. В общем случае эта связь может быть трёх типов: функциональной (детерминированной), стохастической (вероятностной) и случайной, характеризующей полное отсутствие связи. Для установления тесноты связей используется коэффициент корреляции (r), – безразмерная параметрическая характеристика линейной взаимосвязи двух случайных величин. Значения коэффициента корреляции варьируются в пределах от -1 до 1. При $r = 1$ положительная линейная зависимость максимальна. При $r = -1$ наблюдается отрицательная линейная зависимость.

В результате работы для каждой точки была сформирована корреляционная матрица, позволяющая установить степень зависимости между парами переменных, оценить их связь и направления между переменными в наборе данных [27].

Кластерный анализ. В ходе работы был произведён кластерный анализ, направленный на группировку исследуемых параметров, содержания хлорофилла «а» и биогенных элементов, температуры и солёности поверхностного слоя за тёплый (безлёдный) период с 1993 по 2020 гг., по схожести их формирования на исследуемом объекте, а также для группировки точек открытой акватории по среднемесячным значениям исследуемых параметров.

Кластерный анализ представляет собой сочетание методов, а также алгоритмов теории распознавания образов, позволяющих классифицировать множества объектов в многомерном пространстве признаков с помощью процедуры самообучения. Применяемая в ходе анализа классификация разбивает множества изучаемых объектов на некоторое количество однородных (по наиболее существенным признакам сходства) подмножеств. В

итоге данный вид анализа позволяет получить группы схожих объектов, называемые кластерами.

В процессе исследования кластерный анализ был произведён по иерархическому агломеративному методу Уорда, использующий методы дисперсионного анализа для оценки расстояний между кластерами.

Для количественной оценки сходства исследуемых объектов была использована метрика Евклида.

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (3)$$

где d_{ij} – расстояние между i -м и j -м объектами;

x_{ik} и x_{jk} – значения k -й переменной у i -го и j -го объектов.

Выбранный метод предполагает, что первоначально, на первом шаге анализа, каждый кластер состоит только из одного объекта, далее объединяются два ближайших кластера. Для данных кластеров определяется среднее значение каждого признака и производится расчёт суммы квадратов отклонений (V_k).

$$V_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (x_{i,j} - \bar{x}_{j,k})^2, \quad (4)$$

где k – номер кластера;

i – номер объекта;

j – номер признака;

p – количество признаков, характеризующих каждый из объектов,

n — количество объектов в k -м кластере.

В дальнейшем на каждом шаге работы алгоритма происходит объединение тех кластеров, которые дают наименьшее приращение величины V_k .

В результате формируется дендрограмма (древовидная диаграмма), на которой представлена последовательность, с которой происходило объединение исследуемых объектов.

Так как в работе исследуемые характеристики имеют разную размерность была произведена статистическая стандартизация, в ходе которой была использована следующая формула:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \quad (5)$$

где \bar{x}_j – средние значения ряда данных, а σ_j – его стандартное отклонение [28].

SWOT-анализ. SWOT-анализ — метод, использующийся в рамках стратегического планирования, применяется с целью определения возможных альтернатив развития исследуемого объекта, определения его сильных и слабых сторон, а также существующих угроз. Метод подходит в том числе для разработки Стратегии устойчивого развития прибрежной зоны и морской деятельности для конкретного водного объекта и для решения ряда практических задач.

SWOT-анализ основан на анализе сильных и слабых сторон внутренней среды, а также возможностей и угроз внешней среды.

- Strengths (сильные стороны),
- Weaknesses (слабые стороны),
- Opportunities (возможности),
- Threats (угрозы).

Внутренняя среда представлена конкретной частью исследуемого объекта, а внешняя среда включает общую экономическую и политическую ситуацию, государственную и международную политику, внешние условия и глобальные вызовы [29].

Глава 3. Исследование экологического состояния Печорского моря

3.1 Факторы, определяющие уровень антропогенной нагрузки

Эколого-химическое состояние Печорского моря и Печорской губы, наряду с физико-географическими параметрами, во многом определяется степенью нагрузки, оказываемой хозяйственной деятельностью человека [16].

Наибольшее воздействие техногенного характера, непосредственно оказываемое на акваторию Печорского моря, отмечается в районе острова Варандей. С 2000 года здесь осуществляются танкерные перевалки нефти, а в одноимённом посёлке, расположенном на острове, проводятся операции по транспортировке и хранению нефти, горюче-смазочных материалов (ГСМ) и других грузов [1]. В 55 км от посёлка Варандей, находится месторождение Приразломное (рисунок 5). Приразломное располагает более 70 млн тонн извлекаемых запасов нефти, а эксплуатация месторождения рассчитана на срок не менее 25 лет [30].



Рисунок 5. Приразломное нефтяное месторождение [31]

Опасность для Печорского моря, с точки зрения загрязнения нефтью и нефтепродуктами представляет также сток рек, на водосборах которых ведётся разведка и добыча углеводородного сырья [1].

Одним из наиболее значимых факторов загрязнения вод Печорского моря значится сток реки Печора. Бассейн реки в настоящий момент является регионом крупномасштабной разведки, добычи, а также транспортировки нефти и газа. Активная эксплуатация Печорского и Тимано-Печорского каменноугольных бассейнов и Тимано-Печорской газонефтяной провинции оказывает значительное воздействие на формирование гидрохимического режима реки Печора. Таким образом, географическая система Печора – Печорская губа – Печорское море представляет собой основной путь поступления загрязняющих веществ.

Значимый вклад в поступление загрязняющих веществ в Печорское море вносит судоходство. Высока его интенсивность через устье реки Печоры (сообщение с портом Нарьян-Мар, важнейшим транспортным узлом на водной магистрали Печорского района и Северного Морского Пути).

Ещё одним фактором, определяющим уровень антропогенной нагрузки, является рыболовство. Печорская губа и дельта реки Печора относятся к важным рыбохозяйственным объектам, играющим значительную роль в экономике Ненецкого автономного округа. Данный вид хозяйственной деятельности, при чрезмерном вылове, кроме непосредственного загрязнения акватории нефтепродуктами, твёрдыми и другими видами отходов способствует истощению биологических ресурсов, нарушению экосистем и снижению уровня биомассы [16].

3.1.1 Нефтяное загрязнение

Уровень антропогенной нагрузки с точки зрения загрязнения нефтью и нефтепродуктами региона Печорского моря отличается масштабами, несоизмеримыми со способностью местных сообществ к саморегуляции и

самоочищению. Загрязнение нефтью крайне пагубно для хрупких арктических экосистем. Здесь, в условиях невысокого разнообразия, каждый вид флоры и фауны крайне ценен. Учитывая, что арктические экосистемы обладают низкой способностью к самовосстановлению и самоочищению, они становятся крайне уязвимыми к нефтяному загрязнению. Образовавшаяся в результате антропогенной деятельности нефтяная плёнка препятствует проникновению света в водную толщу, фотоокислению органических веществ, нарушает процессы тепло- и газообмена между океаном и атмосферой. Кроме того, нефтепродукты оказывают токсическое воздействие на живые организмы, обитающие в водоёме, что крайне негативно сказывается на их физиологических процессах. Проблема нефтяных разливов в Печорском море усугубляется также по причине сложности их ликвидации из-за ледяного покрова [32].

В море нефть поступает с морским транспортом, при добыче на материковом шельфе, со стоком рек, особенно, Печоры, бассейн которой располагается на территории Тимано-Печорской газонефтяной провинции, представляющую собой одну из главнейших сырьевых баз Европейского севера России. В её границах на настоящий момент подтверждено наличие более 230 месторождений нефти и газа, а оцениваемые начальные запасы нефти категорий А (разрабатываемые, разбуренные), В1 (разрабатываемые, неразбуренные, разведанные), В2 (разрабатываемые, неразбуренные, оцененные), С1 (разведанные), с учётом шельфа Печорского моря, составляют около 8,2 млрд тонн условного топлива [33].

Существующие в пределах данного района нефтепроводы, вследствие густоты местной гидрографической сети, зачастую пересекают различные водные объекты, и, в случае аварийных разливов, нефть с водосборов попадает в реку Печору, а затем выносится в Печорскую губу и далее в море. Такого рода аварии обуславливают нарушение природной биогеохимической сбалансированности водных экосистем, приводят к нарушению химических циклов и режима их функционирования [16].

Вследствие активного освоения нефтяных месторождений, располагающихся в районе водосбора реки Печоры и шельфа Печорского моря, увеличивается вероятность возникновения аварий при добыче и транспортировке углеводородного сырья. Нефтяные разливы на акваториях особенно опасны для морских и береговых экосистем ввиду их быстрого распространения на значительные расстояния. В условиях Крайнего Севера устранение последствий таких аварий крайне затруднено суровыми природно-климатическими условиями, делающими некоторые места региона практически недоступными для людей и техники [32].

Серия аварий на участке магистрального трубопровода «Возей-Головные сооружения» в 1994 году, является самым масштабным разливом нефти, оказавшим воздействие на устье реки Печора. Тогда разлитая нефть выявлялась на акваториях и берегах рек Хатаяга, Колва, Уса и Печора, суммарная площадь участков, покрытых толстым слоем нефти, составила порядка 146 – 147 гектар. По различным данным утечка нефти составила от 14 до 80 тыс. тонн [16]. Значительный нефтяной разлив произошёл в 2012 году, в Усинском районе. Нефть изначально проникла в ручей Возей-Шор, а затем — в реки Колва, Уса и, впоследствии в Печору. В 2021 году разлив нефти случился в Республике Коми с Ошского месторождения (около 90 тонн), нефть попала в реки Колва, Уса и далее в Печору. Разливы меньшего масштаба происходят в бассейне Печоры регулярно [34].

С декабря 2013 года добыча нефтяных углеводородов ведётся на континентальном шельфе Печорского моря, где в 55 км к северо-западу от посёлка Варандей расположено Приразломное нефтяное месторождение. Здесь добыча нефти ведётся на морской ледостойкой стационарной платформе (МЛСП) «Приразломная». МЛСП «Приразломная» – единственная подобная платформа, на которой производится полный цикл работ: бурение и обустройство скважин, добыча, очистка и переработка до товарного состояния извлечённой нефти, а также её хранение и отгрузка на танкеры [35]. Добыча

нефти на «Приразломной» с момента начала её функционирования непрерывно растёт (рисунок 6), к 2021 году превышая отметки в 3,5 млн тонн.

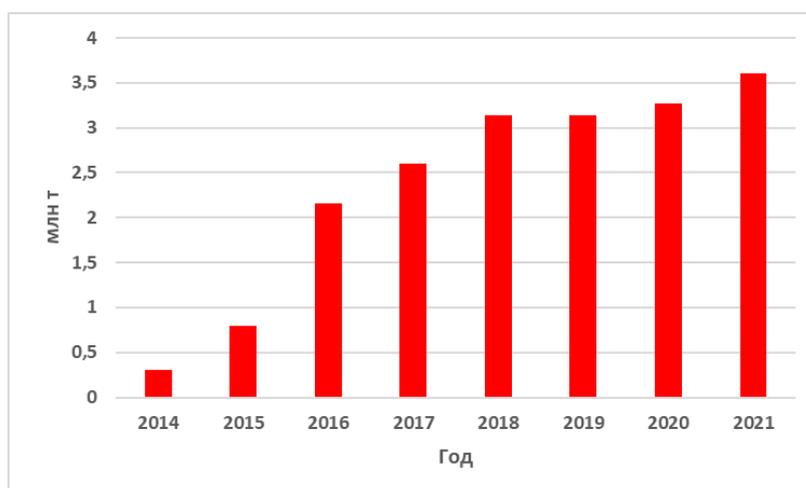


Рисунок 6. Добыча нефти на МЛСП «Приразломная» 2014-2021 гг. [36]

К 2023 г. накопленная добыча нефтяных углеводородов на Приразломном нефтяном месторождении превысила отметки в 25 млн тонн с начала промышленной эксплуатации [37].

Добыча нефти на шельфе Печорского моря и её дальнейшая транспортировка также увеличивает вероятность возникновения аварийных разливов и поступление в акваторию нефтепродуктов с перевозящих её танкеров.

3.1.2 Интенсивность транспортной нагрузки

Судоходство (в основном грузовые перевозки) играет значительную роль в экономике района исследования (рисунок 7). В Печорском море проходят маршруты танкеров, перевозящих нефть с терминала Варандей и платформы «Приразломная» (рисунок 8). Через море проходит наикратчайший путь от Мурманска к проливу Карские Ворота и далее на восток по Северному морскому пути (СМП). В основном этим маршрутом

вывозится нефть, добытая в районе Печорского моря, и осуществляется перевозка сжиженного природного газа и углеводородов из акватории морей СМП (преимущественно из Обской губы).

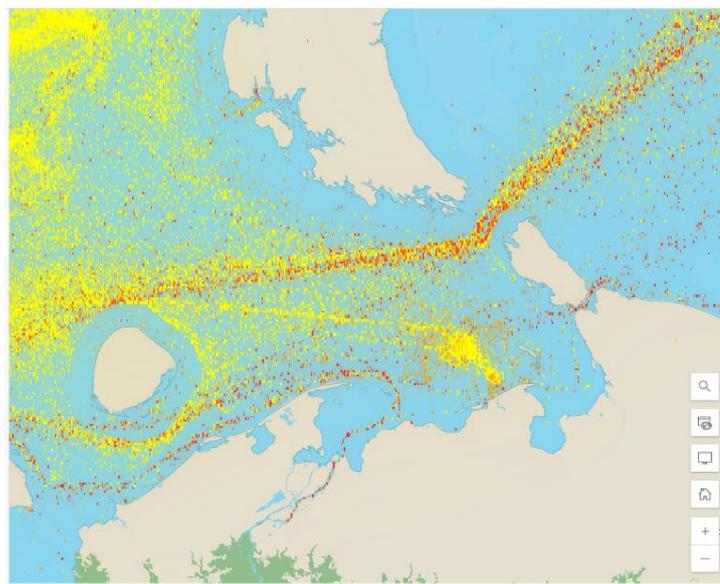


Рисунок 7. Осреднённая интенсивность судоходства в Печорском море (все суда) в период с января 2015 по февраль 2021 гг. [38]

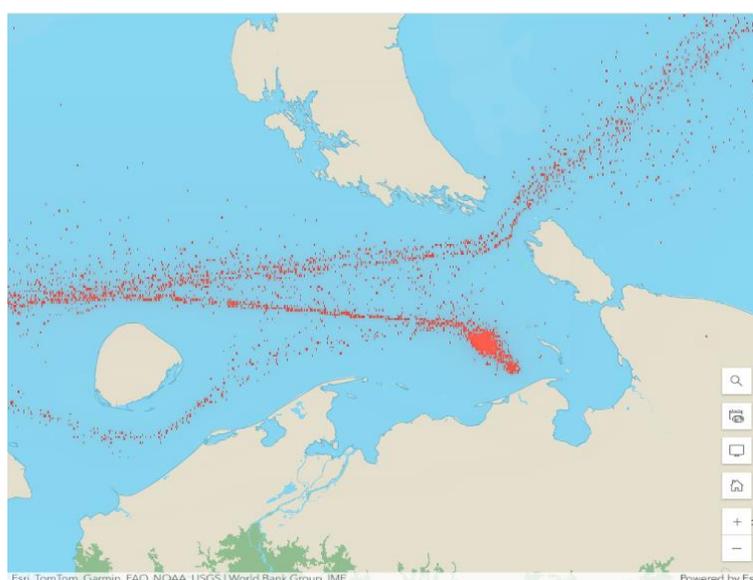


Рисунок 8. Осреднённая интенсивность перевозок нефти танкерами в Печорском море в период с января 2015 по февраль 2021 гг. [38]

Таким образом, к основным транспортным маршрутам, проходящим через Печорское море, относятся:

- круглогодичная транспортировка нефти с МЛСП «Приразломная» и терминала порта Варандей, сезонный вывоз нефти с о. Колгуев;
- сезонные поставки грузов в порты Варандей и Нарьян-Мар, а также о. Колгуев и Вайгач;
- рейсы в акваторию морей Северного морского пути и в обратном направлении;
- транзитные рейсы судов по акватории Северного морского транспортного коридора (СМТК), маршрута, соединяющего европейские и азиатские рынки и пролегающего от Мурманска до Петропавловска-Камчатского. Осуществляются данные рейсы, главным образом, через пролив Карские Ворота, реже через пролив Югорский Шар [19].

В Печорском море расположен порт Варандей – основной нефтеналивной терминал Арктической зоны. В порту осуществляется перевалка нефти на танкеры для её транспортировки по стране и последующего экспорта [39]. Ледостойкий отгрузочный причал (СМЛОП) «Варандей» был введён в эксплуатацию в 2008 г. и находится на удалении 22 км от берега. С берега к причалу подведён подводный трубопровод, перекачивающего нефть из береговых резервуаров. Число судов, заходящих в порт, значительно варьируется, составляя от 2 до 11 в месяц [19]. Функционирует СМЛОП круглый год, в зимний период для обеспечения его работы привлекаются ледокольные суда [39]. Грузооборот порта Варандей за 2010-2023 гг. представлен на рисунке 9.

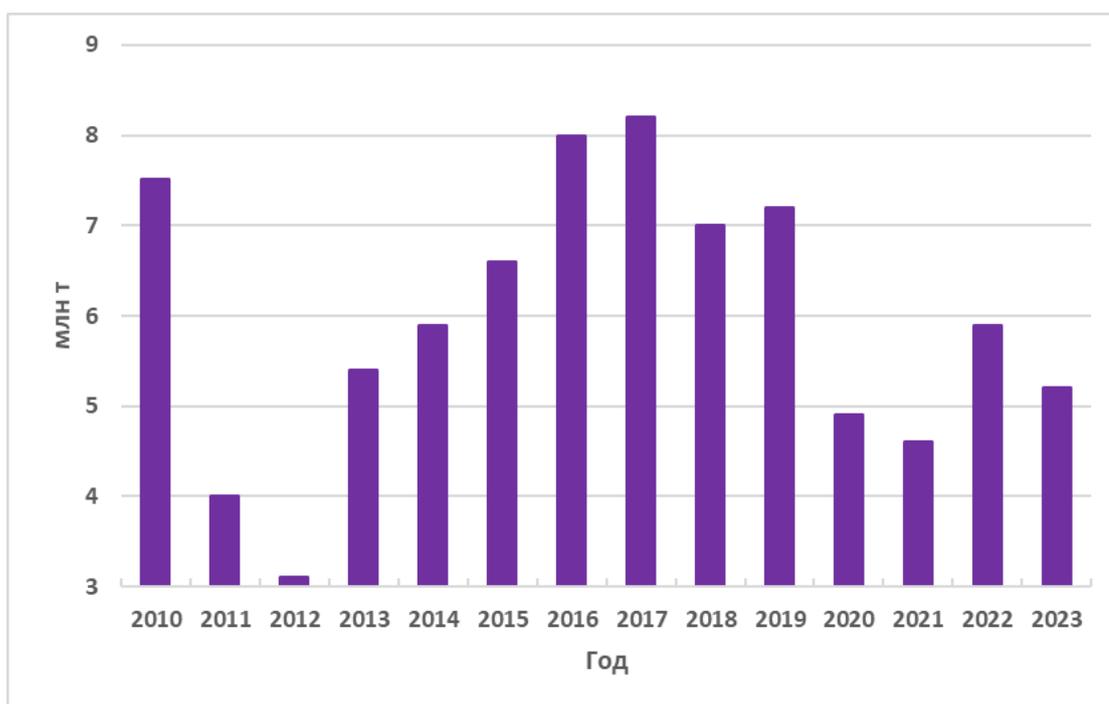


Рисунок 9. Грузооборот порта Варандей за 2010-2023 гг. (млн т) [40]

Порт Нарьян-Мар – морской порт одноимённого города, находящийся в 90 км от устья реки Печора. В отличие от порта Варандей, навигация в порту Нарьян-Мара длится только 4-5 месяцев, в период с середины июня по октябрь, с возможностью ледокольной проводки до середины ноября. Это важнейший порт, переваливающий каботажные грузы, поставляющиеся в летний период с верховьев реки Печоры судами «река-море» и морскими судами [41].

Несмотря на сезонность работы, ввиду отсутствия в регионе сети наземных дорог, водный транспорт незаменим при перевозке грузов для округа. Порт Нарьян-Мар играет также ключевую роль в обеспечении населённых пунктов Ненецкого автономного округа топливно-энергетическими ресурсами, продуктами и промышленными товарами. В период навигации водным транспортом в регион доставляется порядка 85% всех грузов, основные – генеральные и наволочные [42].

Среднегодовое количество судозаходов в морской порт Нарьян-Мар составляет 450 судов. Расчётная пропускная способность порта по

генеральным грузам 363 тысяч тонн, по навалочным — 525 тысяч тонн [43]. Основные грузы, проходящие через порт, — лес, уголь, минерально-строительные, продовольственные грузы, контейнеры [44]. Динамика его грузооборота представлена на рисунке 10.

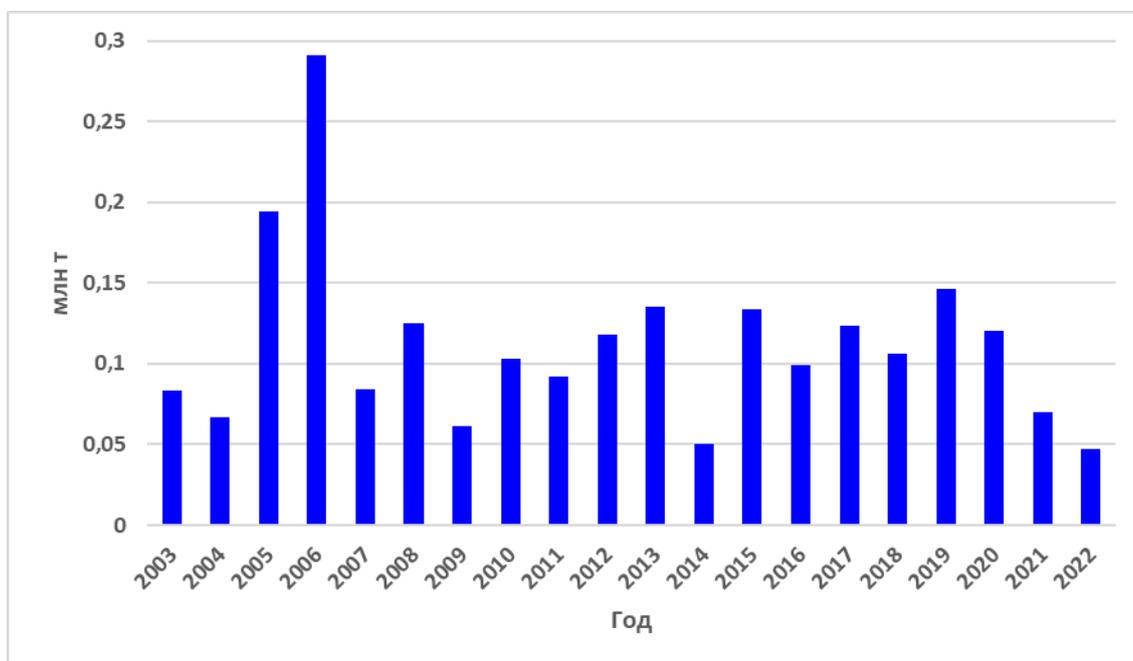


Рисунок 10. Грузооборот порта Нарьян-Мар за 2003-2022 гг. (млн т) [45; 46]

Исходя из вышеизложенного, именно порт Варандей является наиболее значимым, с точки зрения экономики, ввиду статуса основного нефтеналивного терминала российского Арктического региона. Его грузооборот в десятки раз превышает грузооборот одноимённого порта города Нарьян-Мар, осуществляющего перевалки каботажных грузов.

Таким образом, судоходство является неотъемлемой частью экономики Печорского региона, снабжая местные населённые пункты необходимыми грузами для обеспечения людей продовольственной продукцией и функционирования промышленных предприятий, также водным транспортом осуществляется транспортировка полезных ископаемых. Однако, данный вид хозяйственной деятельности неминуемо влечёт загрязнение вод Печорского

моря. В процессе эксплуатации судов происходит загрязнение вод хозяйственно-бытовыми водами, шламом, образующимся в результате очистки сточных вод и твёрдых отходов, нефтью и нефтепродуктами, отработанными машинными маслами, различным мусором. При сбросе балластных вод в акваторию могут проникать также виды живых организмов, несвойственные данному водному объекту.

3.1.3 Рыбный промысел и экономическая освоенность территории

В открытой части акватории Печорского моря рыбный промысел незначительный, только северо-западная часть моря находится на периферии зоны активного промышленного рыболовства, ведущегося в Баренцевом море (рисунок 11). В основном здесь производится промысел сайки разноглубинными тралами. Основной промысел в районе ведётся лишь в некоторых приустьевых районах и заливах (губах) с помощью пассивных орудий. Промысловое значение здесь имеют преимущественно сиговые рыбы (сиг, чир, нельма, пелядь, омуль, ряпушка), налим и корюшка. Примерно две трети вылова рыбы приходятся на Печорскую, Колоколкову, Хайпудырскую и Варандейскую губы, участки побережья, расположенные восточнее 50° в. д. Основной промысел в исследуемом регионе сосредоточен в Печорской губе, что обуславливается формированием здесь довольно высокой, в отличие от открытой акватории Печорского моря, продуктивности фитопланктона в результате выноса вместе с водами реки биогенных элементов, а также стоковой фронтальной зоной и эффектами зоны ледовой кромки. Данные условия поддерживают высокий уровень биомассы последующих трофических уровней Печорской губы. Здесь, ввиду широкого диапазона солёностных условий, происходит одновременное существование морского, солоноватоводного, а также пресноводного ихтиоценов [12].

Также к наиболее многочисленным видам морских рыб, постоянно обитающим в Печорском море и относящимся к промысловой ихтиофауне,

относятся ледовитоморская навага (промысел развит на юго-востоке Печорской губы), полярная камбала и малопозвонковая сельдь [47].

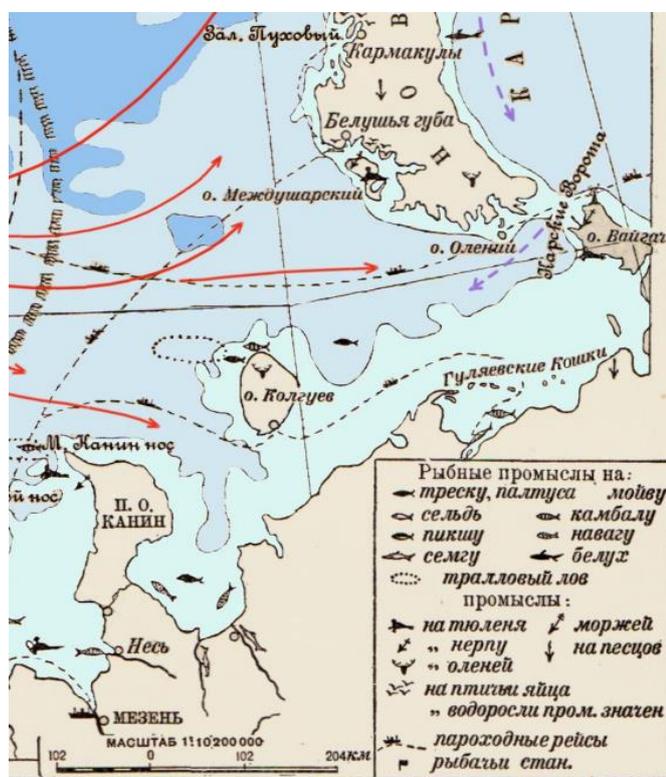


Рисунок 11. Карта рыбного промысла в Печорском море [48]

Перечисленные виды рыб составляют основу промышленного рыболовства Печорского моря и являются значительной частью рациона питания населения регионов, омываемых водами моря (НАО и Архангельской области). В море обитает также печорская сёмга, вылов которой, для сохранения популяций, периодически подвергается запрету [49].

Рыбный промысел также вносит вклад в антропогенную нагрузку, оказываемую на акваторию Печорского моря, особенно в приустьевых районах и губах. При чрезмерном вылове может наблюдаться истощение рыбных ресурсов, снижение темпов биологического роста и, как следствие, низкий уровень биомассы. К негативным последствиям вылова рыбы относится также нарушение пищевых цепочек сложившихся экосистем. Значительный урон популяции сёмги наносит браконьерство. Кроме того, в

результате промысла усиливается загрязнение акватории с судов, производящих вылов рыбы.

Экономическая освоенность территории Печорского моря определяется ресурсным потенциалом и суровыми климатическими условиями Крайнего Севера. Слабая заселённость прилегающей к морю территорий, отсутствие развитой транспортной сети лимитирует формирование здесь крупных промышленных центров, ввиду чего основу экономики региона Печорского моря составляет добывающая промышленность.

Результаты SWOT-анализа. Данный вид анализа относится к наиболее важным методам стратегического планирования. В соответствии с группировкой ключевых аспектов как внешней, так и внутренней среды, SWOT-анализ способствует выбору наилучшей стратегии управления в отношении исследуемого объекта и содействует устойчивому развитию акватерриториального пространства. В настоящей работе SWOT-анализ был использован применительно к району Печорского моря, который был рассмотрен с точки зрения целесообразности дальнейшего развития здесь хозяйственной деятельности.

В результате проведения анализа были выделены основные сильные и слабые стороны юго-восточной части Баренцева моря и её прибрежных территорий с точки зрения природных ресурсов и экономико-географического положения, изложены возможности для успешной реализации хозяйственного освоения района и обозначены предполагаемые угрозы, создающиеся при активном антропогенном использовании акватории Печорского моря. Получившиеся результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. SWOT-анализ факторов устойчивого развития акватории
Печорского моря

Сильные стороны (S)	Слабые стороны (W)
<ul style="list-style-type: none"> • Высокий нефтегазоносный потенциал. Нефтяные месторождения и перспективные структуры континентального шельфа. • Близость к месторождениям Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. • Впадает р. Печора – важнейшая водная магистраль, связывающая Печорское море с главными промышленными центрами Европейского Севера России. • Важная часть СМТК и связь с СМП. • Значимый район местообитания для большого числа как морских и водоплавающих, так и околоводных птиц, в том числе, отмеченных в Красной книге России. • Входит в транзитную зону миграций печорской сёмги. 	<ul style="list-style-type: none"> • Уязвимые к антропогенному воздействию арктические экосистемы. • Тонкий слой почвенного покрова прибрежных территорий. • Сложные климатические и инженерно-геологические условия. • Устойчивый ледяной покров большую часть года. • Опасные ледовые условия, сжатия ледяного покрова, приводящие к осложнению навигации, работы судов и добычи углеводородного сырья.
Возможности (O)	Угрозы (T)
<ul style="list-style-type: none"> • Рост значения района Печорского моря для Арктической зоны и страны в целом в связи с увеличением рейсов по СМТК и СМП для поставок грузов на Дальний Восток и азиатский рынок. • Рост добычи углеводородов, развитие нефтедобывающей отрасли в районе Печорского моря. • Единственная в своём роде МЛСП «Приразломная», производящая полный цикл работ: от бурения скважин до отгрузки сырья на танкеры. • Основной нефтеналивной терминал Арктики, порт Варандей. 	<ul style="list-style-type: none"> • Загрязнение акватории моря и прибрежных зон нефтепродуктами и другими поллютантами. • Катастрофические последствия для окружающей среды в случае возникновения аварий при добыче или перевозке нефти. • Нарушение вследствие антропогенной деятельности гидрохимического режима моря и Печорской губы. • Деградация морских и прибрежных экосистем. • Исчезновение редких видов живых организмов. • Низкий уровень развития инфраструктуры. • Удалённость от промышленных центров.

При выполнении SWOT-анализа Печорского моря с точки зрения хозяйственного использования его акватории становится очевидным, что несмотря на значительные экологические риски для окружающей среды, юго-

восточная часть Баренцева моря играет ключевую роль в экономическом развитии, как субъектов РФ, чьи берега оно омывает, так и в целом Арктической зоны страны, обеспечивая нормальное функционирование основных морских транспортных артерий Арктики (Северного морского пути и Северного морского транспортного коридора). Особое значение Печорское море имеет в плане добычи и транспортировки углеводородного сырья, являясь неотъемлемой частью российского топливно-энергетического комплекса. Учитывая данные обстоятельства, становится очевидным неизбежность дальнейшего развития антропогенной деятельности на акватории самого моря, его континентального шельфа и береговых территорий, следовательно, к приоритетным задачам управления в районе исследования должна стать минимизация ущерба местным экосистемам от хозяйственного освоения и наиболее эффективная защита природных комплексов самого Печорского моря, а также его прибрежных зон. Соответственно, необходимо произвести оценку его эколого-химического состояния и динамики её развития.

3.2 Эколого-химическое состояние Печорской губы и открытой части моря

Рассмотрим результаты статистического анализа для прибрежной части акватории Печорского моря (Точки 1-6).

Результаты анализа трендов временных рядов. Для отображения характера изменения содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое для всех точек был проведён анализ тренда среднегодовых значений концентрации хлорофилла «а» (данные охватывают безлёдный период времени с июня по ноябрь) за исследуемый период времени (1993 - 2020 гг.).

При анализе линейных трендов в точках, расположенных в Печорской губе, установлено, что несмотря на визуально наблюдающуюся во все точки,

кроме Точки 6, небольшую положительную динамику изменения среднегодовых значений содержания хлорофилла «а», при проверке значимости основных характеристик тренда (коэффициента детерминации r^2 и коэффициентов регрессии) было выявлено незначимость хотя бы одной из характеристик для всех шести точек. Следовательно, незначим и вклад линейных трендов в дисперсию исходных рядов. Таким образом, делается вывод об отсутствии в точках Печорской губы данного вида тренда для среднегодовых значений содержания хлорофилла «а».

Однако, для половины точек Печорской губы (Точки 2, 3, 4) во временных рядах среднегодовых значений содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое отмечено присутствие нелинейного тренда, так как аналогичная проверка его характеристик показала, что корреляционное отношение (аналог коэффициента детерминации) и коэффициенты регрессии значимы, нелинейный тренд вносит определенный вклад в формирование изменчивости ряда среднегодовых значений содержания хлорофилла «а» в данных точках.

Для иллюстрации приведённых выше результатов представлены уравнения трендов и графики динамики изменения среднегодового содержания хлорофилла «а» для Точки 1 (рисунок 12) и Точки 4 (рисунок 13). Графики для остальных точек с нанесёнными линиями трендов, их уравнениями и коэффициентами детерминации (корреляционными отношениями) находятся в Приложении А.

Уравнение линейного тренда для Точки 1 (незначим):

$$y = 0,006x + 2,319 \quad (6)$$

Уравнение нелинейного тренда для Точки 1 (незначим):

$$y = 0,0009x^2 - 0,022x + 2,457 \quad (7)$$

Уравнение линейного тренда для Точки 4 (незначим):

$$y = 0,006x + 1,916 \quad (8)$$

Уравнение нелинейного тренда для Точки 4 (значим):

$$y = 0,002x^2 - 0,04x + 2,149 \quad (9)$$

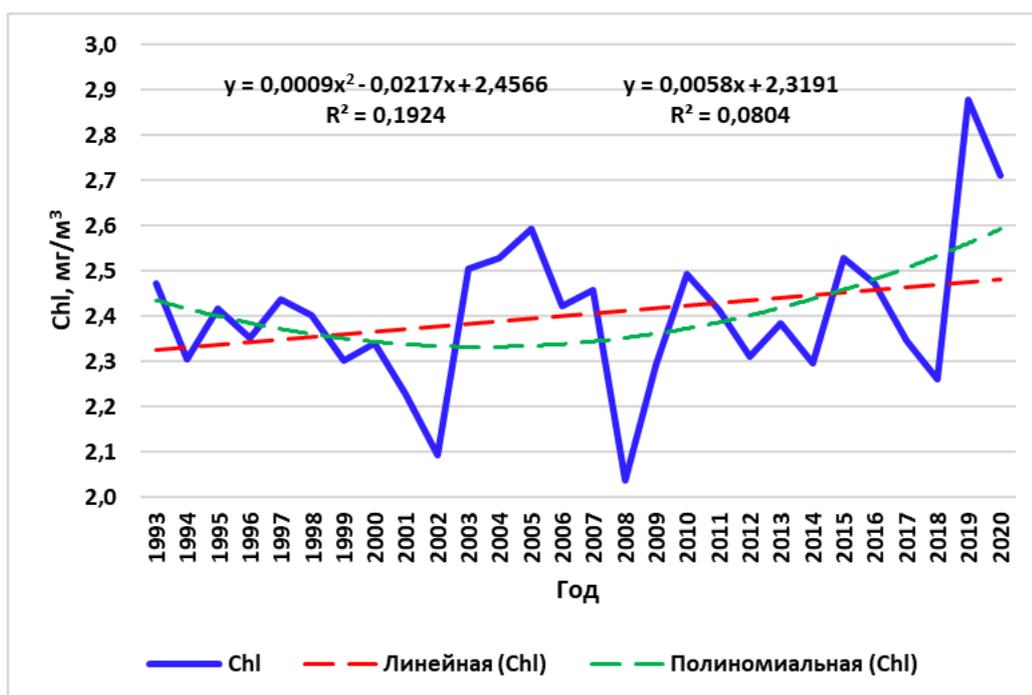


Рисунок 12. Динамика изменения среднегодового содержания хлорофилла «а», его линейного и нелинейного тренда (Точка 1)

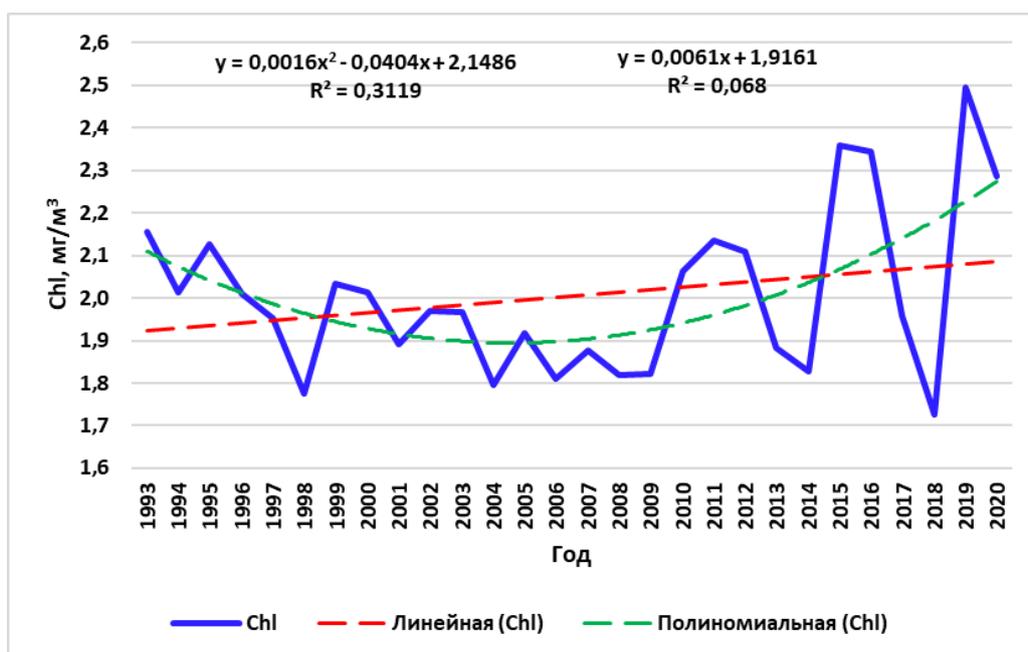


Рисунок 13. Динамика изменения среднегодового содержания хлорофилла «а», его линейного и нелинейного тренда (Точка 4)

Исходя из графиков значимых нелинейных трендов за рассмотренный период времени (1993 – 2020 гг.) отмечается смена в середине 2000х годов отрицательной тенденции межгодового содержания хлорофилла «а» на положительную.

Результаты корреляционного анализа. При выявлении связей между концентрацией хлорофилла «а» в поверхностном слое и биогенными элементами, а также температурой и солёностью в указанных точках были рассчитаны коэффициенты корреляции для всех сочетаний переменных между собой. Для оценки связей и их тесноты рассчитанные коэффициенты были проверены на значимость по критерию Стьюдента. В итоге была сформирована корреляционная матрица, где цветом выделены значимые коэффициенты корреляции.

Исходя из полученных результатов, для всех точек устьевой зоны Печорской губы отмечается статистически значимая прямая связь между содержанием хлорофилла «а» (Chl) и концентрацией нитратов (NO_3), а между

хлорофиллом «а» (Chl) и фосфатами (PO₄), хлорофиллом «а» (Chl) и растворённым кислородом (O₂) – обратная. Также для большинства точек (за исключением точек 1 и 5 наблюдается статистически значимая обратная связь между хлорофиллом «а» (Chl) и температурой поверхностного слоя (T). В точке 6 присутствует статистически значимая прямая связь между концентрацией хлорофилла «а» (Chl) и силикатов (Si).

Для репрезентативности данных представлены сформированные корреляционные матрицы для точек 1 и 6 (таблицы 3 и 4 соответственно). Остальные таблицы приведены Приложении Б.

Таблица 3. Корреляционная матрица для Точки 1

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,074	1					
PO ₄	0,807	0,347	1				
Si	0,098	0,066	0,231	1			
Chl	-0,567	0,323	-0,416	-0,004	1		
T	-0,437	-0,708	-0,369	0,295	0,102	1	
S	-0,080	0,150	-0,029	-0,331	0,016	-0,685	1

Таблица 4. Корреляционная матрица для Точки 6

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,086	1					
PO ₄	0,767	0,331	1				
Si	-0,411	0,509	-0,292	1			
Chl	-0,598	0,374	-0,459	0,596	1		
T	0,201	-0,573	0,406	-0,296	-0,323	1	
S	-0,068	0,139	0,036	-0,079	0,037	-0,050	1

Далее рассмотрим результаты статистического анализа для открытой части акватории Печорского моря (Точки 7-14).

Результаты анализа трендов временных рядов. В отличие от точек, расположенных в устьевой части Печорской губы, в точках открытой акватории моря визуально прослеживается отрицательная динамика изменения среднегодовых значений содержания хлорофилла «а». Проверка значимости основных характеристик линейного тренда показала наличие в точках 10, 12 и 13 отрицательного линейного тренда. В большинстве точек на основании значимости корреляционного отношения и коэффициентов регрессии отмечено присутствие нелинейного тренда. Исключениями в связи с незначимостью одного из коэффициента регрессии стали точки 10 и 12.

В качестве иллюстрирующего материала приведены уравнения трендов и графики динамики изменения среднегодовой концентрации хлорофилла «а» для точек 10 и 13.

Уравнение линейного тренда для Точки 10 (значим):

$$y = -0,006x + 0,786 \quad (10)$$

Уравнение нелинейного тренда для Точки 10 (незначим):

$$y = 0,0007x^2 - 0,027x + 0,889 \quad (11)$$

Уравнение линейного тренда для Точки 13 (значим):

$$y = -0,004x + 0,426 \quad (12)$$

Уравнение нелинейного тренда для Точки 13 (значим):

$$y = 0,005x^2 - 0,018x + 0,495 \quad (13)$$

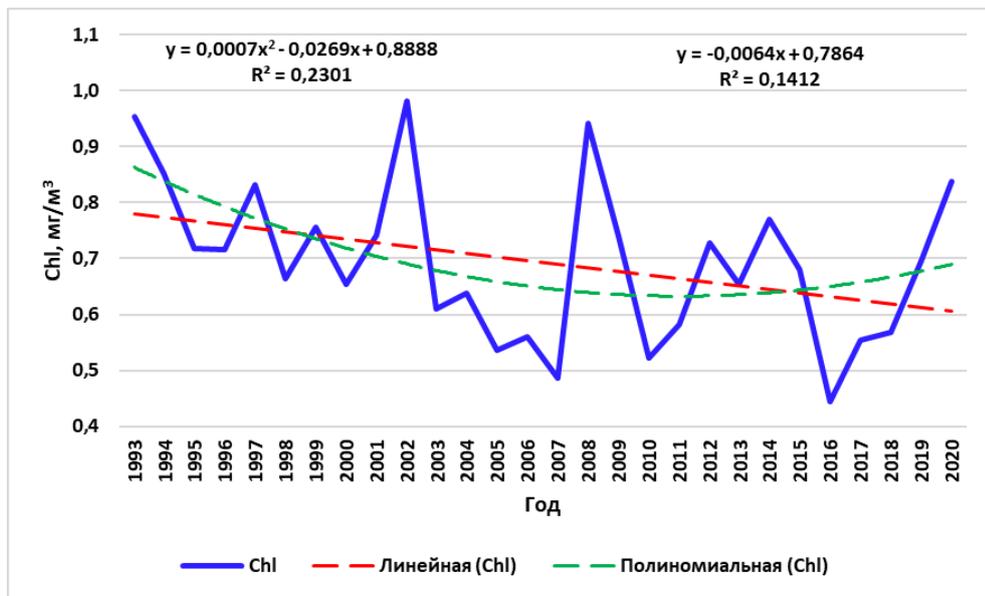


Рисунок 14. Динамика изменения среднегодового содержания хлорофилла «а», его линейного и нелинейного тренда (Точка 10)

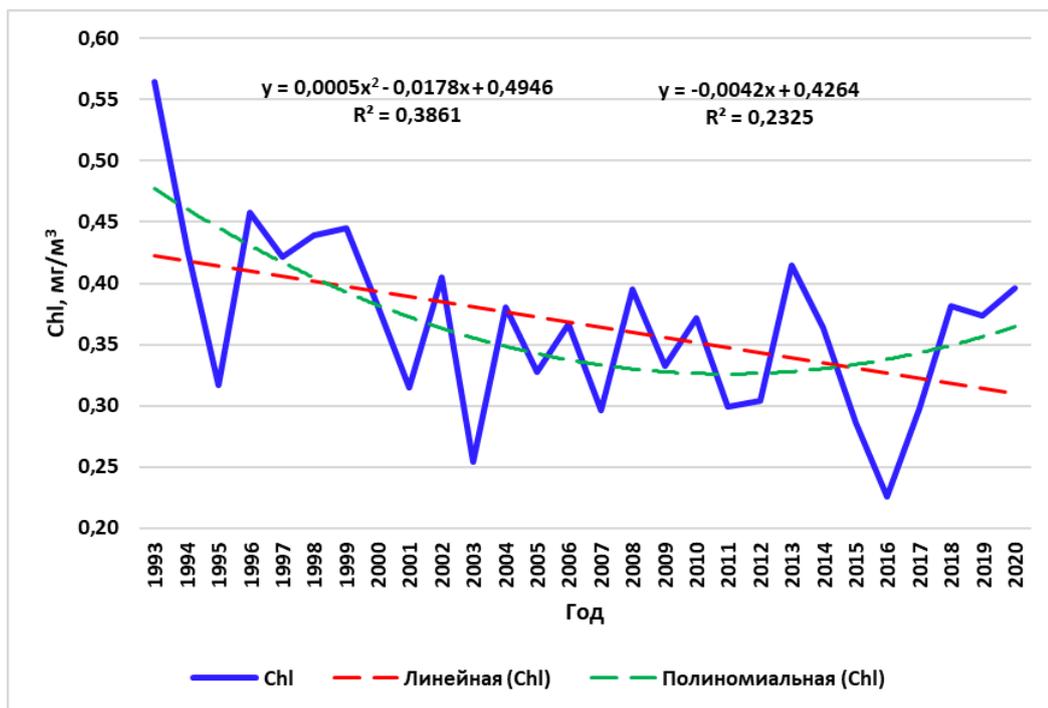


Рисунок 15. Динамика изменения среднегодового содержания хлорофилла «а», его линейного и нелинейного тренда (Точка 13)

На графиках значимых нелинейных трендов, также как и в Печорской губе наблюдается смена отрицательной тенденции межгодового содержания хлорофилла «а» на положительную, происходящая несколько позже, в начале 2010х годов.

Результаты корреляционного анализа. В противоположность Печорской губы, сформированные по результатам анализа матрицы коэффициентов корреляции в точках, принадлежащих открытой части акватории Печорского моря, показывают отличные друг от друга связи концентрации хлорофилла «а» с другими переменными и их тесноту.

Из общих, для большинства точек, закономерностей выделяется статистически значимая обратная связь между содержанием хлорофилла «а» (Chl) и температурой поверхностного слоя (Т), хлорофиллом «а» (Chl) и солёностью (S). Также, в отличие от устьевой зоны Печорской губы, в открытой части моря по итогам корреляционного анализа не обнаружено прямой связи между концентрацией хлорофилла «а» (Chl) и нитратами (NO₃). Ещё одной отличительной особенностью является отсутствие обратной зависимости среди хлорофилла «а» и растворённым кислородом (O₂), в части точек (9, 12, 13, 14) между данными переменными прослеживается статистически значимая прямая связь. В точке 10 отмечено наличие прямой связи между содержанием в поверхностном слое хлорофилла «а» (Chl) и силикатами (Si).

Для иллюстрации приведены корреляционные матрицы для точек 10 и 12 (таблицы 5 и 6). Остальные таблицы приведены в Приложении Б.

Таблица 5. Корреляционная матрица для Точки 10

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,381	1					
PO ₄	0,598	0,102	1				
Si	-0,129	0,700	-0,357	1			
Chl	0,020	0,362	-0,120	0,367	1		
T	-0,575	-0,597	-0,308	-0,190	-0,118	1	
S	0,087	0,029	0,292	-0,139	0,151	-0,629	1

Таблица 6. Корреляционная матрица для Точки 12

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,613	1					
PO ₄	0,607	0,783	1				
Si	0,077	0,135	-0,269	1			
Chl	0,272	-0,133	-0,010	0,058	1		
T	-0,083	0,326	0,482	-0,258	-0,292	1	
S	0,253	0,114	0,414	-0,128	0,209	0,310	1

Результаты кластерного анализа. При проведении кластерного анализа было проведено несколько вариантов разбиения исходного массива данных для выявления определённых закономерностей формирования хлорофилла «а», а следовательно, и фитопланктона, в поверхностных водах акватории Печорского моря. Дендрограммы, полученные в результате анализа, были созданы в программе Past4.

Первый способ выполнения кластерного анализа в работе – это разбивка по исследуемым параметрам. На дендрограмме по горизонтальной оси указаны характеристики, объединяемые в кластеры (хлорофилл «а», биогенные вещества, температура и солёность поверхностного слоя). На вертикальной оси нанесено расстояние, при котором осуществляется последовательное объединение исследуемых объектов.

По построенной дендрограмме (рисунок 16) выделяется два кластера по которым можно судить о влиянии выбранных факторов на развитие фитопланктона в поверхностных водах Печорского моря.

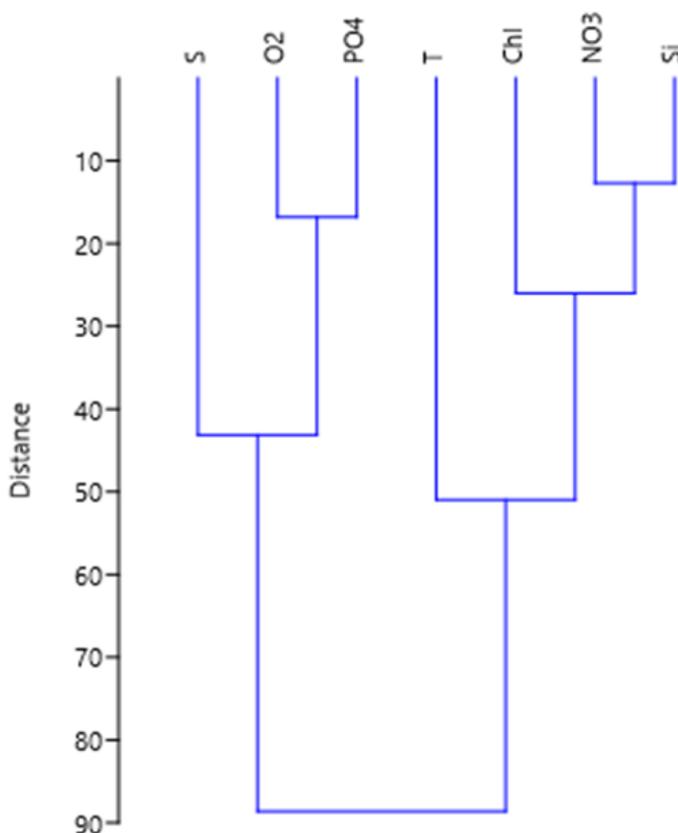


Рисунок 16. Дендрограмма, иллюстрирующая разбиение выбранных объектов на кластеры

По результатам кластерного анализа можно сделать вывод о том, что нитраты являются лимитирующим фактором формирования фитопланктонного сообщества в поверхностном слое. Данный факт обусловлен тем, что нитратный азот представляет собой основную форму азота, которая усваивается растительными организмами. Следовательно, нитраты играют важную роль в развитии фитопланктона на морских акваториях, в том числе и на исследуемом объекте, в достаточном количестве способствуя развитию фитопланктона.

Силикаты также оказывают ощутимое воздействие на развитие хлорофилла «а» в водах Печорского моря, благоприятствуя формированию

диатомовых водорослей на его акватории. Ещё одним фактором, оказывающим значительное воздействие на процесс роста фитопланктона, является температура поверхностного слоя.

В Печорское море нитраты и силикаты могут поступать со сточными водами различных промышленных предприятий и сточными бытовыми и хозяйственными водами, расположенными, не только непосредственно на берегах акватории самого моря, но и на водосборе реки Печора, в него впадающей. В результате развития антропогенной деятельности в исследуемом районе, может повыситься содержание данных биогенных веществ в море, способствующих его эвтрофированию, что в свою очередь ведёт к нарушению местных экосистем.

С другой стороны, выделяется кластер, где сгруппированы характеристики, не способствующие формированию сообщества фитопланктона в поверхностном слое Печорского моря. В этот кластер попали фосфаты и растворённый кислород, а также солёность.

Второй способ – разбивка для точек открытой акватории по среднемесячным значениям исследуемых биогенных элементов, температуры и солёности, а также концентрации хлорофилла «а». Второй вариант разбиения на кластеры проводился за период с 2016 по 2020 гг. отдельно для летних и осенних месяцев.

Для летних месяцев (рисунок 17), с учётом всех исследуемых факторов, было выделено четыре кластера на расстоянии 10. Средние значения характеристик приведены в таблице 7.

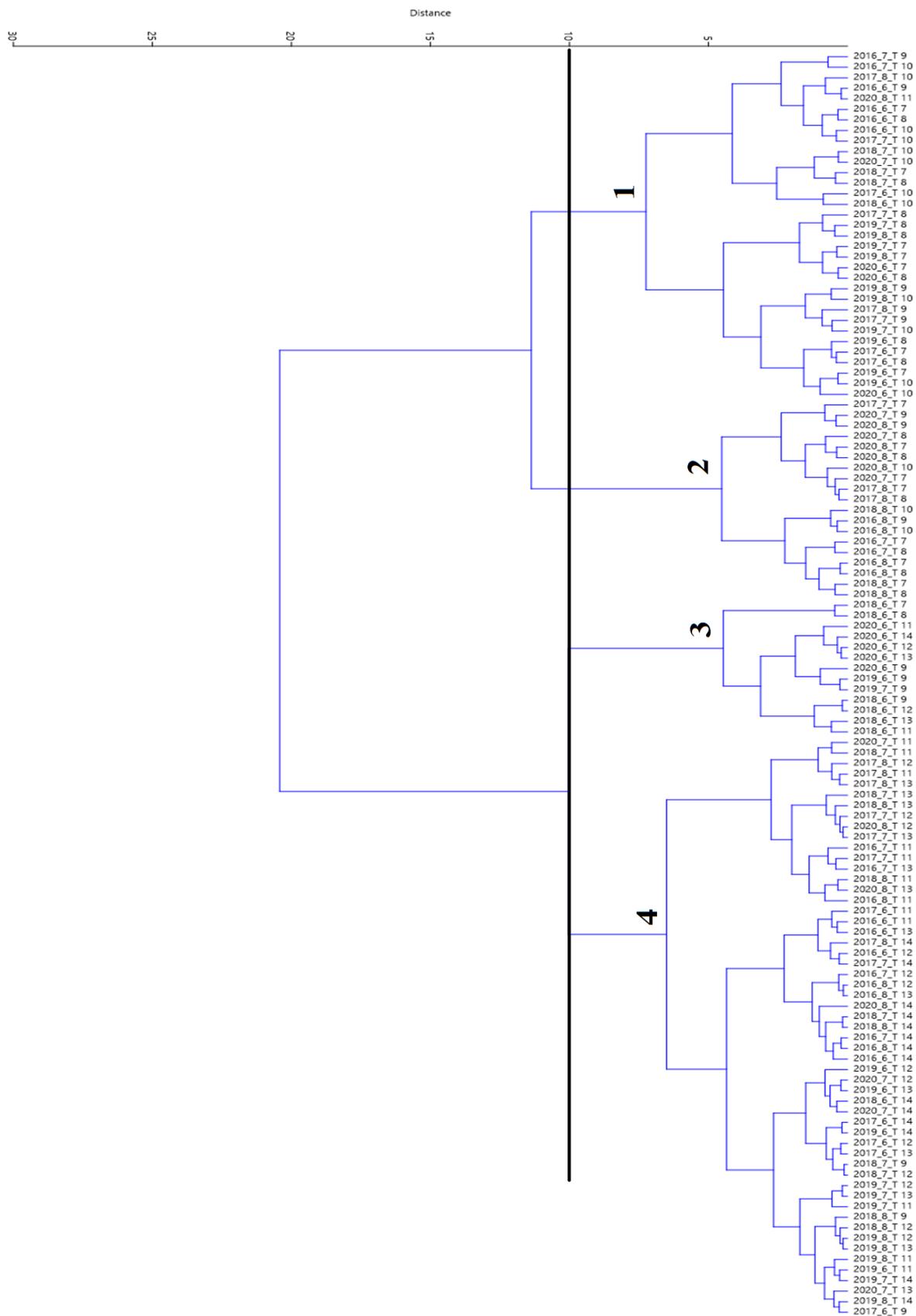


Рисунок 17. Дендрограмма разбиения точек по пространству и месяцам за летний период (июнь – август) с 2016 по 2020 гг. для открытой акватории

Таблица 7. Средние значения характеристик в кластере для летних месяцев

Кластер	O ₂ , мг/л	NO ₃ , мг/л	PO ₄ , мг/л	Si, мг/л	Chl, мг/м ³	T, °C	S, ‰
1	9,817	0,091	0,002	0,395	0,870	4,397	30,619
2	9,360	0,074	0,001	0,448	0,467	10,426	29,248
3	11,330	0,123	0,008	0,226	0,538	-0,075	32,430
4	9,653	0,020	0,003	0,139	0,414	0,431	32,064

В первый кластер вошли, в основном, данные за июнь и июль точек 7-10, находящихся вблизи берегов. Для первого кластера наблюдается наибольшее среднее значение содержания в поверхностных водах хлорофилла «а», при этом здесь отмечается довольно высокие средние показатели содержания биогенных веществ относительно выделенных кластеров, за исключением фосфатов. Средняя температура поверхностного слоя в данном кластере также фиксируется относительно высокая, а солёность – низкая.

Во втором кластере наблюдаются также прибрежные точки 7-10, но преобладающими являются данные за август месяц. Именно в этом кластере отмечены наибольшее среднее значение температуры воды и наименьшее солёности. Средняя концентрация хлорофилла «а», а также нитратов уступает и первому, и четвёртому кластеру. Среди биогенных веществ наибольшие значения наблюдаются у силикатов, наименьшие – у фосфатов. Также в этом кластере отмечено наименьшее среднее содержание растворённого кислорода.

В кластере под номером три собрались некоторые июньские данные за 2018-2020 года точек 7 – 14. Третий кластер характеризуется наименьшим средним значением температуры поверхностного слоя и наибольшими значениями солёности и почти всех исследуемых биогенных веществ (растворённого кислорода, нитратов и фосфатов) за исключением силикатов, концентрация хлорофилла «а» в воде также достаточно высока.

Большинство летних месяцев точек 11-14, расположенных севернее, в центральной части акватории и вблизи о. Колгуев, группируется в 4-ом кластере, слабо дифференцируясь по месяцам. Для четвёртого кластера средние значения температуры близки к результату третьего кластера, как и солёность. Средняя концентрация хлорофилла «а» в данном кластере наименьшая, также как нитратов и силикатов. Средние содержания растворённого кислорода и фосфатов в поверхностных водах также относительно невысоки.

Таким образом, в летние месяцы в открытой части Печорского моря было выделено четыре кластера, в которых ярко выражены географический и временной фактор в формировании исследуемых характеристик. Их можно разделить на прибрежные, где в кластерах 1 и 2 собираются точки с 7 по 10, расположенные вблизи материка, различаясь по месяцам, чисто морской (кластер 4), где собраны точки с 11 по 14, расположенные в открытой акватории моря вдалеке от материкового берега, независимо от месяца, и небольшой кластер, где сгруппировались некоторые холодные юни, в основном 2018 и 2020 гг. всех точек. Стоит отметить, что точка под номером 9 близ о. Вайгач появляется во всех четырёх кластерах, что может быть обусловлено сложной системой циркуляции вод в месте её расположения.

Аналогичная разбивка на кластеры в осенний период (рисунок 18) показала иные результаты. Осенью на расстоянии 10 выделяются три кластера, где группируются точки в соответствии со схожестью формирования в них исследуемых параметров. Средние значения характеристик в этом кластере приведены в таблице 8.

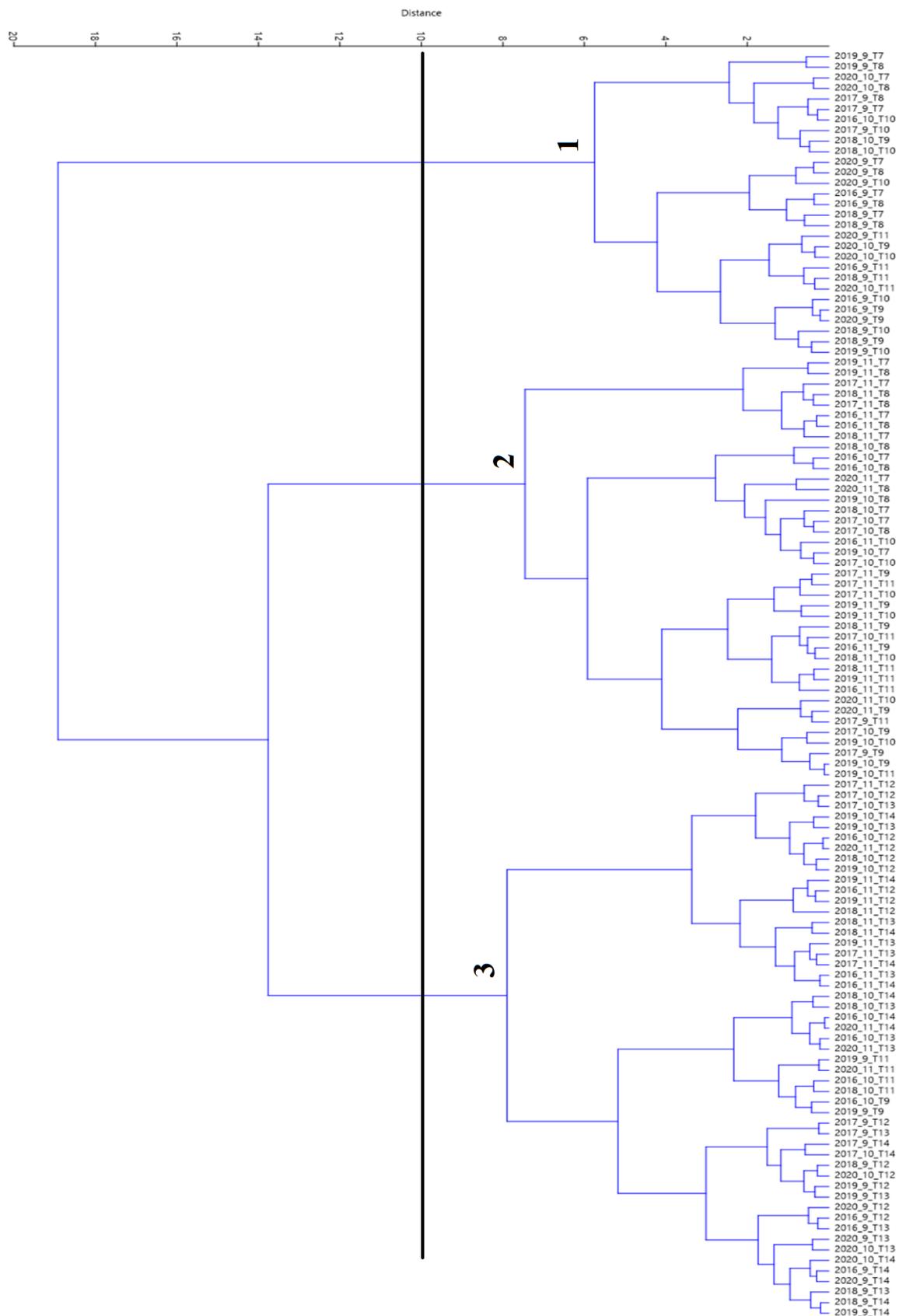


Рисунок 18. Дендрограмма разбиения точек по пространству и месяцам за осенний период (сентябрь – ноябрь) с 2016 по 2020 гг. для открытой акватории

Таблица 8. Средние значения характеристик в кластерах для осенних месяцев

Кластер	O ₂ , мг/л	NO ₃ , мг/л	PO ₄ , мг/л	Si, мг/л	Chl, мг/м ³	T, °C	S, ‰
1	10,008	0,041	0,003	0,334	0,609	8,227	29,960
2	11,567	0,129	0,013	0,321	0,472	2,602	30,702
3	10,366	0,062	0,012	0,115	0,259	2,198	32,599

В первом кластере находятся, в основном, сентябрьские значения точек 7-11 и октябрьские Точки 10. Он характеризуется относительно высоким средним значением температуры воды и низким солёности. Средняя концентрация хлорофилла «а» здесь самая высокая, по отношению к остальным кластерам. Что касается биогенных веществ, в данном кластере отмечены самые низкие значения растворённого кислорода, нитратов и фосфатов, но наибольшие силикатов.

В случае второго кластера объединяются октябрьские и ноябрьские данные вышеупомянутых точек (с 7 по 11). Во втором кластере осреднённая температура ниже, чем в первом, а солёность, наоборот, возрастает. Содержание хлорофилла «а» также уступает значению первого кластера, как и концентрация силикатов, однако, незначительно. В данном кластере отмечено наибольшее среднее значение концентрации растворённого кислорода и нитратов среди всех трёх кластеров.

Особенностью третьего кластера является тот факт, что в нём сгруппированы, в основном, точки с 12 по 14, для которых, также как и летом, в противоположность остальным точкам, менее выражена дифференциация по месяцам. Здесь наблюдаются наименьшие средние значения температуры поверхностного слоя и наибольшие значения его солёности. Концентрация хлорофилла «а» в кластере под номером 3 минимальная в сравнении с остальными кластерами, как и содержание в воде силикатов. Средние значения

остальных биогенных веществ (растворённого кислорода, нитратов и фосфатов) занимают промежуточное положение между первым и вторым кластерами. Однако стоит отметить, что средняя концентрация фосфатов в третьем кластере уступает второму немного, лишь 0,001 мг/л.

Исходя из вышеизложенного, в осенние месяца на акватории Печорского моря, также как и летом, отчётливо выражен географический фактор в формировании хлорофилла «а» и остальных исследуемых характеристик. В кластерах 1 и 2 объединяются разные месяцы точек с 7 по 11. В отличие от летнего периода, в кластеры прибрежных районов попадает Точка 11, расположенная несколько севернее Точки 10, в открытой акватории. В третьем кластере сгруппировались точки, удалённые от берега, аналогично летним результатам здесь нет больших различий по месяцам. В осенний период, также как и в летний, наблюдается присутствие точки под номером 9 в разных кластерах.

Выводы. Таким образом, по результатам корреляционного анализа было установлено, что в поверхностных водах Печорской губы концентрация хлорофилла «а» прямо зависит от содержания в слое нитратов, а обратная связь наблюдается в паре с фосфатами, растворённым кислородом и температурой воды. В открытой части акватории Печорского моря отмечается менее однородная картина связи концентрации хлорофилла «а» с другими переменными. Наиболее общими закономерностями здесь является выраженная прямая связь между содержанием хлорофилла «а» и температурой поверхностного слоя, а также между хлорофиллом «а» и солёностью. В некоторых точках открытой акватории присутствуют значимые положительные коэффициенты корреляции между содержанием хлорофилла «а» и растворённым кислородом.

При проверке линейных трендов межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла «а» в поверхностных водах на значимость было установлено, что данный вид тренда отсутствует в Печорской губе, и в большинстве точек открытой части моря (в связи с незначимостью

коэффициентов детерминации и/или регрессии). Следовательно, за исследуемый период времени на большей части акватории Печорского моря и в устьевой зоне Печорской губы не выявлено однонаправленного изменения содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое. Лишь в трёх точках открытой части морской акватории наблюдается отрицательный линейный тренд, свидетельствующий о тенденции на снижение содержания хлорофилла «а» в поверхностных водах.

Нелинейный тренд был выявлен в половине точек Печорской губы и большинстве точек открытой акватории, характеризующий смену отрицательной тенденции изменения межгодовой концентрации хлорофилла «а» (в середине 2000х гг. в Печорской губе и в начале 2010х гг. в открытой акватории Печорского моря) на положительную, более выраженную в Печорской губе.

Кластерный анализ показал сходство в формировании хлорофилла «а» с двумя биогенными веществами, нитратами и силикатами. Следовательно, от количества поступающих в воды моря нитратов, особенно в районе Печорской губы, и силикатов будет зависеть концентрация хлорофилла «а» и, соответственно, состояние фитопланктона. Разбивка среднемесячных значений по точкам открытой акватории (за последние 5 лет исследования) показала, что в летние месяцы, с июня по август, и осенние, с сентября по ноябрь, различия в формировании исследуемых характеристик, в том числе хлорофилла «а», обусловлены, в первую очередь географическим положением точек (близостью или отдалённостью от материка, степенью влияния материкового стока, системой течений). Значительных отклонений, которые могли бы быть вызваны антропогенной активностью в Печорском море, за исследованный период времени выявлено не было.

Глава 4. Пути улучшения экологической ситуации в Печорском море

Усиление антропогенного влияния на акваторию Печорского моря в последние десятилетия создаёт необходимость поиска путей решения конкретных проблем водоёма и улучшения экологической ситуации в целом. Для этого необходимо проведения комплексных мер по минимизации ущерба местным экосистемам, причиняемого основными факторами антропогенной нагрузки исследуемого региона.

Растущая добыча углеводородов и увеличение грузовых перевозок по акватории моря, а также поступление различных поллютантов с материковым стоком приводят к возникновению потребности в принятии мер, направленных на предотвращение загрязнения Печорского моря химическими соединениями, бытовым мусором, нефтью и нефтепродуктами. Суровость арктических климатических условий обуславливает необходимость решения проблемы раннего обнаружения проблемных зон, в особенности, это касается нефтяных разливов, ввиду сильной дифференциации масштабов последствий для экологии района от быстроты удаления нефтяной плёнки с поверхности моря.

Поэтому достижение высокого качества окружающей среды Печорского моря невозможно без получения полных и репрезентативных данных о состоянии его экосистем и тенденциях происходящих в них изменений. Следовательно, к одной из наиболее важных задач по улучшению состояния акватории относится создание в регионе эффективной системы экологического мониторинга. Основным механизмом решения данной проблемы является увеличение станций мониторинга состояния Печорского моря, а также модернизация уже существующих, с учётом новейших технологических разработок. Постоянный контроль и своевременная регистрация появления проблемных зон возможны только в случае

достаточного количества источников получения информации и высокого качества их работы.

В целях улучшения экологической ситуации в Печорском море необходимо внедрять инновационные методы разведки и добычи углеводородов на его шельфе, а также отгрузки и транспортировки нефти и нефтепродуктов в пределах его акватории, учитывающие суровые природно-климатические условия арктической зоны.

Для предотвращения аварийных разливов углеводородного сырья важно при эксплуатации оборудования и систем нефтедобывающей отрасли обеспечить качественную многоступенчатую защиту (дублирование защитных механизмов, двойные корпуса судов, корпуса нефтехранилищ по принципу «стакан в стакане» и т. д.). Немаловажным фактором уменьшения ущерба экосистемам Печорского моря от нефтедобывающей отрасли является автоматизация систем эксплуатации и безопасности объектов, минимизирующая возможность возникновения чрезвычайных ситуаций в связи с человеческим фактором. На законодательном уровне (федеральном или наднациональном) должен быть распространён принцип «нулевого сброса» для всех объектов, эксплуатирующихся в морях Северного Ледовитого океана, в том числе и в Печорском море. Необходимо также осуществлять всеобъемлющий контроль за соблюдением законодательства в области ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН) [50].

Улучшение качества окружающей среды в регионе Печорского моря невозможно без жёсткого контроля за рыбным промыслом. Необходимо выполнять постоянный мониторинг состояния и запасов промысловых видов, производить ежегодные оценки их численности и биомассы, с целью предотвращения перелова. Немаловажным фактором улучшения ситуации в сфере рыбной промышленности района Печорского моря является борьба с браконьерством. Для снижения объёмов незаконного вылова морских биологических ресурсов было бы целесообразно внести изменения в

соответствующие статьи Уголовного Кодекса РФ с целью ужесточения наказания за преступления такого рода.

Также в целях сохранения биологического разнообразия морских и прибрежных экосистем Печорского моря целесообразно выделения наиболее уязвимых с экологической точки зрения районов, в границах которых были бы созданы новые особо охраняемые природные территории (ООПТ). В таком случае ввод ограничений на осуществление здесь хозяйственной деятельности способствовал бы защите обитающих в пределах этих районов видов флоры и фауны, предотвращал деградацию местных экосистем. Кроме того, регулярные исследования особо охраняемых природных территорий и акваторий могут служить важным источником информации об экологическом состоянии Печорского моря [51].

Поскольку сток реки Печора относится к наиболее значимым факторам загрязнения акватории Печорского моря, улучшение экологической обстановки моря непосредственно связано с повышением качества вод крупнейшей из впадающих в него рек.

Для решения данной проблемы на территории водосбора реки Печора, Печорского и Тимано-Печорского каменноугольных бассейнов и Тимано-Печорской газонефтяной провинции, также должна функционировать эффективная сеть экологического мониторинга состояния окружающей среды. На промышленных объектах необходимо совершенствовать технологий очистки стоков, использовать новейшие технологии при выполнении геологоразведочных работ и работ по добычи полезных ископаемых, контролировать соблюдение предприятиями предписанных норм по эксплуатации промышленных объектов. Особое внимание стоит уделить предотвращению аварийных разливов нефти и оперативности их ликвидации в случае возникновения.

Отдельно стоит выделить прибрежную зону Печорского моря, так как её географическое положение на границе моря и суши, где увеличиваются конфликтные ситуации с точки зрения столкновения интересов различных

потребителей, обуславливает необходимость её выделения как отдельного объекта управления [52]. Для решения проблемы сохранения окружающей среды и развития хозяйственной деятельности в пределах прибрежной зоны Печорского моря необходимо разработать комплексную программу по её изучению и рациональному использованию на различных законодательных уровнях, в том числе на уровне субъектов РФ, в границах которой она находится (Ненецкого автономного округа и Архангельской области) с применением межотраслевого подхода, позволяющего рассмотреть все возможные аспекты взаимодействия между природными системами и экономическим развитием территории, также учитывающего экологическую безопасность прибрежной зоны [53].

Заключение

В результате исследования изменчивости экологической обстановки в Печорском море были даны характеристики экономико-географического положения моря, его природно-ресурсного потенциала и современного хозяйственного использования акватории, описаны основные угрозы окружающей среде, неразрывно связанные с антропогенным воздействием, дана оценка динамики эколого-химического состояния акватории Печорского моря и Печорской губы, а также приведены возможные пути улучшения экологической ситуации.

Таким образом, было установлено, что район Печорского моря играет ключевую роль в обеспечении экономического развития Арктической зоны России, в основном, за счёт добычи нефти на его континентальном шельфе, транспортировки сырья с территорий Тимано-Печорской нефтегазовой провинции, а также транзита грузов по акватории Северного морского транспортного коридора и обеспечения бесперебойной эксплуатации Северного морского пути.

Однако, активное хозяйственное освоение района Печорского моря может иметь значительные последствия для окружающей среды, приводя к значительному нарушению нормального функционирования местных экосистем. Следовательно, возникает необходимость исследования изменчивости эколого-химического состояния водоёма для определения уровня оказываемой антропогенной нагрузки в разный период времени (в работе с 1993 по 2020 гг.) на акваторию моря и его заливы. В ходе выполнения исследования была проанализирована динамика изменения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое на основании данных в 14 точках (в Печорской губе и открытой акватории Печорского моря), как основного показателя биомассы фитопланктона, использующегося при оценке

экологического состояния водного объекта, и его зависимость от содержания биогенных элементов.

В целом, в районе Печорского моря наблюдается стабильная ситуация. Ни в Печорской губе, ни в открытой морской акватории не было выявлено положительного линейного тренда межгодовых значений хлорофилла «а» в поверхностном слое, свидетельствующего бы о значительном повышении биологической продуктивности района Печорского моря и ухудшение качества воды. Однако, в половине точек, находящихся в Печорской губе, и большинстве точек открытой акватории отмечено присутствие нелинейного тренда, характеризующего смену отрицательной тенденции изменения концентрации хлорофилла «а» в поверхностных водах на положительную, произошедшую в середине 2000х гг. и начале 2010х гг. соответственно. В трёх точках Печорского моря наблюдается отрицательный линейный тренд, свидетельствующий о снижении межгодовых значений хлорофилла «а». Тем не менее данное обстоятельство может также означать, что соответствующие участки акватории Печорского моря подвержены загрязнению нефтепродуктами, учитывая, что эти точки расположены на участках наиболее интенсивного судоходства в Печорском море, а нефтяная плёнка препятствует проникновению света в водную толщу и, следовательно, фотоокислению органических веществ.

Что касается зависимости концентрации хлорофилла «а» от биогенных веществ, по корреляционному анализу было установлено, что в Печорской губе значения хлорофилла «а» находятся в прямой зависимости от концентрации в поверхностном слое нитратов. Точки, рассредоточенные по открытой акватории, показали менее однородные результаты.

По кластерному анализу (на основании сформированных стандартизированных рядов по всем точкам) было подтверждено, что нитраты являются лимитирующим фактором формирования фитопланктонного сообщества в поверхностном слое Печорского моря. К тому же с помощью данного анализа отмечено существенное влияние силикатов на формирование

хлорофилла «а» в водах Печорского моря, а также значимое воздействие температуры поверхностного слоя на процесс роста фитопланктона. В летние и осенние месяцы различия в формировании хлорофилла «а» на открытой акватории моря обусловлены, в основном, географическим положением.

Таким образом, несмотря на довольно активное освоение района Печорского моря, по оценке изменчивости содержания в поверхностном слое хлорофилла «а», основного показателя биомассы фитопланктона, использующегося при оценке экологического состояния водоёма, здесь не отмечается заметного ухудшения качества воды, приводившего бы к серьёзным структурным преобразованиям местных экосистем. Однако, сменившаяся за последние 10 – 15 лет, с ростом добычи углеводородов на континентальном шельфе и Тимано-Печорской нефтегазовой провинции, а также с увеличением транспортной активности на акватории юго-восточной части Баренцева моря, тенденция на рост концентрации хлорофилла «а» в поверхностных водах обуславливает необходимость поиска оптимальных путей минимизации ущерба природным комплексам и проводить регулярный мониторинг экологического состояния, как непосредственно акватории Печорского моря, его заливов (губ), так и прибрежных территорий, не менее уязвимых к усилению антропогенного воздействия.

Список использованных источников

1. Мискевич И.В. Оценка влияния хозяйственной деятельности в районе острова Варандей на геоэкологическую ситуацию в Печорском море / И.В. Мискевич, О.В. Деменков // Успехи современного естествознания. 2021. № 5. С. 88-93.
2. Печорское море [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://old.bigenc.ru/geography/text/3137640?ysclid=ltq2t5o93298271515>
3. Карты России [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://mapsrf.ru/>
4. Хлебникова О.А. Новые данные о признаках максимального распространения последнего оледенения в акватории Печорского моря / О.А. Хлебникова, Т.Ю. Репкина, Я.Е. Терехина // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. 2022. № 9. С. 285-290.
5. Трубкин И.П. Модельные расчеты динамики наносов в Печорском море / И.П. Трубкин, И.А. Немировская // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 17-24.
6. Павлидис Ю.А. Печорское море: прошлое, настоящее и будущее / Ю.А. Павлидис, С.Л. Никифоров, С.А. Огородов, Г.А. Тарасов // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 927-939.
7. Морские экосистемы и сообщества в условиях современных климатических изменений / [отв. ред. Г. Г. Матишов]; Мурман. мор. биол. ин-т КНЦ РАН. — СПб.: Реноме, 2014. — 456 с.
8. Печорское море. Опыт системных исследований. М.: Издательская группа "Море", 2003. 486 с.
9. Карта течений [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://kmns.ru/blog/2023/11/08/4201/>

10. Фаляхова П.Я. Использование данных ДЗЗ для выявления наиболее опасного ледового периода в акватории МЛСП «Приразломная» / П.Я. Фаляхова, Л.И. Осадчая // В сборнике: Современные технологии: проблемы и перспективы. сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных. Севастополь, 2024. С. 420-424.

11. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. – М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 214. – 608 с.

12. В.А. Спиридонов. Глава 6. Приоритетные для охраны районы в морях российской Арктики: детальное описание В книге: пространственное планирование сохранения биоразнообразия морей российской Арктики. / Спиридонов В.А., Соловьёв Б.А., Онуфрениа И.А. // Москва, 2020. С. 134-303.

13. Метельский А.А. К флоре макроводорослей Печорского моря / А.А. Метельский // Вестник Южного научного центра РАН. 2014. Т. 10. № 1. С. 50-54.

14. Отчёт о выполнении работ по моделированию разливов нефти при различных сценариях развития аварийных и чрезвычайных ситуаций для разработки Плана по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (ПЛРН) и оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) Варандейского нефтяного отгрузочного терминала [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://vnipimn.ru/upload/iblock/620/620605d7c102ac3998e9d6d82bc30cd0.pdf>

15. Соловьева М.А. Признаки газонасыщенности придонных отложений Печорского моря по сейсмическим данным в различных диапазонах частот / М.А Соловьева, И.А. Буланова, Я.Е. Терёхина // В сборнике: ГеоЕвразия-2024. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес. Труды VII Международной геолого-геофизической конференции. Тверь, 2024. С. 61-66.

16. Печорское море. Системные исследования (гидрофизика, гидрология, оптика, биология, химия, геология, экология, социэкономические проблемы) М.: Издательство «МОРЕ». 2003. 502с.

17. Ишкулова Т.Г. Гидрохимические исследования в Печорском море (июль 2002 года) / Т.Г. Ишкулова, Д.Г. Ишкулов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2016. Т. 19. № 1-2. С. 278-285.

18. Скибинский Л.Э. СОВРЕМЕННОЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ И УСТЬЕВЫХ АКВАТОРИЙ БЕЛОГО И ПЕЧОРСКОГО МОРЕЙ автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук. Москва, 2003

19. Бузин И.В. Сжатия ледяного покрова в Печорском море: природное явление и его влияние на морские операции / И.В. Бузин, С.В. Клячкин, С.В. Фролов // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 4. С. 500-512.

20. РД 52.24.620-2000. Охрана природы. Гидросфера. Организация и функционирование подсистемы мониторинга антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. - 39 с.

21. Бульон В.В. Хлорофилл А как показатель биомассы фитопланктона / В.В. Бульон // Вода: химия и экология. 2017. № 8 (110). С. 39-47.

22. Хлорофиллы [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/khlorofilly-647b73>

23. Темердашев З.А. Экстракционно-флуориметрическое определение хлорофилла "а" в природных водах / З.А. Темердашев, Л.Ф. Павленко, Я.С. Ермакова, И.Г. Корпакова, Б.Д. Елецкий // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 3. С. 323-333.

24. Стельмах Л.В. Влияние адаптации фитопланктона на распределение его биомассы и концентрации хлорофилла «а» в поверхностном

слое Черного моря / Л.В. Стельмах // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 1 (35). С. 106-114.

25. About Copernicus [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>

26. Marine [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/marine>

27. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник, – издание 2, испр. и доп. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 424 с.

28. Сошникова Л.А. Многомерный статистический анализ в экономике / В.Н. Тамашевич, Г. Уебе, М. Шефер – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 598 с.

29. Кулаковская В.А. К вопросу об экономических последствиях конфликтов природопользования в прибрежной зоне Балтийского моря / В.А. Кулаковская, А.Ю. Санин // Государственное управление. Электронный вестник. 2022. № 90. С. 126-142.

30. Н.А Еремин. Особенности разработки и экономической оценки Приразломного арктического месторождения / Еремин Н.А., Богаткина Ю.Г., Лындин В.Н. // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2020. № 2 (182). С. 20-24.

31. М.Г. Губайдуллин. Оценка вероятности загрязнения береговой зоны Печорского моря при аварийном разливе нефти / Губайдуллин М.Г., Березкин В.А., Крайнева О.В. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2020. № 3 (294). С. 19-25.

32. Приразломное нефтяное месторождение (шельф Печорского моря) [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/141648-prirazlomnoe-neftyanoie-mestorozhdenie-shelf-pechorskogo-morya/?bitrix_include_areas=Y

33. К.А. Бородин. Перспективы освоения континентального шельфа Баренцева и Печорского морей / Бородин К.А.// Север и рынок: формирование экономического порядка. 2018. № 1 (57). С. 67-73.
34. Разлив нефти в Республике Коми в 2021 г. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://innoter.com/articles/razliv-nefti-v-respublike-komi-v-2021-g/>
35. Кузьмин В.В. МЛСП "Приразломная" - уникальная нефтедобывающая платформа / В.В. Кузьмин, М.С. Варакин // Морской вестник. 2020. № S1 (14). С. 31-33.
36. Информационно-аналитический портал Neftegaz.RU [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://neftegaz.ru/?ysclid=m476eocsgd140467920>
37. 25 млн тонн нефти добыла Газпром нефть на арктическом шельфе, но это не предел [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/790185-25-mln-tonn-nefti-dobyla-gazprom-neft-na-arkticheskom-shelfe-no-eto-ne-predel-video/>
38. Карты ArcGIS [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html>
39. Пономаренко И.А. Пространственные особенности танкерных морских перевозок в Арктической зоне России / И.А. Пономаренко // Успехи современного естествознания. 2022. № 8. С. 59-64.
40. Ассоциация морских торговых портов [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.morport.com/>
41. Морские вести России. Порт Нарьян-Мар с терминалом Амдерма нужен Севморпути [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://morvesti.ru/analitika/1688/82402/?ysclid=m0f8ybxg34249472037>
42. Доставка грузов Нарьян-Мар. Грузоперевозки в морской порт Нарьян-Мар [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://belomortrans.ru/regions/szfo-nao-naryanmar?ysclid=m0fe17v9ox966827718>

43. Вехи большого пути. Северный морской путь и его главные порты [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://arctic-russia.ru/article/vekhi-bolshogo-puti/?ysclid=m05qgcy8w548934427>
44. Развитие портов российской Арктики [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://morproekt.ru/attachments/article/1116/arctic_projects_2020_plus.pdf
45. Вести морского Петербурга №2/ 2023. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://morspb.ru/assets/files/archive/2023/vesti-2-2023.pdf>
46. Информационный журнал PortNews [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://portnews.ru/>
47. Е.А. Кобелев. Биологические основы промыслового использования рыбных запасов Юго-Восточной части Баренцева моря: на примере наваги, полярной камбалы, корюшки: автореферат дис. ... канд. биол. наук.: 03.00.10 / Всерос. НИИ рыбного хозяйства и океанографии. — Москва, 2001. — 24 с.
48. Карта рыбного промысла в Печорском море [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://fishbiosystem.ru/Map/Barents%20Sea%207f%20map.jpg>
49. Спиридонов В.А. Глава 3. Обзор хозяйственной деятельности в Российской Арктике и связанных с ней аспектов сохранения морского разнообразия и ресурсов / В.А. Спиридонов, М.С. Стишов, А.С. Амирагян // В книге: пространственное планирование сохранения биоразнообразия морей Российской Арктики. Москва, 2020. С. 60-97.
50. Агарков С.А. Влияние освоение региональных ресурсов углеводородов на экологическое состояние Печорского моря / С.А. Агарков, Д.А. Матвишин // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2019. № 2 (116). С. 58-67.
51. Корнеев О.Ю. ООПТ: Первый российский опыт применения процедур морского пространственного планирования в российской части

Баренцева моря / О.Ю. Корнеев // Арктика и инновации. 2023. Т. 1. № 1. С. 18-31.

52. Рыженков А.А. Проблемы делимитации и принципы управления прибрежными территориями Арктической зоны Российской Федерации / А.А. Рыженков // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2020. № 9-1. С. 120-129.

53. Плинк Н.Л., Гогоберидзе Г.Г. Политика действий в прибрежной зоне. – СПб.: изд. РГГМУ, 2003. - 226 с.

Приложение А

Графики динамики среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. с нанесёнными линейным и нелинейными трендами, их уравнениями и коэффициентами детерминации/корреляционным отношением.

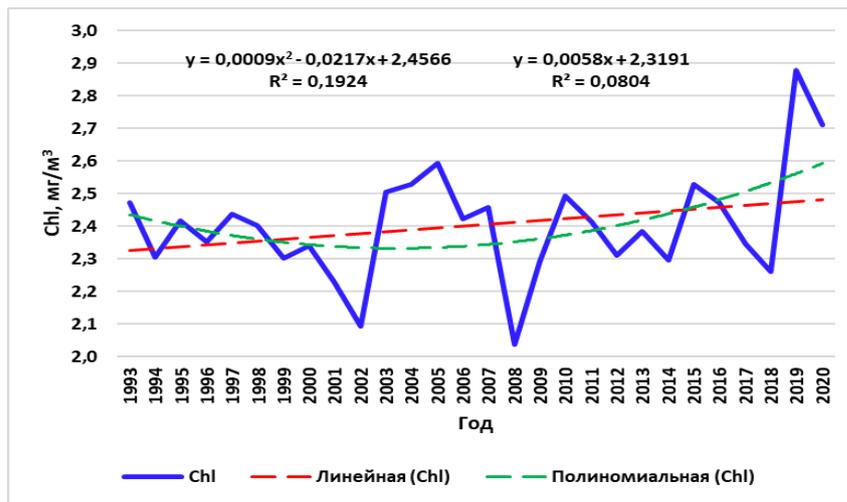


Рисунок А.1. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 1)

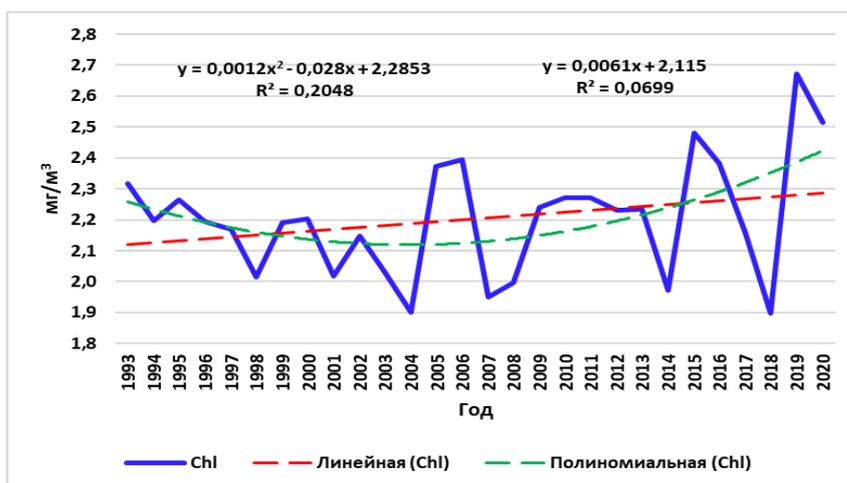


Рисунок А.2. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 2)

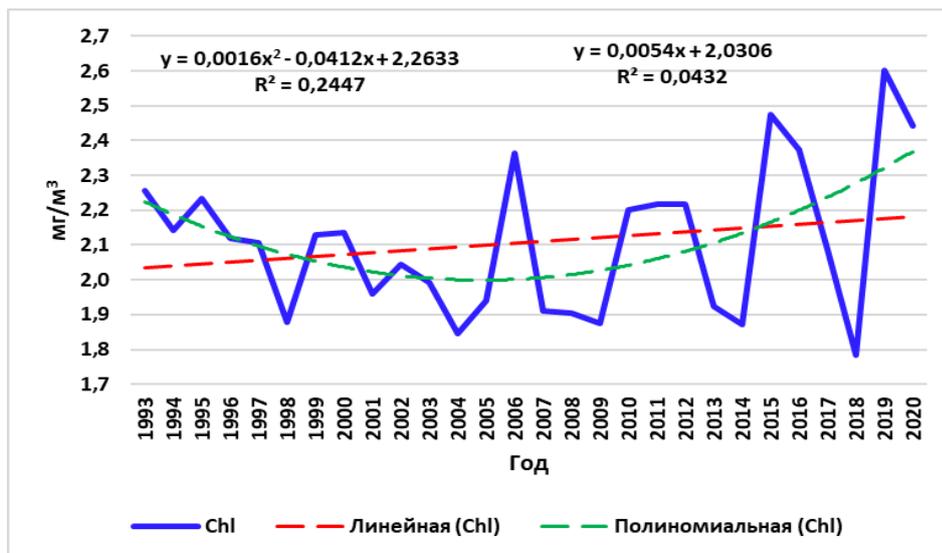


Рисунок А.3. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 3)

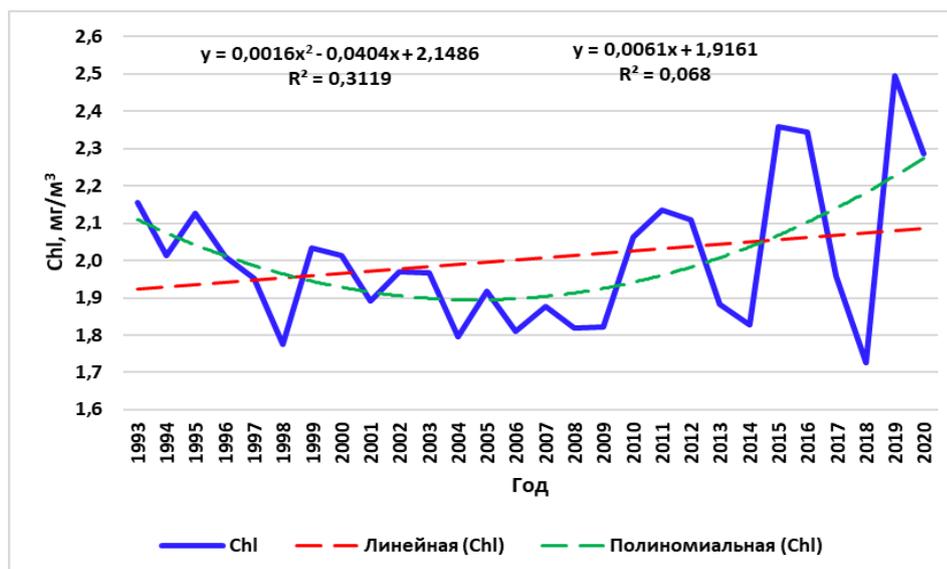


Рисунок А.4. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 4)

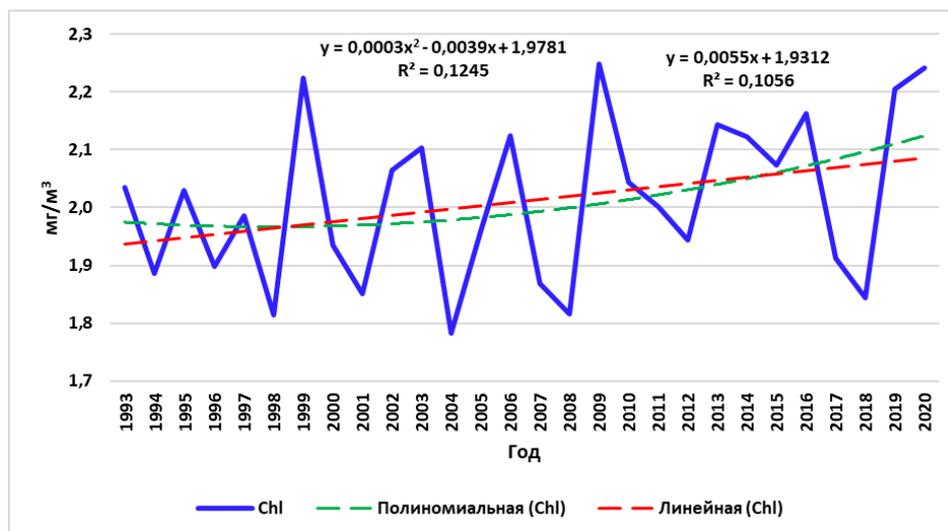


Рисунок А.5. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 5)

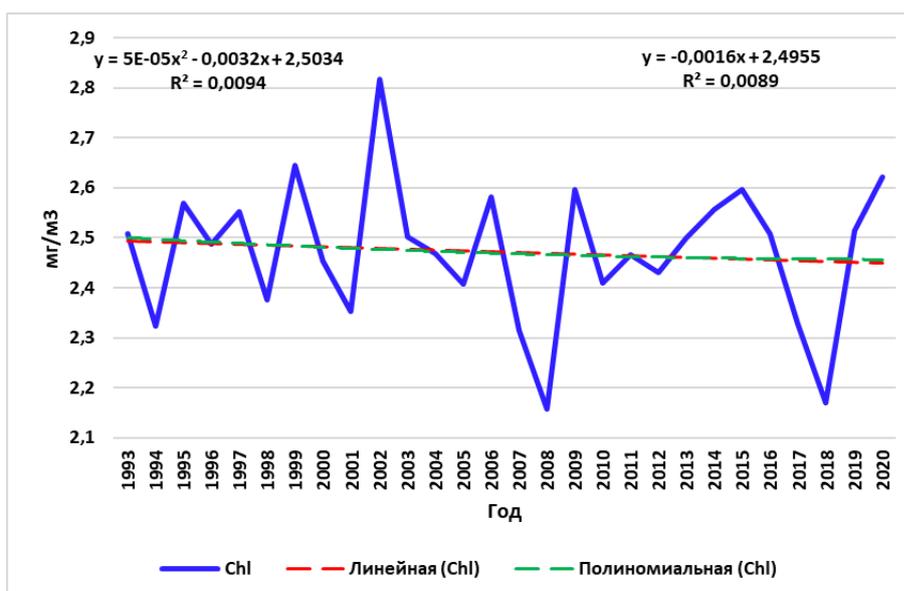


Рисунок А.6. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 6)

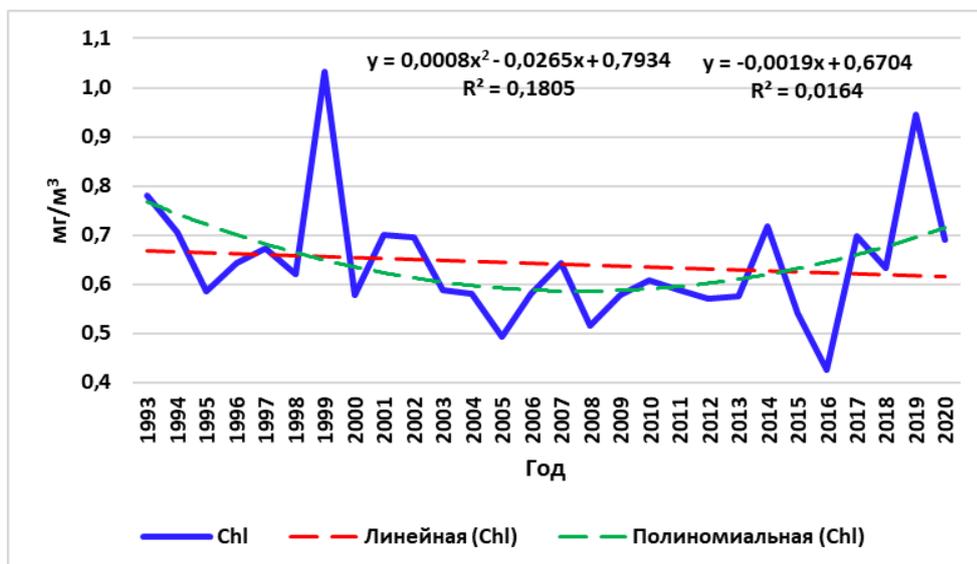


Рисунок А.7. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 7)

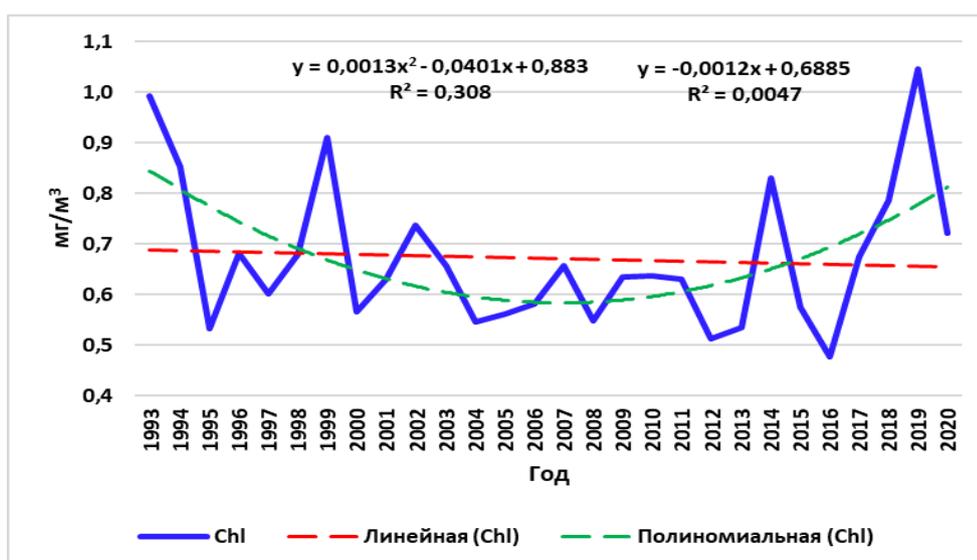


Рисунок А.8. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 8)

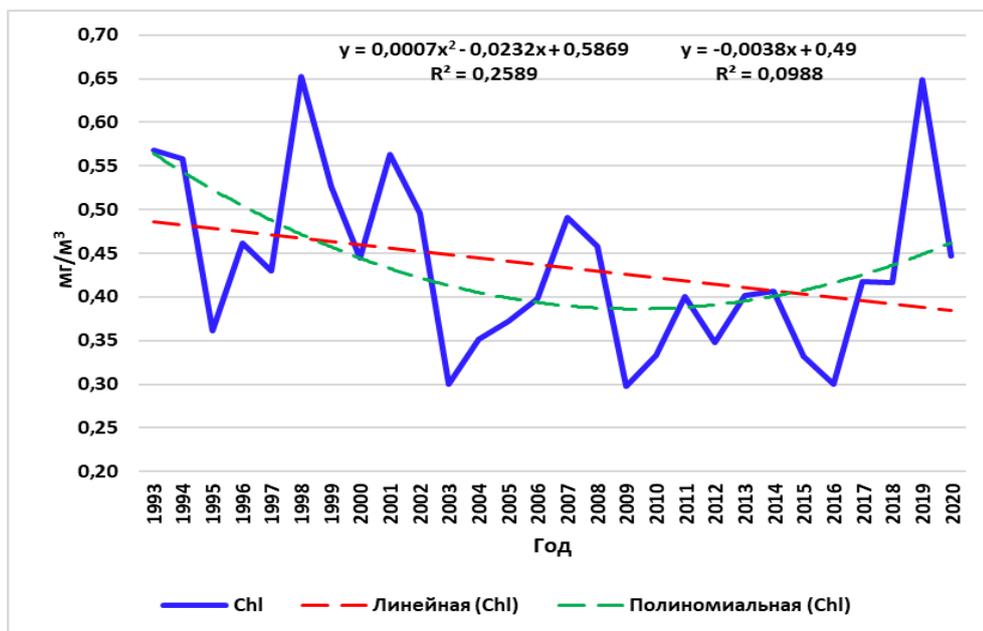


Рисунок А.9. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 9)

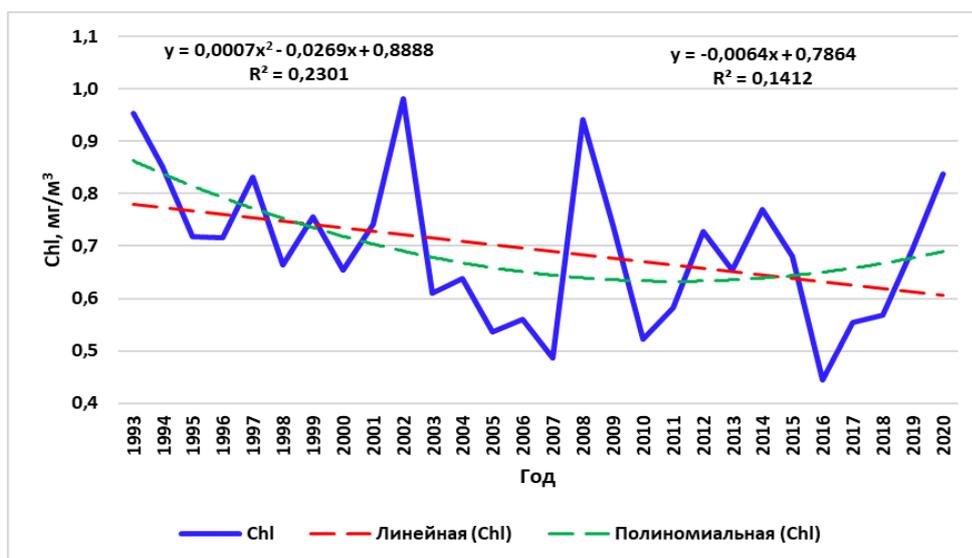


Рисунок А.10. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 10)

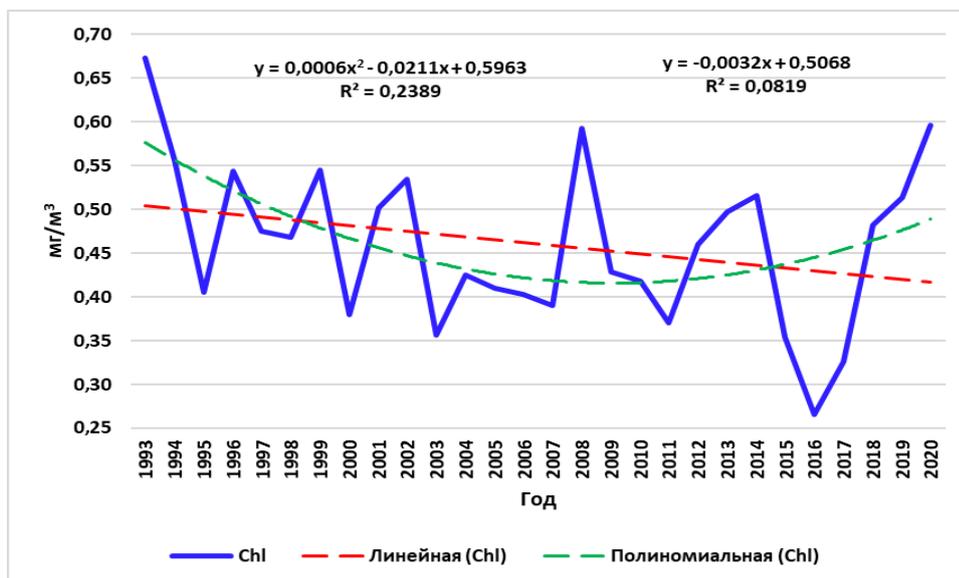


Рисунок А.11. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 11)

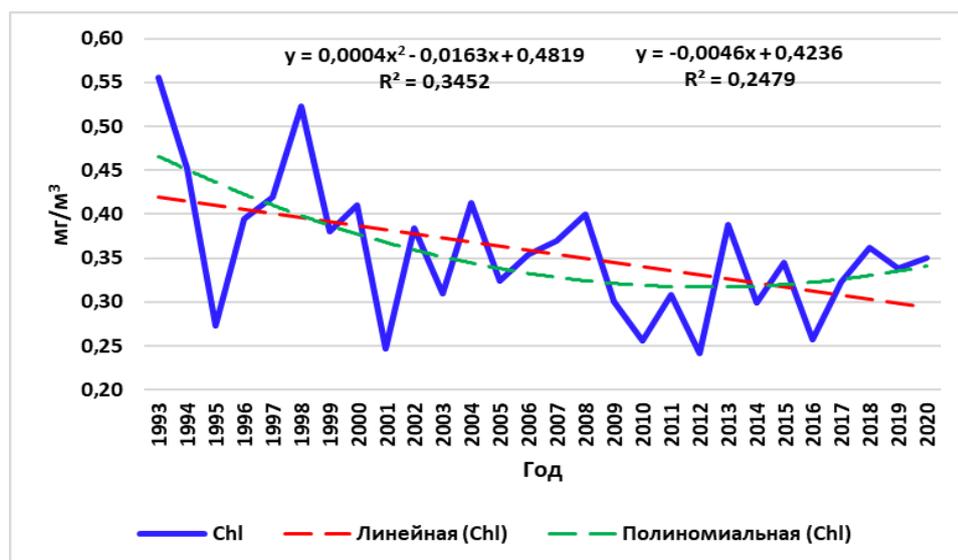


Рисунок А.12. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 12)

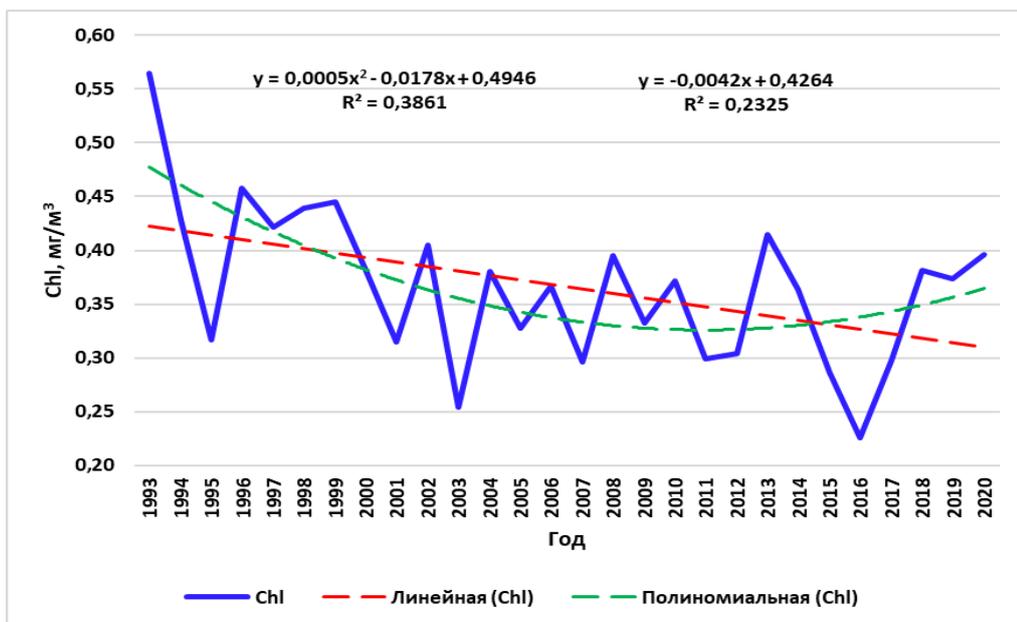


Рисунок А.13. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 13)

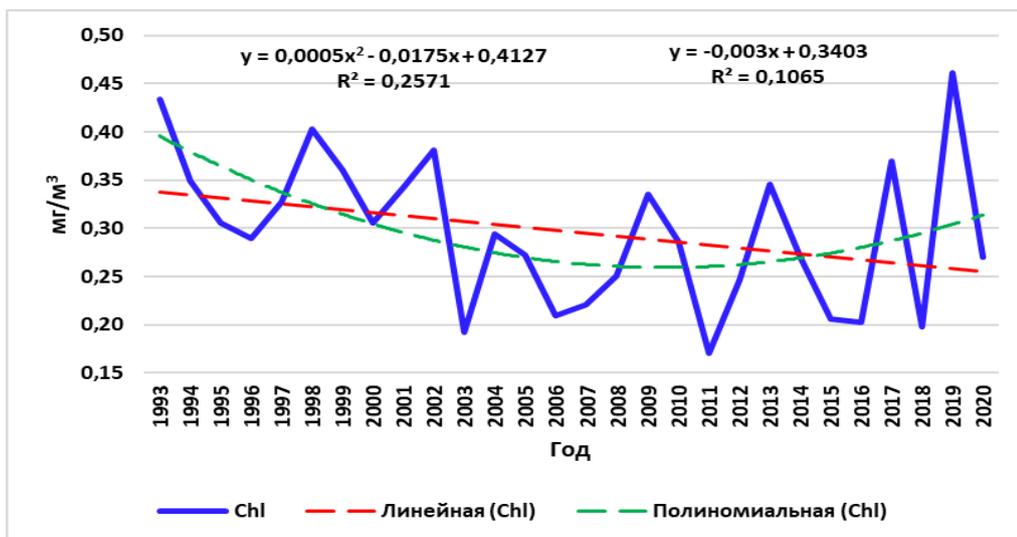


Рисунок А.14. Динамика среднегодового содержания хлорофилла «а» за период с 1993 по 2020 гг. (Точка 14)

Приложение Б

Корреляционные матрицы связи исследуемых переменных между собой
(цветом выделены значимые коэффициенты корреляции).

Таблица Б.1. Корреляционная матрица для Точки 1

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,074	1					
PO ₄	0,807	0,347	1				
Si	0,098	0,066	0,231	1			
Chl	-0,567	0,323	-0,416	-0,004	1		
T	-0,437	-0,708	-0,369	0,295	0,102	1	
S	-0,080	0,150	-0,029	-0,331	0,016	-0,685	1

Таблица Б.2. Корреляционная матрица для Точки 2

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,027	1					
PO ₄	0,781	0,409	1				
Si	0,264	0,347	0,462	1			
Chl	-0,588	0,305	-0,417	-0,090	1		
T	0,398	-0,547	0,427	0,306	-0,380	1	
S	-0,091	0,098	-0,006	-0,332	0,018	0,297	1

Таблица Б.3. Корреляционная матрица для Точки 3

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	-0,020	1					
PO ₄	0,752	0,420	1				
Si	0,259	0,466	0,499	1			
Chl	-0,606	0,292	-0,426	-0,076	1		
T	0,587	-0,394	0,602	0,282	-0,449	1	
S	-0,100	0,074	0,011	-0,301	0,021	0,281	1

Таблица Б.4. Корреляционная матрица для Точки 4

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	-0,053	1					
PO ₄	0,729	0,421	1				
Si	0,141	0,584	0,416	1			
Chl	-0,645	0,266	-0,444	0,035	1		
T	0,698	-0,281	0,714	0,149	-0,496	1	
S	-0,106	0,055	0,047	-0,269	0,015	0,402	1

Таблица Б.5. Корреляционная матрица для Точки 5

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,131	1					
PO ₄	0,766	0,453	1				
Si	-0,159	0,625	0,007	1			
Chl	-0,583	0,295	-0,397	0,467	1		
T	-0,505	-0,635	-0,419	0,115	0,161	1	
S	-0,081	0,039	0,051	-0,210	0,003	-0,614	1

Таблица Б.6. Корреляционная матрица для Точки 6

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,086	1					
PO ₄	0,767	0,331	1				
Si	-0,411	0,509	-0,292	1			
Chl	-0,598	0,374	-0,459	0,596	1		
T	0,201	-0,573	0,406	-0,296	-0,323	1	
S	-0,068	0,139	0,036	-0,079	0,037	-0,050	1

Таблица Б.7. Корреляционная матрица для Точки 7

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,545	1					
PO ₄	0,534	0,332	1				
Si	-0,084	0,465	-0,406	1			
Chl	-0,076	-0,203	-0,053	-0,016	1		
T	-0,766	-0,602	-0,672	0,161	0,099	1	
S	0,013	-0,206	0,365	-0,370	0,103	-0,614	1

Таблица Б.8. Корреляционная матрица для Точки 8

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,387	1					
PO ₄	0,607	0,312	1				
Si	-0,120	0,508	-0,328	1			
Chl	0,115	-0,092	0,064	-0,092	1		
T	-0,696	-0,520	-0,661	0,274	-0,069	1	
S	-0,020	-0,244	0,278	-0,451	0,115	-0,607	1

Таблица Б.9. Корреляционная матрица для Точки 9

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,690	1					
PO ₄	0,586	0,618	1				
Si	0,040	0,243	-0,329	1			
Chl	0,228	-0,049	0,148	-0,184	1		
T	-0,645	-0,427	-0,243	0,017	-0,147	1	
S	0,180	0,032	0,443	-0,319	0,157	-0,492	1

Таблица Б.10. Корреляционная матрица для Точки 10

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,381	1					
PO ₄	0,598	0,102	1				
Si	-0,129	0,700	-0,357	1			
Chl	0,020	0,362	-0,120	0,367	1		
T	-0,575	-0,597	-0,308	-0,190	-0,118	1	
S	0,087	0,029	0,292	-0,139	0,151	-0,629	1

Таблица Б.11. Корреляционная матрица для Точки 11

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,508	1					
PO ₄	0,583	0,21	1				
Si	-0,089	0,59	-0,377	1			
Chl	0,096	0,09	-0,009	0,094	1		
T	0,084	-0,39	0,419	-0,433	-0,134	1	
S	0,135	-0,04	0,396	-0,221	0,154	0,208	1

Таблица Б.12. Корреляционная матрица для Точки 12

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,613	1					
PO ₄	0,607	0,783	1				
Si	0,077	0,135	-0,269	1			
Chl	0,272	-0,133	-0,010	0,058	1		
T	-0,083	0,326	0,482	-0,258	-0,292	1	
S	0,253	0,114	0,414	-0,128	0,209	0,310	1

Таблица Б.13. Корреляционная матрица для Точки 13

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,615	1					
PO ₄	0,589	0,552	1				
Si	0,023	0,397	-0,317	1			
Chl	0,273	0,042	0,033	0,067	1		
T	0,336	0,365	0,779	-0,348	-0,354	1	
S	0,219	0,037	0,400	-0,172	0,219	0,469	1

Таблица Б.14. Корреляционная матрица для Точки 14

<i>r</i>	O ₂	NO ₃	PO ₄	Si	Chl	T	S
O ₂	1						
NO ₃	0,721	1					
PO ₄	0,613	0,629	1				
Si	0,244	0,556	-0,092	1			
Chl	0,356	0,039	0,037	0,111	1		
T	0,348	0,460	0,688	-0,124	-0,231	1	
S	0,331	0,094	0,285	-0,371	0,116	0,175	1