МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Анализ интегральной экологической уязвимости прибрежных зон морей РФ»

Исполнитель Маслова Мария Георгиевна

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

Ерёмина Татьяна Рэмовна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2025

Санкт–Петербург

2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
Глава 1. Общее описание района 6
1.1. Физико-географическое описание района 6
1.2. Биологические компоненты экосистемы Баренцева моря. 12
1.3. Особо охраняемые природные территории Баренцева моря 25
1.4. Основные источники нефтяного загрязнения Баренцева моря 32
1.4.1. Факторы поведения нефти при разливах и экологические последствия 32
1.4.2. Антропогенные источники загрязнения 34
1.4.3. Пространственная динамика нефтяного загрязнения прибрежных зон Баренцева моря 36
Глава 2. Методы и материалы исследования 42
2.1. Понятие уязвимости экосистем 42
2.2. Материалы исследования 44
2.3. Методы оценки интегральной экологической уязвимости 45
Глава 3. Результаты исследования 49
3.1. Анализ интегральной уязвимости Баренцева моря от нефтяного загрязнения 56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 64
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 67

ВВЕДЕНИЕ

Исследование интегральной экологической уязвимости прибрежных морских зон к различным видам загрязнений стало одним из важнейших направлений в современной экологии, особенно в контексте возрастающего промышленного освоения арктических регионов. Данная работа рассматривает вопросы комплексной оценки того, насколько прибрежные морские экосистемы могут пострадать от различных воздействий, используя для этого подходы, которые позволяют учесть сразу несколько факторов и компонентов экосистем. Для проведения этого исследования было выбрано Баренцево море, что обусловлено рядом особенностей данной акватории, которые делают её отличным примером для разработки методов оценки экологической уязвимости арктических морских систем.

Данная работа посвящена исследованию интегральной экологической уязвимости прибрежных зон Баренцева моря к нефтяному загрязнению. Баренцево море представляет собой уникальную арктическую экосистему, находящуюся на границе тёплых атлантических и холодных арктических вод, что обуславливает её особые климатические и биологические характеристики. Несмотря на относительную чистоту по сравнению с южными морями, экосистема Баренцева моря испытывает возрастающую антропогенную нагрузку, связанную с активизацией добычи и транспортировки нефти и газа в Арктическом регионе. Разработка методологии интегральной оценки экологической уязвимости прибрежных зон к нефтяному загрязнению является критически важной задачей для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития арктических морских экосистем.

Актуальность исследования обусловлена несколькими ключевыми факторами современного состояния Баренцева моря и перспектив его освоения. Баренцево море является самым продуктивным водоемом на севере России. Экосистема моря характеризуется относительно короткими

пищевыми цепями, что может способствовать низкой устойчивости всей экосистемы к неблагоприятным факторам [19].

Нефтяное загрязнение представляет одну из наиболее серьёзных экологических угроз для Баренцева моря. Основными источниками поступления нефтепродуктов являются разработка месторождений нефти и газа в акватории, транспортировка нефтепродуктов, которая может вызывать аварийные разливы, а также поступление загрязнений через систему Гольфстрима [32].

Морские экосистемы северных широт особенно уязвимы к нефтяному загрязнению, поэтому аварийные разливы будут иметь здесь катастрофические последствия. В связи с этим особенно актуально создание карт уязвимости в Арктическом регионе, где ведётся добыча и активно развивается транспортировка нефти и нефтепродуктов по Северному морскому пути.

Объектом исследования являются прибрежные зоны Баренцева моря, как компоненты морской экосистемы, подверженные воздействию нефтяного загрязнения. Эти зоны характеризуются высоким биологическим разнообразием и концентрацией различных экологических групп организмов, включая зоо- и фитопланктона, зообентос, морских птиц, млекопитающих и ихтиофауну.

Предметом исследования является интегральная экологическая уязвимость прибрежных экосистем Баренцева моря к нефтяному загрязнению. Интегральная уязвимость региона определяется как результат суммирования уязвимости территории или акватории по отдельным группам, с учётом их индивидуальной чувствительности к воздействиям, способности к восстановлению, пространственного и сезонного распределения.

Цель работы состоит в оценке уязвимости прибрежных зон Баренцева моря от нефтяного загрязнения с учетом сезонной изменчивости экосистемы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Охарактеризовать физико-географические и биологические особенности Баренцева моря
2. Выполнить анализ уровня загрязненности исследуемых районов
3. Адаптировать методы оценки экологической уязвимости к рассматриваемой акватории
4. Выполнить построения карт интегральной экологической уязвимости прибрежных зон Баренцева моря
5. Провести анализ полученных результатов.

Решение поставленных задач позволит создать научную основу для оценки и минимизации экологических рисков при освоении нефтегазовых ресурсов Баренцева моря.

Глава 1. Общее описание района

1.1. Физико-географическое описание района

Баренцево море (рис. 1.1) – одно из важнейших окраинных морей Северного Ледовитого океана, расположенное на северо-западе России и частично Норвегии. Его площадь составляет около 1424 тыс. км², объем 316 тыс. км³. Море ограничено с юга северным побережьем Европы, включая Кольский полуостров, с востока – архипелагами Новой Земли и Земли Франца-Иосифа, с запада – островами Шпицберген и Медвежий. На западе оно граничит с Норвежским морем, на юге – с Белым морем, а на востоке – с Карским морем. Южная часть моря носит название Печорское море [11, 26].

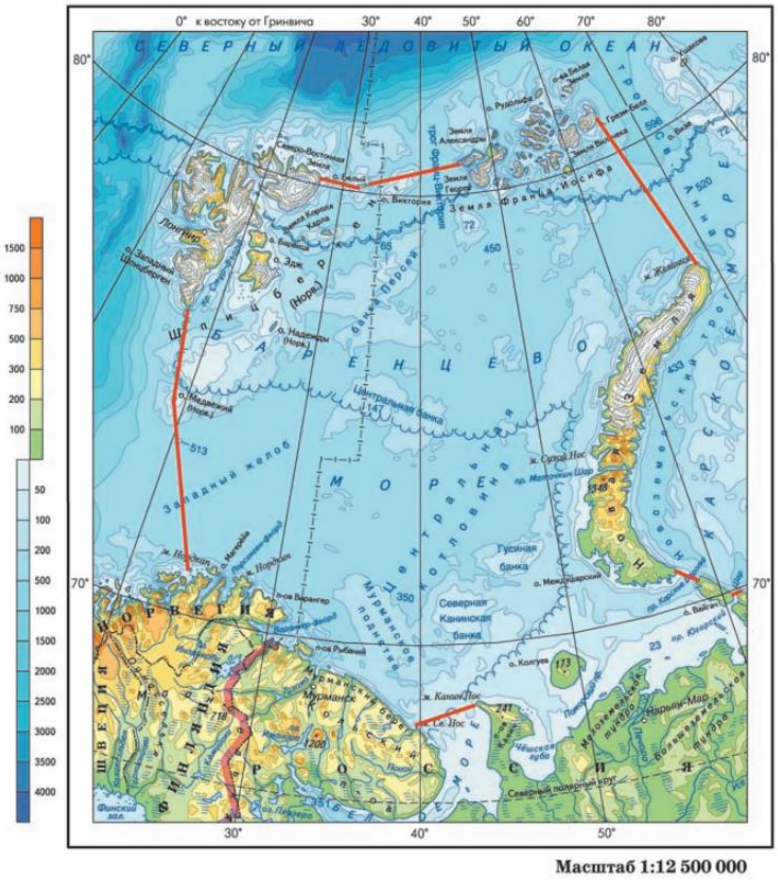

Рисунок 1.1 – Физическая карта Баренцева моря [26].

Берега Баренцева моря преимущественно фьордового типа, особенно на западном и юго-западном побережье, где расположены крупные заливы и

фьорды – Порсангер-фьорд, Варангер-фьорд, Мотовский и Кольский заливы [4, 26]. Восточные берега более низкие и слабо изрезанные, с крупными мелководными заливами – Чёшская губа, Печорская губа (Печорское море), Хайпудырская губа. В море сравнительно мало островов, крупнейший – Колгуев, а также расположены архипелаги Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля [11].

Дно Баренцева моря расположено на обширном континентальном шельфе с глубинами преимущественно от 100 до 350 метров. Средняя глубина моря составляет около 220 метров, максимальная – 600 метров в западном желобе у острова Медвежий. Рельеф дна представляет собой сочетание подводных возвышенностей, таких как Центральная возвышенность и Персея (глубина около 50–60 метров), а также глубоких впадин – Центральная впадина (до 386 метров), желобов Западный (около 600 м) и Франц-Виктория (около 430 м). Южная часть моря мелководна с глубинами менее 200 метров и более ровным рельефом дна [4, 11, 26].

Геологически дно сформировано преимущественно мезокайнозойскими осадочными породами Баренцево-Печорской платформы, а в южных районах — верхнепротерозойскими осадочно-вулканогенными комплексами. Донные отложения включают пески с галькой и ракушками на мелководье, а в глубоких впадинах преобладают илистые осадки с примесью грубого обломочного материала, связанного с ледниковой деятельностью [4, 11, 12].

Баренцево море расположено в зоне полярного морского климата, характеризующегося переменчивой погодой. Его климат формируется под воздействием тёплых вод Атлантического океана и холодных масс Северного Ледовитого океана. В этом районе годовые колебания температуры воздуха сравнительно невелики: лето короткое и прохладное, а зима длится долго и отличается относительно мягкими температурами для таких широт. Ветер здесь часто бывает сильным, а влажность воздуха — высокой [4].

Юго-западная часть моря испытывает заметное влияние Нордкапской ветви Северо-Атлантического тёплого течения, что способствует смягчению климатических условий. Над акваторией проходит арктический атмосферный фронт, разделяющий холодные арктические воздушные массы и более тёплый воздух умеренных широт. Его смещения в северном или южном направлении изменяют маршруты атлантических циклонов, которые приносят тепло и влагу с Северной Атлантики, вызывая частые изменения погоды в регионе [4].

В зимние месяцы циклональная активность усиливается, особенно в центральной части моря, где преобладают юго-западные ветры со скоростью до 16 м/с. Штормы в этот период случаются достаточно часто. Температура воздуха в марте, который является самым холодным месяцем, колеблется от –22 °C на архипелаге Шпицберген до –14 °C около острова Колгуев и примерно –2 °C в юго-западной части акватории [4].

Лето в регионе обычно прохладное и облачное, с лёгкими северо-восточными ветрами. Средняя температура августа достигает около 9 °C в западных и центральных районах, 7 °C на юго-востоке и от 4 до 6 °C на севере. Годовое количество осадков варьируется от 300 мм на севере до 500 мм на юго-западе. В целом, над Баренцевым морем преобладает пасмурная погода на протяжении всего года [4].

Баренцево море тесно связано с Арктическим бассейном и Атлантическим океаном, что оказывает значительное влияние на формирование его климата и климатообразующих факторов [11].

Так как море испытывает значительное влияние теплых вод течения Гольфстрим его южные и западные участки не покрываются льдом. Зимой температура поверхностных вод колеблется от 0 до 5 °C, летом на юге достигает 8-9 °C, в центральной части – 3-5 °C, а на севере около 0 °C. Вертикальное распределение температуры определяется распределением атлантических вод, степенью зимнего охлаждения и особенностями рельефа

морского дна. В юго-западных районах температура воды постепенно уменьшается с поверхности к глубинам. На северо-востоке зимой температура падает до глубины 100-200 метров, после чего начинает повышаться ко дну. Летом температура поверхностных вод невысока и снижается до -1,5 °С на глубинах 25-50 метров. В интервале от 50 до 100 метров температура поднимается до -1 °С, а ближе к дну достигает примерно +1 °С. Между 50 и 100 метрами находится холодный промежуточный слой. В местах, где подводные возвышенности обтекаются глубинными атлантическими водами, формируются так называемые «холодные шапки», типичные для банок Баренцева моря [6].

Соленость воды варьируется: на юго-западе она составляет около 35‰, а на севере – 32-33‰. По вертикали соленость возрастает от 34‰ у поверхности до 35,1‰ у дна. Сезонные колебания солености выражены слабо [6].

В Баренцевом море распределение и величина плотности воды зависят от температуры и солёности. Самые плотные поверхностные воды зимой наблюдаются в северной части моря, где одновременно происходит интенсивное охлаждение и повышение солёности из-за образования льда. Летом максимальные значения плотности фиксируются в центральных районах моря. На севере в связи с таянием льдов происходит распреснение поверхностных вод, и таким образом плотность уменьшается. С увеличением глубины плотность возрастает. Зимой в мелководных районах изменение плотности по глубине невелико. Весной и летом распреснение верхних слоёв вызывает выраженную стратификацию плотности на всей акватории. Осеннее охлаждение выравнивает плотность с глубиной [4].

В море выделяют несколько водных масс:

1) поверхностные атлантические воды с более высокими температурой и соленостью;

2) поверхностные арктические воды с пониженными показателями температуры и солености;

3) прибрежные воды с повышенной температурой и низкой соленостью в летний период, тогда как зимой их температура и соленость снижаются;

4) баренцевоморские воды с низкой температурой и повышенной соленостью [4, 6].

В зимний период на северо-востоке моря от поверхности до дна доминирует баренцевоморская водная масса, тогда как на юго-западе преобладают атлантические воды. Летом в северной части Баренцева моря главенствует арктическая водная масса, в центральной зоне — атлантическая, а на юге — прибрежные воды [4].

Поверхностные и глубинные течения в Баренцевом море имеют преимущественно циклоническое направление против часовой стрелки (рис. 1.2). Вдоль южной и западной окраины моря воды Нордкапского течения движутся на восток, повторяя береговую линию, а также направляются на север. Область влияния этого течения простирается до северных берегов Новой Земли. Северные и восточные части циркуляции формируются за счёт смешения местных вод с арктическими массами, поступающими из Карского моря и Северного Ледовитого океана. В центральной зоне моря функционирует система замкнутых круговоротов. Максимальная скорость течения в Прибрежном течении достигает около 40 см/с, тогда как в Северном течении она составляет примерно 13 см/с. Движение вод Баренцева моря подвержено изменениям под воздействием ветровых условий и обмена водными массами с соседними морями [4, 6].

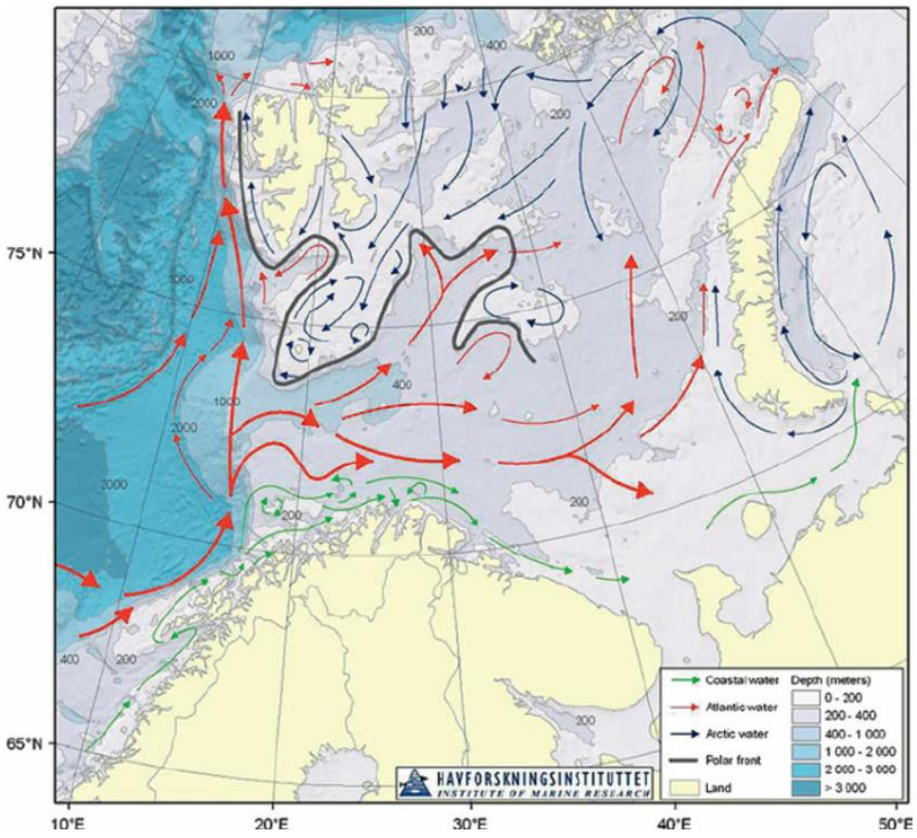

Рисунок 1.2 – Крупномасштабная циркуляция Баренцева моря [26].

Приливо-отливные течения играют важную роль, особенно в прибрежных зонах. Они проявляются с периодичностью около полсуток и достигают высоты до 6,1 метра, главным образом под воздействием атлантической приливной волны. Особенно выражены колебания уровня воды, связанные с эффектами сгона и нагона, у побережья Кольского полуострова (до 3 метров) и в районе Шпицбергена (около 1 метра) [4, 6].

Обмен водными массами с соседними морями играет ключевую роль в поддержании водного баланса Баренцева моря. В течение года через проливы происходит циркуляция, при которой в море поступает и из него выходит примерно четверть общего объема воды. Основным источником теплой воды является Нордкапское течение, которое существенно влияет на гидрометеорологические условия региона [6].

Баренцево море относится к Ледовитому океану, однако оно никогда не покрывается сплошным льдом полностью. В его акватории формируются льды

преимущественно местного происхождения. Процесс ледообразования начинается в сентябре, а к концу лета большая часть моря освобождается от льда, за исключением районов около Новой Земли, Земли Франца-Иосифа и Шпицбергена. Толщина ледяного покрова обычно не превышает одного метра. Припай в этом регионе слабо выражен, а основную массу льдов составляют плавучие образования, включая айсберги. Степень ледовитости Баренцева моря варьируется из года в год, что обусловлено изменениями в интенсивности Нордкапского течения, особенностями крупномасштабной атмосферной циркуляции, а также общими тенденциями потепления или похолодания в Арктике [6].

1.2. Биологические компоненты экосистемы Баренцева моря.

Баренцевоморская экосистема, как и другие арктические и бореальные морские системы, отличается выраженной сезонной динамикой процессов, наиболее заметной с марта по сентябрь благодаря изменению светового режима. Весной происходит бурное развитие микроводорослей, чему способствуют стратификация водных масс и образование плотностных слоев. С наступлением осени, с сентября по октябрь, биологическая активность снижается, и экосистема переходит в состояние покоя [8].

Главным фактором изменений в экосистеме выступает тепло, поступающее как от солнечной радиации, так и с Северо-Атлантическими течениями. Потепление Арктики способствует продвижению теплолюбивых видов на север и восток, а похолодание – распространению холодолюбивых видов на юг и запад. [8].

Устойчивость экосистемы обеспечивается её биоразнообразием, позволяющим гибко перераспределять потоки вещества и энергии, а также компенсировать потерю отдельных звеньев без снижения общей продуктивности. Баренцевоморская экосистема занимает промежуточное положение между бореальными и арктическими морскими системами [8].

Важные компоненты биоты Баренцева моря, рассматриваемые в данной работе, разделены на основные экологические группы (фитопланктон, зоопланктон, ихтиофауна (рыбы), зообентос, морские млекопитающие, морские птицы.

Также была принята сезонная структура года, которая имеет следующий вид: Зима (I квартал) – январь–март, весна (II квартал) – апрель–июнь, лето (III квартал) – июль–сентябрь, осень (IV квартал) – октябрь–декабрь.

В работе для каждой группы биоты, с учётом установленных временных рамок, приведено описание их пространственного распределения по биомассе или численности, а также созданы соответствующие карты с использованием единиц измерения, принятых для каждой группы.

Фитопланктон. В пелагической зоне Баренцева моря обнаружено 307 видов микроводорослей, среди которых преобладают диатомовые (148 видов) и динофитовые (123 вида). По фитогеографическому признаку 38,8% видов относятся к арктическим, 21,8% - к бореальным, 29,6% - к космополитам [14].

В лидирующем комплексе летнего фитопланктона доля холодноводных видов составляет немногим более 50%, при этом вклад океанических форм достаточно высок (57%). Для западной части моря, находящейся под непосредственным воздействием атлантических вод, эти показатели составляют 50 и 67% соответственно. Присутствие атлантических видов в северной части моря является показателем усиления "атлантификации" арктического региона [14].

Представленное изображение (рис 1.2.1) демонстрирует выраженную пространственную и сезонную неоднородность в распределении биомассы фитопланктона в ключевых районах Баренцева моря.

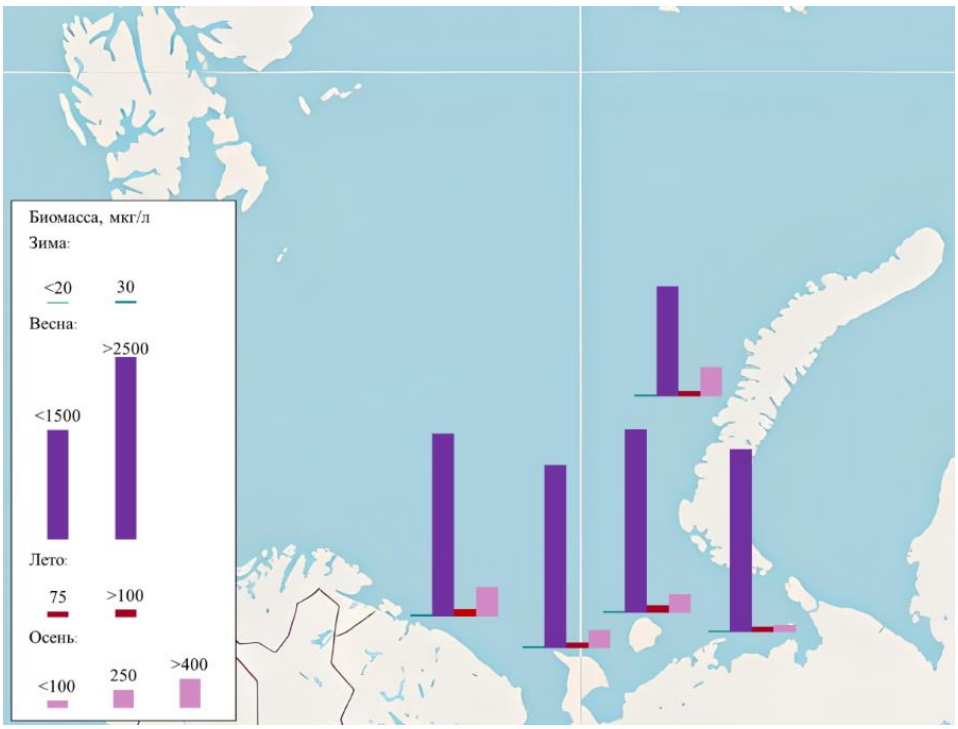

Рисунок 1.2.1 – Биомасса фитопланктона (мкг/л) по сезонам на рассматриваемых прибрежных зонах.

Анализ показывает максимальные значения биомассы в весенний период (более 2500 мкг/л), что превышает показатели других сезонов в 6-10 раз. Осенний период характеризуется вторыми по величине значениями (100-400 мкг/л), в то время как летние и зимние показатели остаются на относительно низком уровне.

Весенний период демонстрирует исключительно высокие значения биомассы фитопланктона, превышающие 2500 мкг/л на большинстве исследованных станций, кроме прибрежной зоны архипелага Новая Земля. Эти показатели соответствуют весеннему цветению, которое является доминирующим событием в годовом цикле первичной продукции Баренцева моря.

Осенние показатели биомассы варьируют от 100 до более 400 мкг/л, что характеризует второй по значимости пик развития фитопланктона в годовом цикле. Осенний максимум формируется в южной прибрежной области

водоема и обусловлен активизацией "весеннего" фитопланктона при снижении температуры воды.

Летние месяцы характеризуются относительно низкими показателями биомассы фитопланктона (75-100 мкг/л), что отражает фазу сбалансированного развития микроводорослей. В это время происходит переход от весенних диатомовых комплексов к летним сообществам с повышенной долей динофлагеллят и мелких жгутиковых форм [15].

Зимние показатели биомассы фитопланктона остаются на минимальном уровне (20-30 мкг/л), что соответствует периоду биологической зимы. В это время показатели обилия, общие для планктона в целом, минимальны, при этом у зоопланктона они гораздо выше, чем у фитопланктона [22]. Биологическая зима в Баренцевом море начинается с конца ноября, когда устанавливается ледовый покров, и продолжается до конца апреля-начала мая [9]. В зимние месяцы сообщество на 50% формируют мелкие жгутиковые, остальная часть представлена пресноводными и морскими диатомовыми микроводорослями [21].

Зоопланктон. Анализ сезонной и пространственной динамики биомассы зоопланктона в ключевых районах Баренцева моря, выявляет выраженную цикличность с доминированием летнего максимума (рис. 1.2.2). Сезонные изменения связаны с жизненными циклами доминирующих видов *Calanus* и их синхронизацией с продукционными циклами фитопланктона.

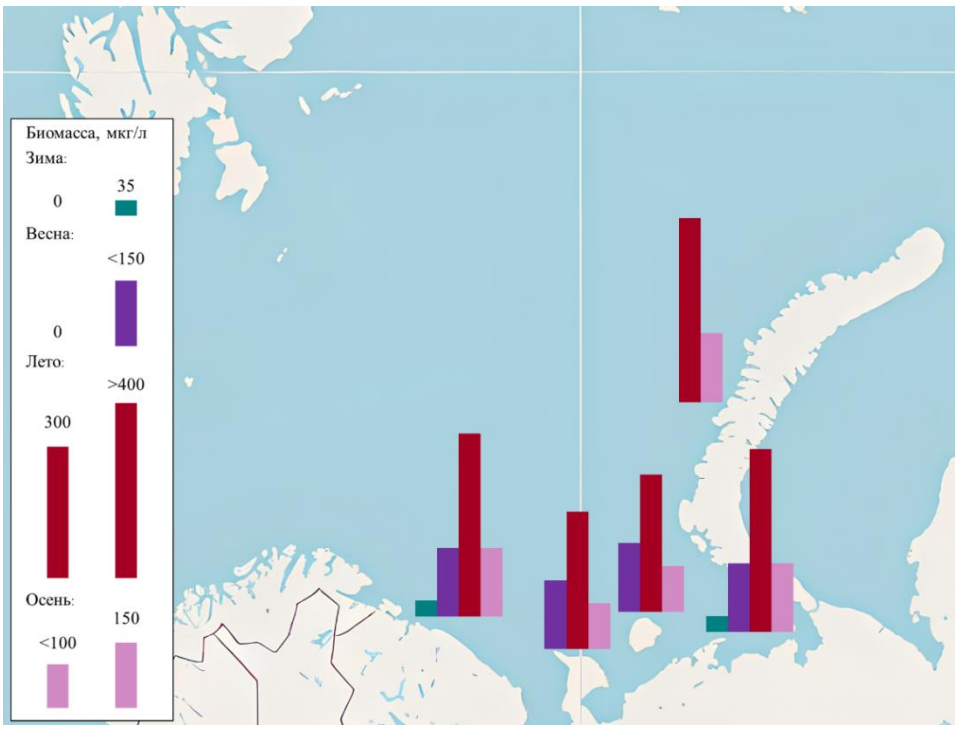

Рисунок 1.2.2 – Биомасса зоопланктона (мкг/л) по сезонам на рассматриваемых прибрежных зонах.

Анализ показывает максимальные значения биомассы в летний период (до 400 мкг/л), что превышает зимние показатели в 10-15 раз. Осенний период характеризуется вторыми по величине значениями (100-150 мкг/л), отражая динамику развития зоопланктонных сообществ в арктических морях [1].

Летние месяцы демонстрируют наивысшие показатели биомассы зоопланктона, достигающие 300-400 мкг/л на большинстве исследованных станций. Эти значения соответствуют периоду активного развития и роста зоопланктонных сообществ после весеннего цветения фитопланктона. В Баренцевом море зарегистрировано более 200 видов зоопланктона, среди которых доминирует веслоногий рачок *Calanus finmarchicus*, составляющий до 99% биомассы в атлантических водах [1].

Весенний период характеризуется промежуточными значениями биомассы (0-150 мкг/л), что связано с началом активного развития зоопланктонных сообществ после зимней диапаузы. В это время происходит

синхронизация жизненных циклов доминирующих видов *Calanus* с весенним цветением фитопланктона [1].

Весной и летом в составе зоопланктона увеличивается доля личинок бентосных организмов, что отражается в повышении общих показателей биомассы.

Осенние показатели биомассы (100-150 мкг/л) отражают второй пик развития зоопланктона в годовом цикле, характерный для бициклических водоёмов. В это время происходит активное накопление липидных запасов у копеподитных стадий *Calanus* перед началом зимней диапаузы [14].

Зимние месяцы характеризуются минимальными показателями биомассы (0-35 мкг/л), что соответствует периоду биологической зимы в Баренцевом море. В это время большинство массовых видов мигрирует в глубокие слои моря для зимовки [1].

Ихтиофауна. В Баренцевом море выявлено 182 вида и подвида рыб, но постоянно встречается не более 126. Большинство видов (59,3%) относится к бореальному комплексу, 28% — к арктическому. Промысловое значение имеют 21 вид и подвид, среди которых треска, пикша, камбалы и камбалы-ерш [8]. Представленное изображение демонстрирует суммарное распределение четырех ключевых промысловых видов (треска атлантическая, северо-восточная арктическая пикша, морская камбала, камбала-ерш) в Баренцевом море (рис. 1.2.3).

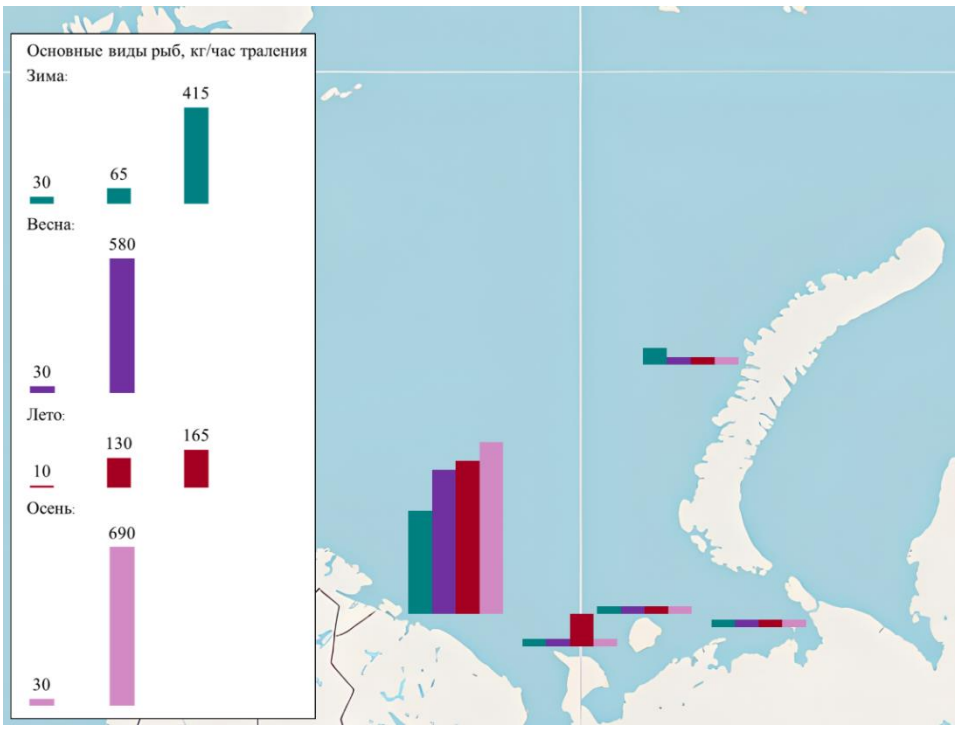

Рисунок 1.2.3 – Основные виды рыб (кг/час) по сезонам на рассматриваемых прибрежных зонах.

Видовое разнообразие рыб уменьшается с запада на восток, а их численность и состав зависят от природных и антропогенных факторов [8]. Неравномерное пространственное распределение промысловых участков основных видов рыб в Баренцевом море, может быть объяснено тем, что миграции рыб сдерживаются барьером холодных вод, они не только не достигают прибрежных вод Новой Земли, но и не выходят даже на склоны Гусиной банки.

Анализ показывает выраженную сезонную изменчивость интенсивности промысла с максимальными значениями в осенний период (690 кг/час), что отражает процесс обратной миграции и активным нагулом перед зимовкой.

Весенние показатели также демонстрируют высокую продуктивность (580 кг/час), обусловленную нерестовыми миграциями трески и активизацией донных видов [20].

Летние месяцы демонстрируют существенное падение показателей до 130-165 кг/час. Треска в этот период постепенно уходит дальше от берегов. Камбала концентрируется на участках с песчаным или илистым дном для маскировки. Пикша в летний период распределяется по более обширной акватории [17].

Зимние показатели демонстрируют широкий диапазон значений от 30 до 415 кг/час/ Камбала-ерш и обычная камбала в зимний период переходят на более глубокие участки, где температура воды у дна составляет от −0,5 до +2,5°C. Пикша также меняет свое распределение в зависимости от температурных условий [17].

Зообентос. Современная средняя биомасса бентоса в Баренцевом море составляет 184 г/м², что позволяет отнести его к высокопродуктивным регионам баренцевоморского шельфа. Донные макробеспозвоночные юго-восточной части Баренцева моря представлены примерно 600 видами, среди которых Mollusca – 115 видов, Polychaeta – 115, Crustacea – более 130, Bryozoa – 130, Echinodermata – 18 видов [5].

Представленное изображение демонстрирует среднегодовое распределение биомассы зообентоса В Баренцевом море (рис. 1.2.4).

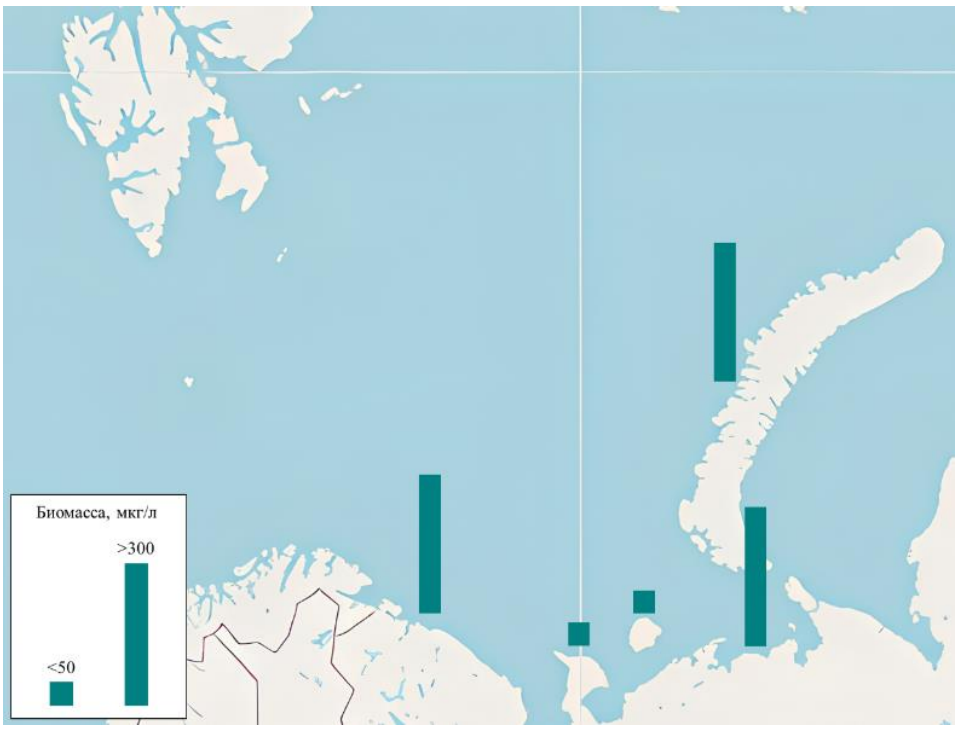

Рисунок 1.2.4 – Биомасса зообентоса (мкг/л) среднегодовая на рассматриваемых прибрежных зонах.

Наиболее высокие показатели биомассы зообентоса (свыше 500 мкг/л) концентрируются в прибрежной зоне Печорского моря, Кольского полуострова и архипелага Новая Земля. Эти значения соответствуют зонам максимальной численности двустворчатых моллюсков, которые отмечаются у берегов Новой Земли и в Печорском море [5]. В восточной части Баренцева моря биомасса макрозообентоса в теплые периоды достоверно выше, чем в холодные, что подтверждает влияние климатических условий на бентосные сообщества [16].

Районы полуострова Канин и острова Колгуев демонстрируют умеренные значения биомассы зообентоса (<50 мкг/л. Эти показатели в 5-10 раз ниже, чем в высокопродуктивных восточных районах моря, таких как Печорское море и архипелаг Новая Земля

Морские млекопитающие. Наглядно на рисунке 1.2.5 мы можем рассмотреть суммарное пространственное распределение семи видов морских

млекопитающих (морской заяц, гренландский тюлень, морская свинья, малый полосатик, косатка, морж, кольчатая нерпа).

Максимальная плотность (0,75 ос/км²) в западных районах у Кольского полуострова превышает показатели восточных прибрежных районов в 75 раз. Умеренные значения плотности (0,36 ос/км²) зафиксированы в центральной части моря у Печорского моря, отражая переходные гидрологические условия. Минимальные показатели (0,01 ос/км²) характерны

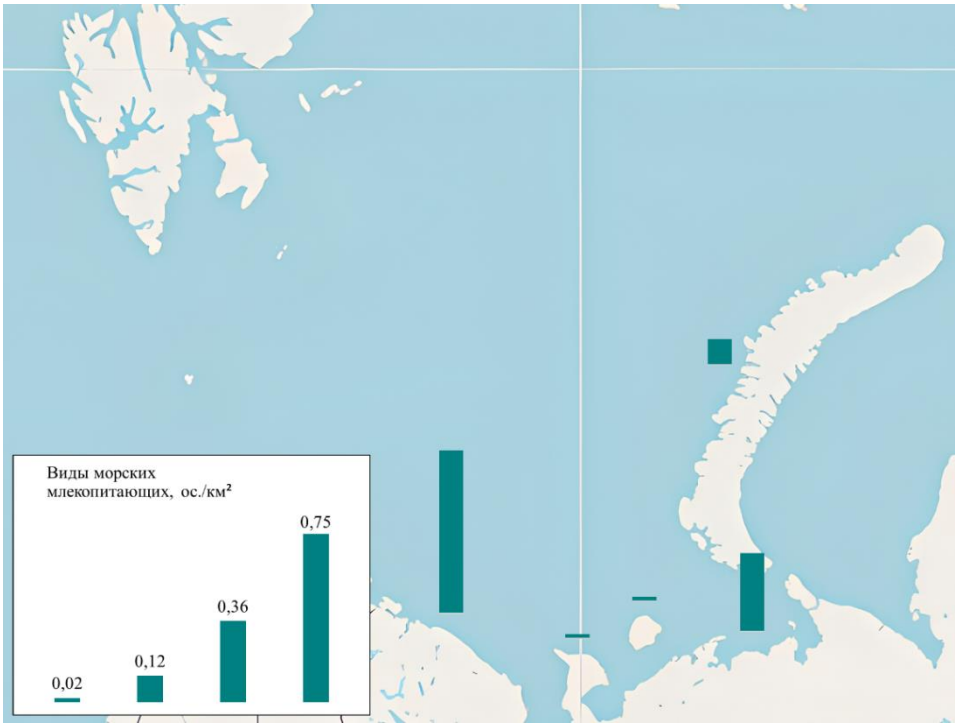

Рисунок 1.2.5 – «Суммарное распределение» видов морских млекопитающих (ос/км²) на рассматриваемых прибрежных зонах.

Максимальные значения плотности морских млекопитающих (0,75 ос/км²) приурочены к району Кольского полуострова, что соответствует ключевой области концентрации бореальных и атлантических видов. Этот район характеризуется влиянием теплых атлантических вод, которые создают благоприятные условия для китообразных. Китообразные встречаются преимущественно в западных районах Баренцева моря и распределяются в водах с глубинами от 23 до 2294 м, при температуре от -1,9 до 10,7°C и

солености 33,0-35,2‰ [7]. Беломордый дельфин, который занесен в Красную книгу России, концентрируется преимущественно в этом регионе. Малый полосатик, являющийся наиболее многочисленным видом усатых китов в регионе, демонстрирует общую численность в Баренцевом море в пределах 10-13 тысяч особей. Морская свинья летом заходит в губы и прибрежные воды западной части моря, а косатка регулярно отмечается в этом регионе, особенно в летне-осенний период [7].

Печорское море характеризуется умеренными показателями плотности (0,36 ос/км²), что связано с переходными гидрологическими условиями между атлантическими и арктическими водными массами. В прибрежных водах и губах встречается 11 видов морских млекопитающих, из которых шесть охраняются. Летом в губы заходят морская свинья, малый полосатик и косатка, в то время как большинство китообразных предпочитает открытые воды. Морской заяц, который постоянно обитает в Баренцевом море, встречается в этом регионе, но предпочитает более глубоководные участки [7].

Районы архипелага Новая Земля демонстрируют относительно низкие показатели плотности (0,12 ос/км²), что может показаться неожиданным для арктического региона. Несмотря на присутствие ледозависимых видов, общая плотность морских млекопитающих остается умеренной.

Гренландский тюлень, который постоянно обитает в Баренцевом море, присутствует в этом регионе, но не образует значительных концентраций. Кольчатая нерпа также встречается в арктических водах у Новой Земли, где она является одним из доминирующих видов ластоногих среди постоянно обитающих форм. Морж концентрируется в юго-восточной части Баренцева моря, но основные скопления находятся ближе к проливам и островам [7].

Полуостров Канин и остров Колгуев демонстрируют минимальные показатели плотности морских млекопитающих (0,01 ос/км²). Эти крайне низкие значения обусловлены несколькими факторами: мелководностью

региона, сильным опреснением вод речным стоком и ограниченной кормовой базой.

Морские птицы. Представленное изображение демонстрирует суммарное пространственное распределение трех видов морских птиц (толстоклювая кайра, белощекая казарка, обыкновенная гага) (рис. 1.2.6).

Анализ показывает максимальную плотность (17,1 ос/км²) в районе архипелага Новая Земля, что превышает показатели других районов в 2-3 раза. Умеренно-высокие значения плотности (7,85 ос/км²) зафиксированы в Печорском море, отражая важность этого района для морских уток. Относительно низкие показатели характерны для Кольского полуострова (5,05 ос/км²) и полуострова Канин (5,0 ос/км²).

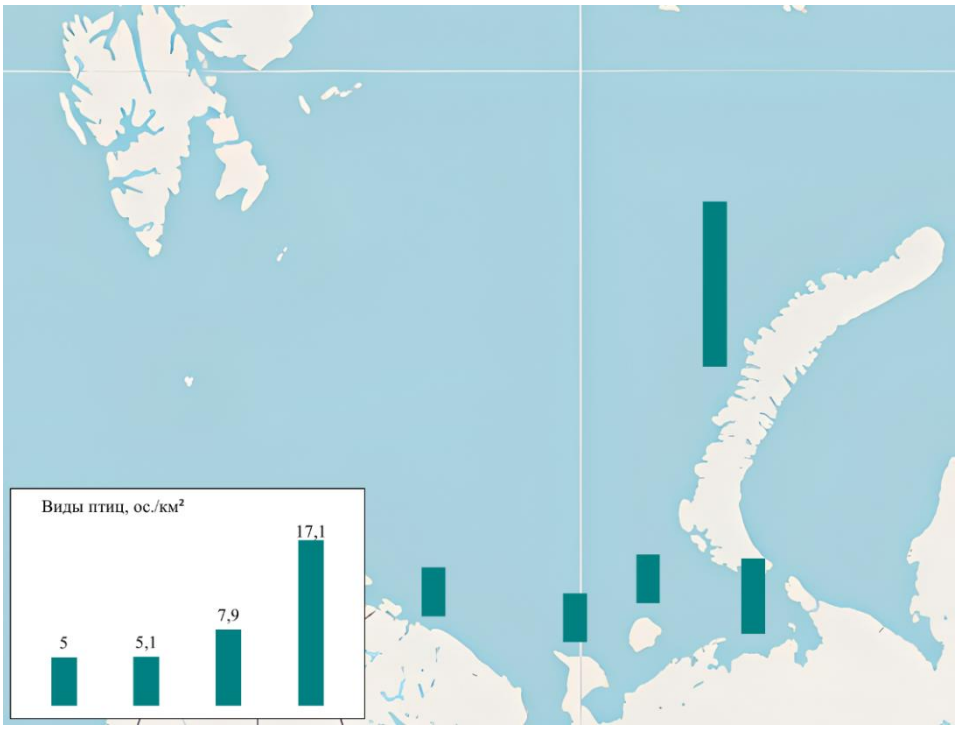

Рисунок 1.2.6 – «Суммарное распределение» видов морских птиц (ос/км²) на рассматриваемых прибрежных зонах.

Максимальные значения плотности морских птиц (17,1 ос/км²) приурочены к району архипелага Новая Земля, что соответствует одной из

ключевых областей концентрации морских птиц в Баренцевом море. Крупнейшие колонии морских птиц в Баренцевом море расположены на западном побережье Новой Земли. В настоящее время для Новой Земли известно 58 колоний морских птиц с примерно 1 миллионом гнездящихся пар толстоклювой кайры. Скалистые берега Новой Земли содержат множество утесов, подходящих для гнездования морских птиц. Архипелаг является одним из наиболее важных мест гнездования и линьки для многих арктических видов птиц, особенно для морских птиц [31].

Прибрежная зона Печорского моря демонстрирует вторые по величине показатели плотности (7,85 о./км²), что отражает особую важность этого района для морских уток. Морские утки концентрируются в прибрежных районах, особенно в Печорском море, где летом и во время миграций их численность достигает 2 миллионов особей [27]. Этот район служит ключевой областью для линьки и кормежки неразмножающихся особей в летний сезон. Также обыкновенная гага предпочитает мелководные участки глубиной менее 10 метров, а летом обычно использует глубины до 3 метров, что делает Печорское море оптимальным местообитанием [27].

Районы Кольского полуострова характеризуются умеренными показателями плотности (5,05 ос/км²), что несколько ниже ожидаемого для этого региона. Несмотря на наличие крупных птичьих базаров на скалистых побережьях, особенно на полуострове Рыбачий, суммарная плотность трех рассматриваемых видов остается умеренной. Это может быть связано с тем, что в западной части моря южнее Полярного фронта доминируют другие виды морских птиц, такие как атлантический тупик и моевка [27].

Полуостров Канин демонстрирует минимальные показатели плотности морских птиц (5,0 ос/км²). Эти низкие значения обусловлены менее развитой береговой линией, ограниченным количеством скалистых участков, подходящих для колониального гнездования, и более суровыми условиями для

кормежки. Между мысом Канин и устьем реки Вельт оценивается не более 800-1000 пар белощекой казарки [27].

1.3. Особо охраняемые природные территории Баренцева моря

На акватории Баренцева моря выделяют 14 действующих и предполагаемых особо охраняемых природных территорий (ООПТ), выделены на рисунке 1.3.1. Однако в рамках данного исследования мы сосредоточимся на 11 ООПТ, которые представляют наибольший интерес для целей нашей научной работы

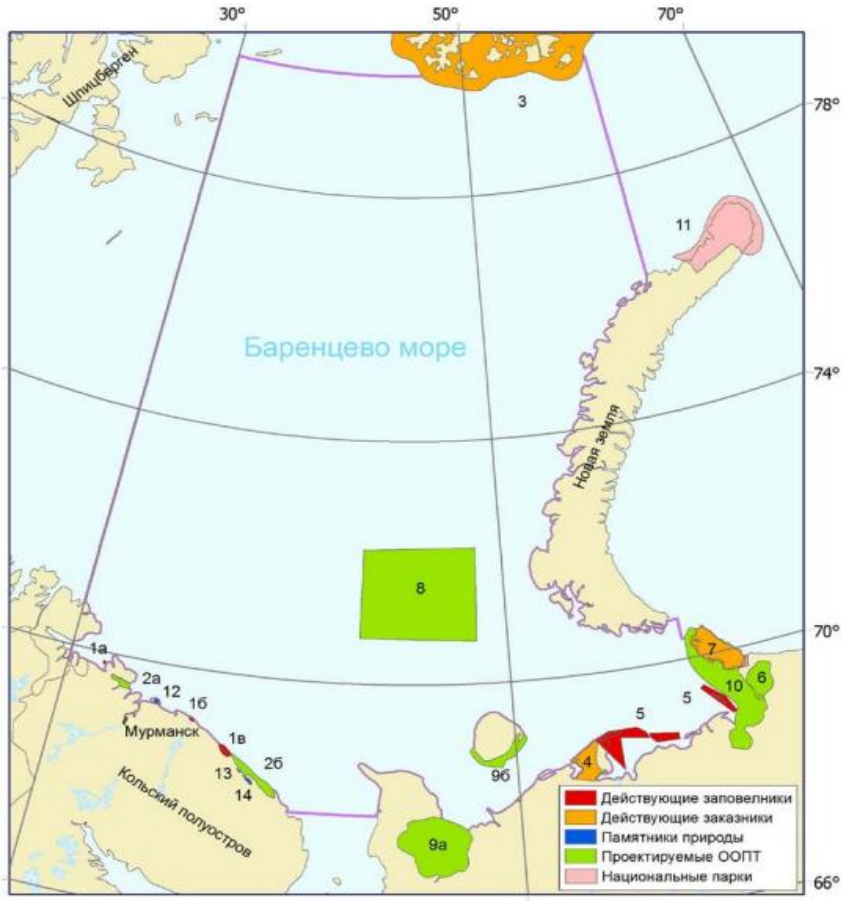

Рисунок 1.3.1 – Особо охраняемые природные территории в Баренцевом море: 1а – Айновы о-ва, 1б – Гавриловские о-ва, 1в – “Семь Островов” (Кандалакшский заповедник); 2а – морской заказник Западного Мурмана; 2б – морской заказник Восточного Мурмана; 3 – заказник “Земля Франца-Иосифа”; 4 – Ненецкий заказник; 5 – Ненецкий заповедник; 6 –

Большеземельский заповедник; 7 – заказник “Вайгач”; 8 – морской заказник “Гусиная банка”; 9а – морской заказник “Чешская губа”; 9б – морской заказник “Остров Колгуев”; 10 – биосферный полигон Ненецкого заповедника; 11 – национальный парк “Русская Арктика”; 12 – памятник природы “Озеро Могильное”; 13 – памятник природы “Птичьи базары губы Дворовая”; 14 – памятник природы “губа Ивановская [23].

Кандалакшский государственный природный заповедник охватывает архипелаги и прибрежные зоны Белого и Баренцева морей, распространяясь на территории четырёх районов Мурманской области (Кандалакшский, Терский, Североморский, Печенгский) и Лоухского района Республики Карелия. Основные участки Баренцевоморского кластера включают три ключевых архипелага: Айновы острова, Гавриловские острова и Семь Островов. Общая площадь охраняемой территории составляет 70.5 тыс. га, при этом 23% (16.3 тыс. га) приходится на вышеуказанные островные группы [23].

Айновы острова (Большой и Малый Айнов), входящие в Кандалакшский заповедник, включают 500-метровую морскую акваторию, но лишены постоянной охраны и мониторинга. Этот уникальный биотоп Скандинавской зоогеографической провинции в Варангер-фьорде сохраняет заросли зостеры – ключевого нерестилища трески и мойвы. На архипелаге располагаются крупнейшие колонии краснокнижных больших (624 пары) и хохлатых бакланов (128 пар), а также скопления серебристых чаек, тупиков и гаг. Здесь ежегодно регистрируется весенние залежки серых тюленей до 500 особей [18; 23].

Гавриловские острова являются важным местом обитания для многочисленных видов птиц. Наиболее многочисленны здесь моевка, морская и серебристая чайки. Кроме них, на островах также гнездятся сизая чайка, кулик-сорока, полярная крачка, тонкоклювая и толстоклювая кайры, хохлатый и большой бакланы, кречет, а также некоторые виды воробьиных птиц [23].

Среди птиц, обитающих на Гавриловских островах и занесённых в Красную книгу Мурманской области, отмечаются большой и хохлатый бакланы, сибирская гага, хрустан, грязовик, большой поморник и обыкновенная гага [23].

Из млекопитающих на островах встречаются кольчатая нерпа, а также обыкновенный и серый тюлени, которые также включены в Красную книгу Мурманской области [23].

Архипелаг Семь Островов отличается значительным разнообразием и численностью птиц. Здесь на скалистых участках, на высоте от 2 метров и выше над уровнем земли или воды, массово гнездятся моевки, образуя крупные колонии. Помимо них, колонии на островах создают серебристые и морские чайки, сизые чайки, полярные крачки, а также тонкоклювые и толстоклювые кайры и чистики. Также на Семи Островах можно встретить куликов-сорок, представителей ржанкообразных и некоторых воробьиных птиц [23].

В числе видов, занесённых в Красную книгу Мурманской области и обитающих на архипелаге, отмечаются северная олуша, обыкновенная гага, большой и хохлатый бакланы, сибирская гага, хрустан, грязовик, большой поморник и кречет [23].

Среди морских млекопитающих на Семи Островах встречаются кольчатая нерпа, морской заяц, а также включённые в Красную книгу Мурманской области обыкновенный и серый тюлени [23].

Иногда в прибрежных водах архипелагов Гавриловские острова и Семь Островов появляются китообразные. Белухи могут собираться в стада численностью от нескольких десятков до сотен особей, а морские свиньи и косатки встречаются поодиночке или небольшими группами [23].

Государственный природный заповедник «Ненецкий», расположенный в акватории Печорской губы и внешней части дельты реки Печоры, охватывает

северо-восточную оконечность Малоземельской тундры, острова и прибрежные воды Баренцева моря. Его охранная зона площадью 286 тыс. га обеспечивает защиту ключевых местообитаний для редких видов: малого лебедя, белощекой казарки, пискульки и белоклювой гагары. Ежегодно с июня по сентябрь здесь концентрируются свыше 200 тыс. морских птиц, включая обыкновенную гагу, гагу-гребенушку, синьгу и турпана. В Красную книгу РФ внесены белоклювая гагара, тундровый лебедь и белая чайка, а в региональный список — морская чайка и гагарка [18, 23].

Острова служат важным рефугиумом для морских млекопитающих: на южной оконечности о. Долгий расположена береговая залежка атлантического моржа, регулярно отмечаются заходы белого медведя и редких китообразных — нарвала, северного финвала. По данным авиаучётов 2002–2004 гг., летне-осенние концентрации включают более 1000 особей кольчатой нерпы, 300 морских зайцев и 200 атлантических моржей. В Краснокнижный список РФ включены также серый и обыкновенный тюлени, горбатый кит и беломордый дельфин [18, 23].

Район выполняет критическую роль в сохранении репрезентативных экосистем опреснённых мелководий Баренцева моря, поддерживая ключевые популяции проходных рыб (печорская семга, сиговые), трески, пикши и морских уток. Уникальная печорская популяция сёмги, адаптированная к экстремальным северным условиям, находится под угрозой из-за нефтяного загрязнения рек [18].

Хозяйственная деятельность в регионе сосредоточена на судоходстве (включая маршруты нефтеналивных танкеров от терминала Варандей и платформы «Приразломная»), геологоразведке и добыче углеводородов на лицензионных участках «Поморский» и «Южно-Русский». Эти факторы создают риски для хрупких арктических биоценозов, усиливая необходимость усиления охранного режима [18].

Государственный природный заказник «Ненецкий», расположенный на северо-восточной оконечности Малоземельской тундры и в акватории Баренцева моря (Ненецкий автономный округ, Архангельская область), играет ключевую роль в сохранении арктических экосистем. Территория служит важным местом обитания для краснокнижных видов, включая малого лебедя, орлана-белохвоста и лебедя-кликуна, а также обеспечивает защиту массовых гнездовий водоплавающих птиц — гуменника, белолобого гуся, шилохвости, морской чернети и других [18, 23].

Особую ценность район представляет, как репрезентативный образец продуктивных арктических экосистем, объединяющий места обитания редких видов (атлантический морж, стеллерова гага) и ключевых компонентов пищевых цепей (проходные рыбы, морские утки, лебеди). Большая часть территории сохраняет высокую степень естественности с минимальным антропогенным воздействием [23].

Однако экологическую стабильность региона нарушает деятельность человека: транзитное судоходство по Северному морскому пути, морская геологоразведка, нефтедобыча на платформе «Приразломная» и работа терминала Варандей. Акватория частично пересекается с лицензионными участками «Роснефти» (Медынско-Варандейский и Западно-Матвеевский), что создаёт риски для уникальных биоценозов [23].

Государственный региональный комплексный природный заказник "Вайгач" расположен на одноименном острове, который славится уникальным скоплением редких и исчезающих видов фауны. Вайгач представляет собой одно из наиболее значимых мест гнездования водоплавающих птиц в западной части Российской Арктики. Прибрежные воды острова являются средой обитания для атлантического моржа, серого тюленя и морской свиньи. Также эти территории служат временным пристанищем для высоколобого бутылконоса, кита-горбача, северного синего кита, северного финвала и сейвала, которые приходят сюда для откорма и охоты. В последние годы

численность большинства этих видов достигла минимального уровня и характеризуется значительной нестабильностью.

Национальный парк «Русская Арктика» занимает северную часть архипелага Новая Земля, охватывая 1,4 млн гектаров, из которых 794 тыс. приходится на морскую акваторию. Этот регион отличается исключительным биоразнообразием для арктических широт: здесь гнездятся около 40 видов птиц, включая редких белоклювую гагару, пискульку и стеллерову гагу. Прибрежные зоны архипелага служат ключевыми местообитаниями для белых медведей, шести лежбищ атлантических моржей и миграционных путей белух, перемещающихся между Карским и Баренцевым морями [23].

Экологическая значимость района обусловлена его ролью в поддержании арктических экосистем, включая фронтальные зоны желоба Святой Анны и кромки льда, которые обеспечивают высокую продуктивность. Эти экосистемы критичны для сохранения видов-индикаторов, таких как сайка, кольчатая нерпа и кайры, а также редких видов — белого медведя и моржа. Несмотря на минимальное антропогенное воздействие, район подвержен рискам из-за планов освоения: через мыс Желания проходит трасса Северного морского пути, а лицензионные участки «Варнекский» и «Хейсовский» предполагают разведку углеводородов [18, 23].

Озеро Могильное, включенное в перечень государственных памятников природы федерального значения, расположено на острове Кильдин в акватории Баренцева моря, близ побережья Кольского полуострова. Этот уникальный водоем имеет морское происхождение: он сформировался вследствие тектонического поднятия береговой линии, которое отделило часть морского залива, превратив его в изолированный водоем. Главная особенность озера — многолетнее взаимодействие пресных и соленых вод, создавшее устойчивые условия для параллельного существования морских, солоноватоводных и пресноводных организмов. Такая экосистема, возникшая за тысячелетия естественной эволюции, демонстрирует редкий пример

биологического равновесия в условиях слоистой гидрологической структуры [23].

Памятник природы «Птичьи базары губы Дворовая», расположенный в Ловозерском районе Мурманской области, охраняет уникальный участок скалистого побережья Баренцева моря. Эта территория включает один из крупнейших в Восточном Мурмане птичьих базаров, характерный для западных районов Северной Атлантики. Здесь находится масштабная колония моевок (32–37 тыс. гнездящихся пар), превосходящая по численности известные поселения Семи Островов, а также самая восточная в южной части Баренцева моря группировка тонкоклювых кайр. Популяция последних, составлявшая около 1 тыс. особей в 2003 году, сократилась на 36% за три последующих года, что вызывает серьезные опасения. Особую ценность объекту придает гнездование хохлатого баклана — вида, занесенного в Красную книгу РФ и имеющего в России единственный ареал размножения на Мурмане. Мониторинг этой колонии позволяет отслеживать динамику восточной границы распространения вид Памятник природы регионального значения создан на побережье губы Ивановской (Паспорт государственного памятника природы, 2010) [23].

Расположенный в Ловозерском районе Мурманской области *природный памятник "Губа Ивановская"* охватывает прибрежную зону одноимённого залива. Эта территория выделяется уникальными орнитологическими объектами: здесь сохранилась колония больших бакланов, а также гнездовья орлана-белохвоста. Летом на побережье формируются залежки обыкновенного тюленя, а акватория становится местом скопления лебедей, включая редкого лебедя-шипуна. Всего в границах памятника зафиксировано около 70 видов птиц, 12 видов млекопитающих, по одному представителю земноводных и пресмыкающихся, многие из которых включены в региональные и федеральные Красные книги [18, 23].

Экологическая значимость Варзинского района связана с сохранением репрезентативных арктических экосистем. Заливы Дроздовка и Ивановская обладают обширными зарослями макрофитов, поддерживающих высокую продуктивность прибрежных вод. Эти биотопы критически важны для локальных популяций семги и стеллеровой гаги, находящихся под угрозой исчезновения, а также для ключевых видов-индикаторов: мойвы, трески, кайр и обыкновенной гаги. Сочетание фитальных и пелагических сообществ делает район уникальным резерватом биоразнообразия, обеспечивающим устойчивость арктических экосистем в условиях климатических изменений [18, 23].

Акватория Баренцева моря дополняется новыми проектными территориями, расширяющими сеть существующих ООПТ. В число перспективных объектов входят морские заказники Мурманского побережья, акватории «Гусиной банки» и «Чешской губы», а также биосферные зоны Ненецкого и Большеземельского заповедников. Критериями для их формирования выступают уникальность экосистем, высокая концентрация редких видов и комплексная ценность для сохранения биоресурсов, культурных традиций и экономики региона [23].

1.4. Основные источники нефтяного загрязнения Баренцева моря

1.4.1. Факторы поведения нефти при разливах и экологические последствия

Баренцево море, являющееся стратегически важным арктическим бассейном, испытывает многоаспектное воздействие нефтяного загрязнения, формируемого природно-климатическими особенностями региона и хозяйственной активностью человека. Комплексная оценка источников загрязнения должна интегрировать анализ промышленной деятельности (судоходство, добыча углеводородов), специфику арктического климата

(ледовый режим, температурные аномалии) и чувствительность биологических компонентов экосистемы. Критическую роль играет взаимодействие факторов: низкие температуры (+2…−1.5°C) замедляют деградацию нефтепродуктов, а интенсивное освоение шельфа увеличивает риски аварийных разливов. Интегральный подход к оценке уязвимости предполагает учёт синергетических эффектов между антропогенными нагрузками и естественными процессами, определяющими устойчивость прибрежных биоценозов [13].

Фитопланктонные сообщества, основа пищевых цепей, демонстрируют резкое снижение активности уже при низких концентрациях углеводородов (0,1–0,5 мг/л). Диатомовые водоросли, доминирующие в весенних цветениях, теряют 30–50% фотосинтетической способности. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), такие как бенз(а)пирен, подавляют деление клеток. Восстановление сообществ занимает 2–3 сезона из-за замедленного метаболизма в холодной воде [2, 13].

Липидные резервы арктических видов способствуют биоаккумуляции токсинов: концентрация углеводородов в тканях достигает 8–12 мг/кг при фоновых 0,05 мг/кг. Сокращение численности зоопланктона на 40–70% лишает молоди трески и мойвы кормовой базы, нарушая репродуктивные циклы [13].

Оседающие нефтяные агрегаты вызывают массовую гибель двустворчатых моллюсков. Нарушение биотурбации приводит к падению уровня растворённого кислорода до 1–2 мг/л, делая среду непригодной для полихет – ключевых организмов, формирующих донные биоценозы. В зонах прямого загрязнения погибает до 90% бентосных видов [13].

Личинки трески проявляют 100% смертность при концентрациях нефти 0,01 мг/л – в 10 раз ниже порога выживаемости взрослых особей. Мойва смещает сроки нереста на 2–3 недели, десинхронизируясь с пиком развития

зоопланктона. В мышцах пикши накапливается бенз(а)пирен, превышая допустимые нормы в 4–5 раз, что ставит под угрозу безопасность промысла [13].

Нефтяные плёнки разрушают структуру перьевого покрова морских птиц, вызывая гипотермию с летальностью 70–90% в колониях. Хищные виды, такие как поморники, накапливают токсины через загрязнённую добычу, снижая успешность размножения на 30–40%. У гренландских тюленей нефть, попадающая на мех детёнышей, повышает смертность на 50% в первый месяц жизни. Косатки аккумулируют ПАУ в жировой ткани, что приводит к иммунодепрессии и росту восприимчивости к инфекциям [13].

Весенние разливы совпадают с периодом нереста рыб и гнездования птиц, максимально воздействуя на уязвимые стадии жизненных циклов. Дрейфующие льдины разносят загрязнение на 100–150 км от эпицентра, расширяя зону поражения. Сокращение ледового покрова на 13% за десятилетие усиливает риски трансграничного переноса токсикантов, затрагивая даже удалённые участки архипелага Новая Земля [13].

1.4.2. Антропогенные источники загрязнения

Шельфовая добыча углеводородов. Освоение морских месторождений остаётся ключевым фактором экологических рисков. Суммарные доказанные запасы нефти в Баренцевом море достигают 100 млн тонн, а прогнозные ресурсы оцениваются в 400 млн тонн. Эксплуатация Приразломного и Штокмановского месторождений осуществляется с применением морских платформ ледового класса и систем подводного обустройства. Техногенные инциденты, включая утечки при бурении и аварийные выбросы, часто связаны с нарушением экологических регламентов. Наибольшую опасность представляют операции в условиях дрейфующих льдов, где скорость ликвидации разливов снижается в 2–3 раза, а нефтяные пятна мигрируют [2, 13].

Морской транспорт и портовая инфраструктура. Интенсификация нефтяного трафика привела к пятикратному росту объёмов транспортировки за последние 20 лет (с 2 млн тонн в 2002 г. до 15 млн тонн в 2022 г.). Основные маршруты концентрируются в акваториях Мурманск–Печорское море и терминале «Белокаменка» (рис. 1.4.1.1). Спутниковый мониторинг выявил, что 70% поверхностных загрязнений Кольского залива формируются судовыми сбросами, включая неочищенные балластные воды. В районах военно-морских баз (Североморск, Гаджиево) содержание нефтепродуктов в донных отложениях превышает фоновые показатели в 3–5 раз, создавая зоны хронического загрязнения [2].

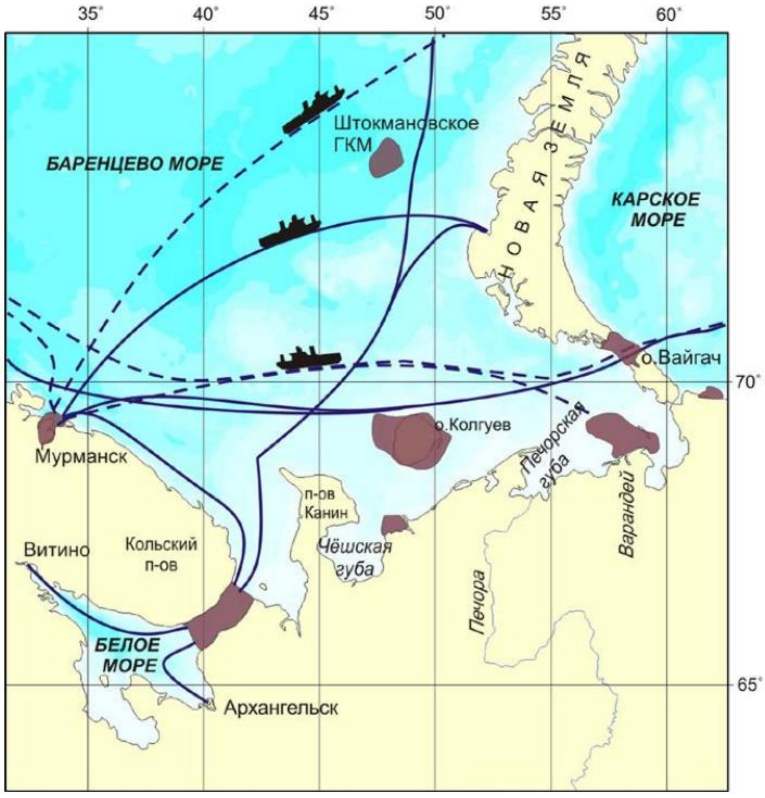

Рисунок 1.4.1.1 – Схема основных районов повышенного риска аварийных разливов нефти в Баренцевом море [23].

Промышленная и коммунальная нагрузка. Прибрежные экосистемы подвергаются систематическому воздействию через:

- Речной сток: реки Печора и Териберка транспортируют 12–18 тыс. тонн нефтепродуктов ежегодно;
- Прямые сбросы: в акватории Кольского залива зафиксированы концентрации до 50 мг/л вблизи нефтеналивных терминалов;
- Скрытые источники: терминал Варандей осуществляет подводные сбросы хозбытовых вод с содержанием фенолов 0.3–0.7 мг/л, что в 6 раз выше ПДК. [2].

1.4.3. Пространственная динамика нефтяного загрязнения прибрежных зон Баренцева моря

Представленные картографические материалы демонстрируют пространственно-временную изменчивость концентраций углеводородов (УВ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в ключевых прибрежных зонах Баренцева моря (рис. 1.4.3.1, рис.1.4.3.2).

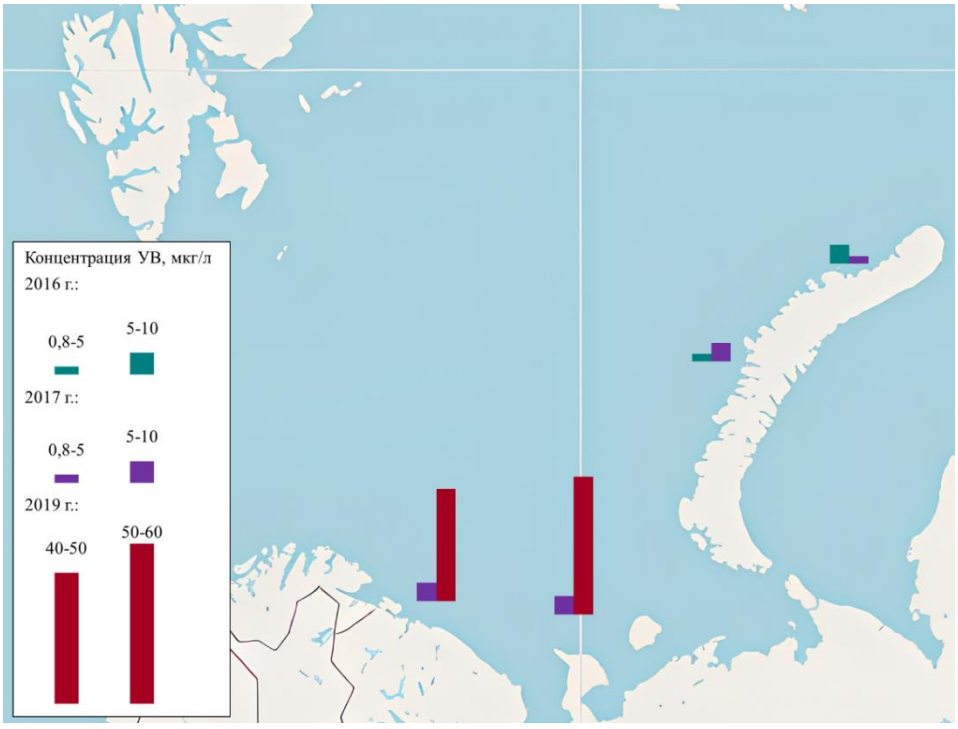

Рисунок 1.4.3.1 – Концентрация УВ (мкг/л) в поверхностных водах на рассматриваемых прибрежных зонах в 2016, 2017, 2019 гг.

Концентраций УВ в поверхностных водах демонстрирует локальное распределение загрязнения в прибрежных районах Кольского полуострова, полуострова Канин и архипелага Новая Земля.

Осенью в 2016 году концентрации УВ в прибрежных водах полуострова Адмиралтейства архипелага Новая Земля варьировали в диапазоне 0.8-5 мкг/л, что соответствует умеренному уровню загрязнения. На западном побережье архипелага у мыса Визе наблюдались концентрации 5-10 мкг/л.

В летний период в 2017 году отмечалось незначительное изменение картины распределения УВ. В прибрежной зоне полуострова Адмиралтейства концентрации УВ увеличились до значений 5-10 мкг/л. Тогда как у мыса Визе архипелага Новая Земля наблюдалось уменьшение концентрации до 0.8-5 мкг/л. Такие локальные изменения концентраций УВ возможны за счет дрейфа загрязнений.

В прибрежном районе Кольского полуострова и полуострова Канин наблюдались сходные концентрации 5-10 мкг/л.

К 2019 году произошло резкое увеличение концентраций УВ в отдельных районах. Критические значения 40-60 мкг/л были зафиксированы в прибрежной зоне Кольского полуострова и полуострова Канин, что представляет увеличение в 5-8 раз по сравнению с предыдущими годами. Это может быть связано с интенсификацией морского транспорта и увеличением продолжительности навигационного периода из-за сокращения ледового покрова.

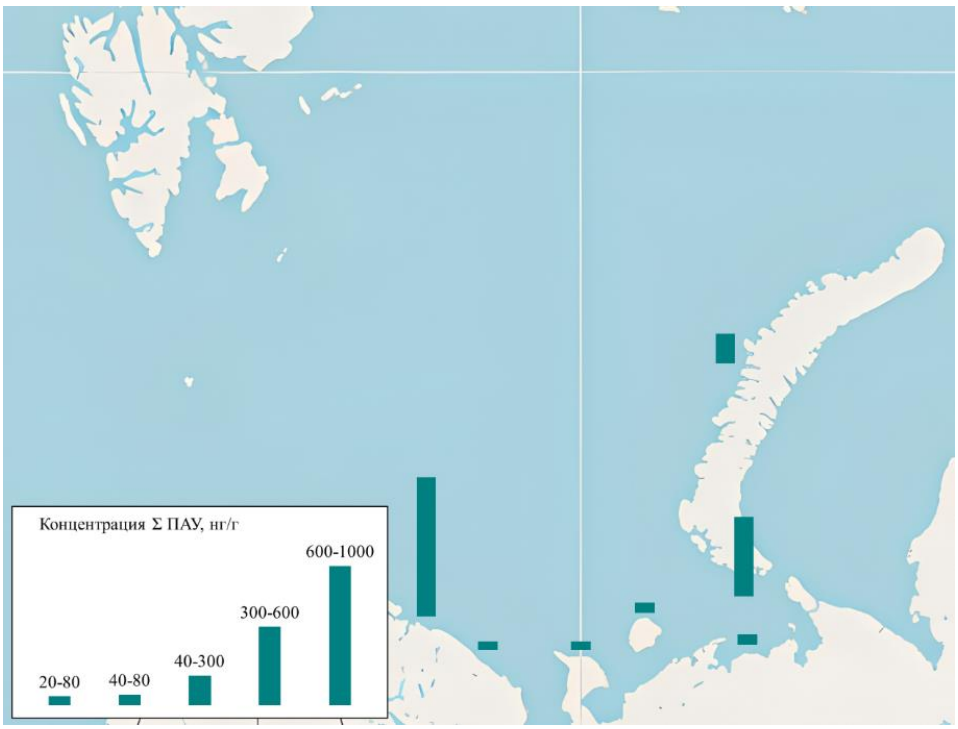

Рисунок 1.4.3.2 – Концентрация ПАУ (нг/г) в поверхностном слое донных осадков на рассматриваемых прибрежных зонах в 2001-2005 гг.

Распределение концентраций ПАУ в поверхностном слое донных осадков выявляет выраженную пространственную неоднородность загрязнения в прибрежных районах Кольского полуострова, архипелага Новая Земля, полуострова Канин, острова Колгуев и Печорского моря.

Кольский полуостров демонстрирует наиболее высокие концентрации ПАУ – от 600 до 1000 нг/г в районе Кольского залива, что отражает многолетнее воздействие портовой инфраструктуры, судоходства, сбросов с военных объектов. В Варзинском районе (губа Ивановская) наблюдаются минимальные концентрации, которые составляют 20-80 нг/г.

Печорское море характеризуется относительно низкими значениями 40-80 нг/г, что связано с начальной стадией освоения нефтяных ресурсов в период 2001-2005 гг. В центральной части моря, где происходит влияние транспортных путей, отмечены более высокие концентрации до 600 нг/г.

Новая Земля показывает значения 40-300 нг/г, отражающие умеренную антропогенную нагрузку в начале 2000-х годов, где наблюдается ограниченная промышленная деятельность, но при этом возможно влияние транспортных потоков. Полуостров Канин демонстрируют концентрации 20-80 нг/г, которые сходны со значениями острова Колгуев, что соответствует фоновым значениям для отдаленных районов.

Региональные особенности загрязнения:

- Кольский полуостров — наиболее загрязнённая зона, где сочетаются хроническое воздействие портовой инфраструктуры, судоходства, военных и промышленных объектов. Здесь фиксируются максимальные концентрации ПАУ и значительный рост УВ в последние годы
- Новая Земля — зона умеренного загрязнения, где основную роль играют перенос загрязнений льдами и течениями, а также локальные выбросы с транспортных путей.
- Полуостров Канин и остров Колгуев — районы с минимальной собственной антропогенной нагрузкой, однако подвержены вторичному загрязнению через перенос нефтяных плёнок и атмосферные процессы.
- Печорское море — зона нарастающего загрязнения, связанного с освоением нефтяных ресурсов и ростом транспортной активности, особенно в районе Карских Ворот и терминала «Варандей».

В последние годы отмечается стабильное увеличение концентрации нефтепродуктов в прибрежных зонах Баренцева моря, проявляющееся как в поверхностных водах, так и в донных отложениях. Этот процесс обусловлен комплексом причин, включая расширение промышленной активности, удлинение периода навигации из-за климатических изменений и трансформацию гидрологического режима, влияющего на перенос загрязняющих веществ. Наибольшая антропогенная нагрузка фиксируется в районах с развитой портовой инфраструктурой и интенсивным судоходством,

а также в зонах, подверженных вторичному загрязнению за счёт морских течений и ледового дрифта.

Результаты радиолокационного мониторинга 2015–2016 годов выявили особенности распространения нефтяных загрязнений в акваториях Баренцева и Печорского морей (рис. 1.4.3.4). Открытые участки Баренцева моря, где отсутствуют крупные стационарные источники выбросов, демонстрируют относительно низкий уровень загрязнения, соответствующий текущей степени промышленного освоения этих территорий. При этом основные скопления нефтяных плёнок наблюдаются вдоль ключевых судоходных маршрутов, включая трассу через пролив Карские Ворота к острову Колгуев и далее в Кольский залив с ответвлениями к портам Мурманска и Архангельска. Такое распределение подтверждает преобладание транспортных источников загрязнения, связанных с эксплуатационными сбросами судов и аварийными инцидентами при перевозке нефти. Прибрежные акватории Кольского полуострова, характеризующиеся высокой плотностью портовых операций и близостью к урбанизированным территориям, выделяются максимальными концентрациями поверхностных загрязнений [13].

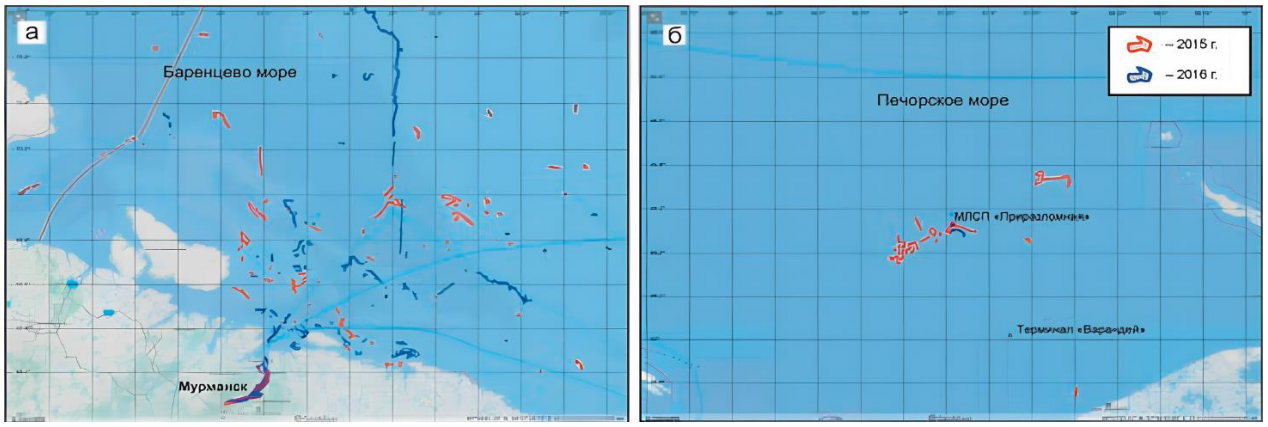

Рисунок 1.4.3.4 – Пространственное распределение нефтяных плёнок в прибрежных акваториях Баренцева моря по результатам радиолокационного мониторинга: (А) Зона Кольского залива и прилегающие акватории; (Б) Район шельфовой нефтедобычи в Печорском море (МЛСП «Приразломная») [13].

В Печорском море структура загрязнения имеет иную природу, связанную преимущественно с нефтедобывающей деятельностью. В районе платформы «Приразломная» периодически регистрируются локальные нефтяные пятна площадью до 4 км², формирующиеся вследствие технологических сбросов обслуживающих судов. Примечательно, что вблизи нефтеналивного терминала Варандей поверхностные плёнки практически отсутствуют, что может свидетельствовать о соблюдении экологических стандартов при эксплуатации объекта [13].

Сравнение данных за два года показывает минимальные межгодовые различия в пространственном распределении загрязнений, указывающие на устойчивость источников поступления нефтепродуктов [13].

Анализ распределения углеводородов (УВ) и полиароматических соединений (ПАУ) в Баренцевом море выявил доминирующую роль судоходства в формировании фонового загрязнения, что подтверждается повышенными концентрациями УВ вдоль судоходных маршрутов и пространственной корреляцией нефтяных пленок с транспортными коридорами. Влияние шельфовой добычи остается локальным, ограничиваясь зонами нефтяных платформ, где кратковременные пики ПАУ в донных осадках связаны преимущественно с аварийными разливами.

Глава 2. Методы и материалы исследования

2.1. Понятие уязвимости экосистем

Интегральная экологическая уязвимость представляет собой многокомпонентный показатель, характеризующий способность экосистем сохранять структурную и функциональную организацию в условиях антропогенного воздействия, включая нефтяное загрязнение. Согласно методологическим подходам, разработанным для изучения прибрежных экосистем, этот показатель синтезирует абиотические свойства местообитаний и биотические параметры основных таксономических групп на уровне целостных экосистем. При этом учитывается как степень восприимчивости организмов к различным формам техногенного воздействия, так и их потенциал восстановления первоначальной численности и межвидовых взаимодействий после прекращения негативного влияния [25].

Применительно к арктическим морским экосистемам Баренцева моря анализ интегральной экологической уязвимости приобретает критическое значение благодаря специфическим климатическим условиям региона [4]. Пониженные температуры воды существенно замедляют процессы естественной деградации углеводородов, в то время как сезонный ледяной покров создает условия для формирования долгосрочных концентраций токсичных веществ, многократно усиливая экологические последствия. Данные особенности соответствуют современным представлениям о климатической уязвимости, охватывающим предрасположенность геофизических и биологических систем к деструктивным воздействиям. Для практической оценки экологического состояния морских акваторий используется градуированная система от одного до пяти баллов, где минимальное значение соответствует низкой уязвимости, а максимальное указывает на критическую восприимчивость к воздействиям [25].

Комплексная оценка уязвимости морских акваторий формируется взаимодействием трех основных компонентов. Геоморфологическая составляющая включает характеристики динамики береговой линии, механические свойства донных отложений и особенности водной циркуляции, создающие физическую основу для анализа [1]. Аккумулятивные береговые формы с преобладанием песчано-галечных фракций проявляют повышенную уязвимость к углеводородному загрязнению вследствие высокой проницаемости, обеспечивающей глубокое проникновение нефтепродуктов в субстрат [25].

Биологический компонент характеризуется присутствием чувствительных видов-индикаторов, таких как крупные водоросли, ранние стадии развития пелагических рыб и колониально гнездящиеся морские птицы, а также общей продуктивностью экосистем. Высокая плотность эндемичных форм или видов с ограниченными воспроизводительными способностями значительно увеличивает биологическую уязвимость, поскольку такие популяции характеризуются пониженной устойчивостью к внешним стрессорам [27].

Антропогенная составляющая объединяет показатели техногенной нагрузки, включая плотность морского судоходства, расположение нефтегазовых месторождений на континентальном шельфе и эффективность систем аварийного реагирования при разливах углеводородов. Районы интенсивного судоходства в непосредственной близости от добывающих платформ формируют синергетический риск, требующий разработки предупредительных стратегий управления [25].

В рамках данного анализа основное внимание уделяется биологическим и антропогенным аспектам уязвимости. Геоморфологический компонент, несмотря на его базовое значение в формировании общей восприимчивости экосистем, не рассматривается. Подобный подход обеспечивает возможность оценки прямого воздействия человеческой деятельности на биологические

сообщества с учетом их регенеративного потенциала после устранения воздействующих факторов [25].

2.2. Материалы исследования

Основу исследования составил комплексный анализ разнородных данных, направленный на выявление зон экологической уязвимости в акватории Баренцева моря. Работа опиралась на три ключевых блока информации: биологические показатели, антропогенные факторы и природоохранные объекты.

В данной работе проводился анализ статей и анализ имеющихся картографических материалов на акваторию Балтийского моря для оценки уязвимости прибрежных экосистем к нефтяному загрязнению.

Исследование интегральной уязвимости прибрежных зон Баренцева моря основано на анализе многолетних биологических, гидрохимических и антропогенных данных, полученных из научных источников.

Фитопланктон, зоопланктон, ихтиофауна, зообентос:

- Пространственное распределение биомассы, сезонная динамика и экологические характеристики получены из монографии: Шавыкин А.А., Ильин Г.В. "Оценка интегральной уязвимости Баренцева моря от нефтяного загрязнения". – Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2010.

В работе представлены детальные картографические материалы по биомассе фитопланктона, зоопланктона и донных сообществ с учётом сезонной изменчивости.

Морские млекопитающие:

- Данные по численности и распределению китообразных (малый полосатик, косатка) и ластоногих (гренландский тюлень, морж): Беликов С.Е., Артемьев А.В. "Морские млекопитающие Белого моря" //

Труды Кандалакшского заповедника. 2006. Вып. 8. С. 45-62; Отчёты ПИНРО за 2022 г. по мониторингу морских млекопитающих.

Морские птицы:

- Плотность гнездовых колоний (люрик, кайра, гага) рассчитана на основе: Авиационных учётов ICES и NAMMCO (2015–2023 гг.); Базы данных WWF по арктическим орнитокомплексам; Онлайн-ресурса https://helion-ltd.ru/murman-animals/ с актуальными данными по птичьим базарам Мурманского побережья.

Содержание углеводородов (УВ) и ПАУ:

- Концентрации в поверхностных водах и донных отложениях взяты из работ: Немировская И.А., Титова А.М., Храмцова А.В. "Углеводороды в водной толще и донных осадках Баренцева моря" // Система Баренцева моря / Под ред. акад. А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. Гл. 10.1.

Дополнительную аналитическую основу составили результаты пространственного планирования охраняемых акваторий, представленные Спиридоновым и коллегами в монографии 2020 года. Этот труд содержит детализированные картографические материалы по ключевым биотопам и районам с ООПТ.

Данная комплексная база обеспечила оценку уязвимости экосистем Баренцева моря к нефтяному загрязнению.

2.3. Методы оценки интегральной экологической уязвимости

Методика основана на международных и российских подходах к оценке экологической уязвимости морских акваторий, в том числе на системе индексов чувствительности ESI (Environmental Sensitivity Index), рекомендованной IMO/IPIECA/OGP для арктических регионов. В российской практике аналогичные подходы применялись для оценки уязвимости

Кольского залива, Белого и Карского морей (работы ММБИ, ПИНРО, ЗАО «Экопроект»).

Формулы для расчета абсолютной и относительной интегральной уязвимости были взяты из методики, разработанной Мурманским морским биологическим институтом (ММБИ КНЦ РАН) в работе: Шавыкин А.А., Ильин Г.В. "Оценка интегральной уязвимости Баренцева моря от нефтяного загрязнения" (2010) [19].

В методике учтены рекомендации по сезонному анализу, поскольку биологическая активность и структура сообществ в Арктике сильно меняются по времени года.

В рамках исследования применялись два ключевых метода: аналитический подход, включающий анализ, обобщение, сравнение и синтез данных, а также визуализация данных, которая выполнена средствами Microsoft Excel, Microsoft PowerPoint и GIMP, что позволило создать наглядные инструменты для анализа сезонных изменений.

Создание представленных картографических материалов носит наглядный характер и направлено в первую очередь на руководящих работников и управленческие структуры. Изучение подобных картографических изображений и схем не предполагает наличие узкоспециализированных компетенций у руководителей для их понимания, однако обеспечивает возможность достаточно объективно оценивать представленную обстановку.

Таким образом, изначально необходимо произвести ранжирование биологических групп по чувствительности к нефти и расчет коэффициентов чувствительности. Ранжирование выполняется на основе 4 критериев, адаптированных из методологии ESI (Environmental Sensitivity Index) (табл. 2.3.1).

Таблица 2.3.1 – Критерии оценки чувствительности морских организмов к нефтяному загрязнению.

Критерий	Описание
Трофический уровень	Высшие трофические уровни (хищники, морские млекопитающие) аккумулируют токсины через пищевые цепи, что увеличивает риск отравления.
Биоаккумуляции	Способность организмов накапливать токсичные компоненты нефти определяет долгосрочное воздействие на здоровье популяций.
Репродуктивная уязвимость	Ранние стадии развития (икра, личинки) особенно чувствительны к нефтяным загрязнениям.
Эндемичность	Виды с ограниченным ареалом (эндемики) не имеют альтернативных местообитаний и медленно восстанавливаются.

Далее производится расчет коэффициентов чувствительности (формула 2.3.1):

$$Ks = 0{,}4 \cdot \text{Троф.ур.} + 0{,}3 \cdot \text{Биоакк.} + 0{,}2 \cdot \text{Репр} + 0{,}1 \cdot \text{Эндем.} \quad (2.3.1)$$

Следующим шагом учитывают превышение концентрации загрязнителей над нормативами (формула 2.3.2)*:*

$$PM = \frac{C\text{ув}}{\text{ПДКув}} + \frac{C\text{пау}}{ERL} \quad (2.3.2)$$

где Сув – исходная концентрация углеводорода в воде (мкг/л); ПДКув – предельно допустимая концентрация УВ для водных объектов (100 мкг/л); Спау – концентрация ПАУ в донных осадках (мкг/л); ERL – пороговое значение ПАУ, ниже которого вредные эффекты маловероятны (4000 мкг/л).

После всех расчетов необходимо перейти к интегральному индексу абсолютной уязвимости (формула 2.3.3):

$$U\text{абс} = \sum(Ks \cdot Bi \cdot (1 + PM)) \quad (2.3.3)$$

где Ks – коэффициент чувствительности, PM – концентрации загрязнения, Bi – данные по биомассе/численности

Аналогичный расчет следует и для относительной интегральной уязвимости, только для нее следует проводить нормализацию значений (формула 2.3.4):

$$Bn = \frac{Bi}{Bmax} \cdot 10 \quad (2.3.4)$$

где Bi – данные по биомассе/численности, Bmax – максимальная биомасса среди всех прибрежных зон

А уже после проводится расчет интегрального индекса относительной уязвимости (формула 2.3.5):

$$U\text{отн} = \frac{U\text{абс}}{Umax} \cdot 10 \qquad (2.3.5)$$

Проведённый анализ интегральной экологической уязвимости Баренцева моря выявил комплексный подход к оценке устойчивости экосистем к нефтяному загрязнению, объединяющий биологические, антропогенные и природоохранные факторы.

Глава 3. Результаты исследования

Основываясь на составленной методологии во второй главе, были рассчитаны значения абсолютной и относительной интегральная уязвимость.

Расчет абсолютной интегральной уязвимости:

Используя таблицу 2.3.1. было проведено ранжирование. Трофический уровень оценивался по пятибалльной шкале (от 1 до 5 баллов), остальные критерии — по десятибалльной шкале (от 1 до 10 баллов).

Таблица 3.1 – Ранжированные критерии оценки чувствительности морских организмов к нефтяному загрязнению.

Группа	Троф. Уровень	Биоаккумуляция	Репродукция	Эндемичность
Фитопланктон	1	2	3	4
Зоопланктон	2	6	5	3
Зообентос	3	8	4	5
Рыбы	4	7	9	6
Птицы	5	9	10	8
Морские млекопитающие	5	10	10	9

Анализируя четыре ключевых критериев (трофический уровень, биоаккумуляция, репродуктивная уязвимость, эндемичность), можно выявить следующие отличия между основными компонентами экосистемы Баренцева моря.

Фитопланктон занимает базовую позицию в пищевой цепи (1 балл по трофическому уровню) и характеризуется крайне низкой способностью к биоаккумуляции ПАУ (2 балла) из-за быстрого жизненного цикла и частого деления клеток. Однако его репродуктивная уязвимость оценивается на среднем уровне (3 балла): массовая гибель фитопланктона негативно сказывается на продуктивности экосистемы, но благодаря пассивному переносу течениями восстановление происходит быстро. Эндемичность

фитопланктона умеренная (4 балла) — арктические диатомеи чувствительны к потеплению и могут быть вытеснены более конкурентоспособными видами.

Зоопланктон находится на втором трофическом уровне (2 балла) и играет важную роль в переносе энергии к более высоким трофическим уровням. Его способность к биоаккумуляции выше (6 баллов), поскольку копеподы активно фильтруют воду и накапливают токсиканты. Репродуктивная уязвимость средняя (5 баллов): личинки чувствительны к гипоксии, вызванной нефтяным загрязнением. Эндемичность невысокая (3 балла), поскольку арктический криль может быть замещён атлантическими аналогами.

Зообентос характеризуется более высоким трофическим уровнем (3 балла), так как включает детритофагов и хищников. Биоаккумуляция выражена сильно (8 баллов): донные организмы, такие как мидии, способны накапливать значительные количества бензопирена, что нарушает их фильтрационную функцию. Репродуктивная уязвимость ниже средней (4 балла) из-за медленного развития личинок и высокой чувствительности к загрязнению. Эндемичность средняя (5 баллов), что связано с наличием узкоареальных видов-индикаторов.

Рыбы занимают высокий трофический уровень (4 балла) и проявляют значительную способность к биоаккумуляции (7 баллов), особенно в печени, где накапливаются ПАУ. Репродуктивная уязвимость очень высокая (9 баллов), так как икра и мальки чувствительны к нефтяному загрязнению, что приводит к резкому снижению выживаемости. Эндемичность выше средней (6 баллов), особенно у арктических видов, не мигрирующих в открытый океан.

Птицы находятся на вершине трофической пирамиды (5 баллов) и демонстрируют максимальную биоаккумуляцию (9 баллов), поскольку нефть на перьях нарушает терморегуляцию, а ПАУ концентрируются в печени. Репродуктивная уязвимость максимальна (10 баллов): после крупных

разливов нефти отмечается почти полная гибель птенцов. Эндемичность высока (8 баллов), что связано с присутствием редких и уязвимых видов, таких как белая чайка.

Морские млекопитающие также занимают верхний трофический уровень (5 баллов), демонстрируя максимальную биоаккумуляцию (10 баллов) из-за накопления токсикантов в жировой ткани. Репродуктивная уязвимость очень высокая (10 баллов) в силу длительного гестационного периода и высокой смертности потомства после крупных разливов нефти. Эндемичность также максимальна (9 баллов), поскольку ряд видов, например, нарвал, встречаются только в Арктике.

Затем произвели расчет коэффициентов чувствительности с использованием формулы 2.3.1.

Фитопланктон: $Ks=0,4\cdot1+0,3\cdot2+0,2\cdot3+0,1\cdot4=2,0$

Зоопланктон: $Ks=0,4\cdot2+0,3\cdot6+0,2\cdot5+0,1\cdot3=3,9$

Зообентос: $Ks=0,4\cdot3+0,3\cdot8+0,2\cdot4+0,1\cdot5=4,9$

Рыбы: $Ks=0,4\cdot4+0,3\cdot7+0,2\cdot9+0,1\cdot6=6,1$

Птицы: $Ks=0,4\cdot5+0,3\cdot9+0,2\cdot10+0,1\cdot8=7,5$

Млекопитающие: $Ks=0,4\cdot5+0,3\cdot10+0,2\cdot10+0,1\cdot9=7,9$

Следующим шагом учитывали превышение концентрации загрязнителей над нормативами с по формуле 2.3.2.

Рассчитанные значения коэффициента загрязнения (PM) по прибрежным территориям Баренцева моря представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Рассчитанный коэффициент загрязнения по прибрежным территориям Баренцева моря

Регион	Сув (мкг/л)	Спау (мкг/кг)	РМ
арх. Новая Земля	7,5	450	0,19
Кольский п-ов	45	800	0,65
поб.Печорского моря	7,5 *	60	0,09
п-ов Канин	55	50	0,56
о.Колгуев	45 *	60	0,47

* - значения представлены в качестве ориентировочных ввиду отсутствия данных.

Побережье Кольского полуострова демонстрирует наибольшую антропогенную нагрузку (РМ=0,65). Концентрация углеводородов здесь достигает 45 мкг/л (45% от ПДК), а полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в донных осадках — 800 мкг/кг (20% от порогового уровня ERL). Это усиливает экологическую уязвимость региона на 65% по сравнению с условно чистой средой.

Полуостров Канин (РМ=0,5625) и остров Колгуев (РМ=0,465) имеют умеренное загрязнение. На полуострове Канин концентрация углеводородов (55 мкг/л) составляет 55% от ПДК, а на острове Колгуев (45 мкг/л) — 45%. Накопление ПАУ в этих регионах минимально (50–60 мкг/кг), что соответствует 1,25–1,5% от ERL. Загрязнение увеличивает уязвимость экосистем на 56,25% и 46,5% соответственно.

Архипелаг Новая Земля (РМ=0,1875) и прибрежная зона Печорского моря (РМ=0,09) характеризуются фоновыми уровнями загрязнения. Концентрация углеводородов (7,5 мкг/л) и ПАУ (170 мкг/кг в Новой Земле, 60 мкг/кг в Печорском море) существенно ниже нормативов. В этих регионах вклад нефтяного загрязнения в общую уязвимость не превышает 18,75% и 9%.

Анализ РМ подтверждает, что текущее загрязнение Баренцева моря нефтепродуктами не превышает нормативы, но требует внимания в западных

и восточных районах, где коэффициенты составляют 0,5–0,65. Интегральная уязвимость в этих регионах существенно зависит от антропогенного фактора.

После всех расчетов мы переходим к интегральному индексу уязвимости по формуле 2.3.3.

Полученные результаты представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Итоговые значения абсолютной интегральной экологической уязвимости

Сезон/Регион	арх. Новая Земля	Кольский п-ов	поб.Печорского моря	п-ов Канин	о.Колгуев
Зима	2418	7000	2062	790	741
Весна	5679	17557	7959	9454	8865
Лето	4147	11597	3733	3743	2689
Осень	3762	11734	2727	2118	1986

Представленные результаты исследования демонстрируют детальную картину пространственно-временной динамики экологической уязвимости пяти ключевых регионов Баренцева моря от нефтяного загрязнения. Анализ данных выявил резкие различия в уровне угроз для экосистем между районами с интенсивной антропогенной нагрузкой и относительно ненарушенными.

Побережье Кольского полуострова демонстрирует экстремальные значения уязвимости во все сезоны. Зимой показатель составляет 7000.20 ед., формируемый преимущественно рыбами и зообентосом. Весной уязвимость достигает пика в 17557.34 ед. за счет фитопланктона и рыб. Летнее снижение до 11597.47 ед. связано с уменьшением фитопланктона, но сохраняется значительный вклад рыб и зоопланктона. Осенью значение возрастает до 11734.49 ед. из-за пика рыбных ресурсов и стабильного зообентоса.

Полуостров Канин характеризуется выраженной сезонной динамикой. Зимняя уязвимость минимальна (790.09 ед.) и формируется зообентосом и рыбами. Весенний максимум (9454.15 ед.) обусловлен взрывным ростом фитопланктона. Летом показатель снижается до 3742.60 ед.за счет

зоопланктона и рыб. Осенью уязвимость умеренная (2118.22 ед.) с доминированием фитопланктона и зоопланктона.

Остров Колгуев показывает умеренные значения с весенним пиком. Зимняя уязвимость (740.72 ед.) формируется зообентосом и рыбами. Весной показатель достигает 8865.20 ед. благодаря фитопланктону. Летом значение снижается до 2689.47 ед. за счет зоопланктона и фитопланктона. Осенью уязвимость составляет 1985.97 ед. с преобладанием фитопланктона и зоопланктона.

Архипелаг Новая Земля отличается стабильной уязвимостью. Зимой показатель (2417.91 ед.) определяется зообентосом и рыбами. Весной пик (5679.35 ед.) связан с фитопланктоном. Летом уязвимость (4147.48 ед.) формируется зоопланктоном (1852.50) и зообентосом. Осенью значение (3762.48 ед.) обеспечивается фитопланктоном и зообентосом.

Прибрежная зона Печорского моря демонстрирует умеренные значения. Зимняя уязвимость (2061.76 ед.) определяется зообентосом. Весенний максимум (7958.54 ед.) связан с фитопланктоном. Летом показатель снижается до 3733.29 ед. за счет зоопланктона и зообентоса. Осенью уязвимость (2726.54 ед.) формируется зообентосом и зоопланктоном.

Коэффициенты загрязнения (PM) существенно влияют на региональные различия. Побережье Кольского полуострова (PM=0.65) демонстрирует усиление рисков из-за хронического превышения ПДК углеводородов (45 мкг/л). На полуострове Канин (PM=0.5625) и острове Колгуев (PM=0.465) загрязнение увеличивает уязвимость в 1.56 и 1.46 раза соответственно. Архипелаг Новая Земля (PM=0.1875) и прибрежная зона Печорского моря (PM=0.09) наименее подвержены влиянию загрязнения.

Пространственное распределение рисков показывает доминирование западной части моря (побережье Кольского полуострова — 52% суммарной

уязвимости), восточной части (полуостров Канин и остров Колгуев — 33%) и центральной зоны (архипелаг Новая Земля и Печорское море — 15%).

Расчет относительной интегральной уязвимости:

Методологический подход к расчету остается идентичным процедуре определения абсолютной интегральной уязвимости, однако специфика заключается в применении формулы 2.3.5 на этапе вычисления относительной интегральной уязвимости.

Таблица 3.4 – Итоговые значения относительной интегральной экологической уязвимости

Сезон/Регион	арх. Новая Земля	Кольский п-ов	поб.Печорского моря	п-ов Канин	о.Колгуев
Зима	1,38	4,00	1,17	0,45	0,42
Весна	3,24	10,00	4,53	5,38	5,05
Лето	2,36	6,60	2,13	2,13	1,53
Осень	2,14	6,68	1,55	1,21	1,13

Относительная интегральная уязвимость, рассчитанная в безразмерной шкале от 0 до 10, позволила выявить ключевые регионы и сезоны, требующие приоритетного внимания в контексте нефтяного загрязнения. Нормирование данных к максимальному значению абсолютной уязвимости (17557.34 ед. для побережья Кольского полуострова весной) показало, что экологические риски распределены крайне неравномерно.

Побережье Кольского полуострова выделяется как зона хронически высокого риска. Весной относительная уязвимость здесь достигает максимального значения 10, что связано с сочетанием пиковой биомассы фитопланктона (2500 мкг/л), активностью рыбных ресурсов (580 кг/час) и значительным загрязнением (РМ=0,65). Летом и осенью показатели снижаются до 6,60 и 6,68, оставаясь в критической зоне из-за устойчивого вклада зоопланктона и рыб. Даже зимой уязвимость сохраняется на уровне 4 – выше, чем весенние значения большинства других регионов.

Полуостров Канин и остров Колгуев демонстрируют сезонную уязвимость с весенними пиками 5,38 и 5,05 соответственно. Эти значения обусловлены цветением фитопланктона и умеренным загрязнением (РМ=0,56–0,47). Летом и осенью риски снижаются до умеренных (2,13–1,21), а зимой падают до минимальных значений (0,45–0,42) благодаря ледовому покрову, ограничивающему биологическую активность.

Архипелаг Новая Земля и прибрежная зона Печорского моря характеризуются стабильно умеренными рисками. Максимальные значения наблюдаются весной и не превышают 3,24 и 4,53, что связано с низким уровнем загрязнения (РМ=0,09–0,19) и доминированием зообентоса, менее чувствительного к нефтяному воздействию. Зимой уязвимость в этих регионах минимальна (1,38–1,17), что делает их потенциальными эталонными зонами для мониторинга естественных процессов.

Сезонная динамика подтверждает, что весна — наиболее критичный период для всей акватории. В это время 80% регионов переходят в зону высокой или критической уязвимости. Летом и осенью риски снижаются на 30–50%, но остаются значительными в западной части моря. Зимой экосистемы всех регионов демонстрируют минимальную уязвимость, однако антропогенная нагрузка в виде хронического загрязнения сохраняет угрозу для побережья Кольского полуострова.

3.1. Анализ интегральной уязвимости Баренцева моря от нефтяного загрязнения

Для построения карт рассчитанные значения абсолютной и относительной интегральной экологической уязвимости были ранжированы с использованием всей выборки значений на 4 ранга, уровни уязвимость и их диапазоны значений (табл. 3.1.1, табл. 3.1.2.) Ранжированные значения отображены в таблице 3.1.3, которая подходит и для абсолютной, и для относительной уязвимости.

Таблица 3.1.1 – Диапазоны значений для рангов абсолютной интегральной уязвимости

Ранг	Уровень уязвимости	Диапазон значений
1	Низкая	≤2343,0
2	Умеренная	2343,1–3752,5
3	Высокая	3752,6–8185,2
4	Критическая	>8185,2

Таблица 3.1.2 – Диапазоны значений для рангов относительной интегральной уязвимости

Ранг	Уровень уязвимости	Диапазон значений
1	Низкая	0 – 1,5
2	Умеренная	1,5 – 3,0
3	Высокая	3,0 – 6,0
4	Критическая	6,0 – 10,0

Таблица 3.1.3 – Результаты ранжирования по регионам и сезонам для абсолютной и относительной интегральной уязвимости

Сезон/Регион	арх. Новая Земля	Кольский п-ов	поб.Печорского моря	п-ов Канин	о.Колгуев
Зима	2	3	1	1	1
Весна	3	4	3	4	4
Лето	3	4	2	2	2
Осень	3	4	2	1	1

В результате по итоговым рассчитанным значениям абсолютной и относительной интегральной экологической уязвимости, которые были ранжированы, построили карты по сезонам, на которых визуально можно проанализировать уязвимость каждой рассматриваемой прибрежной территории Баренцева моря (рис. 3.1).

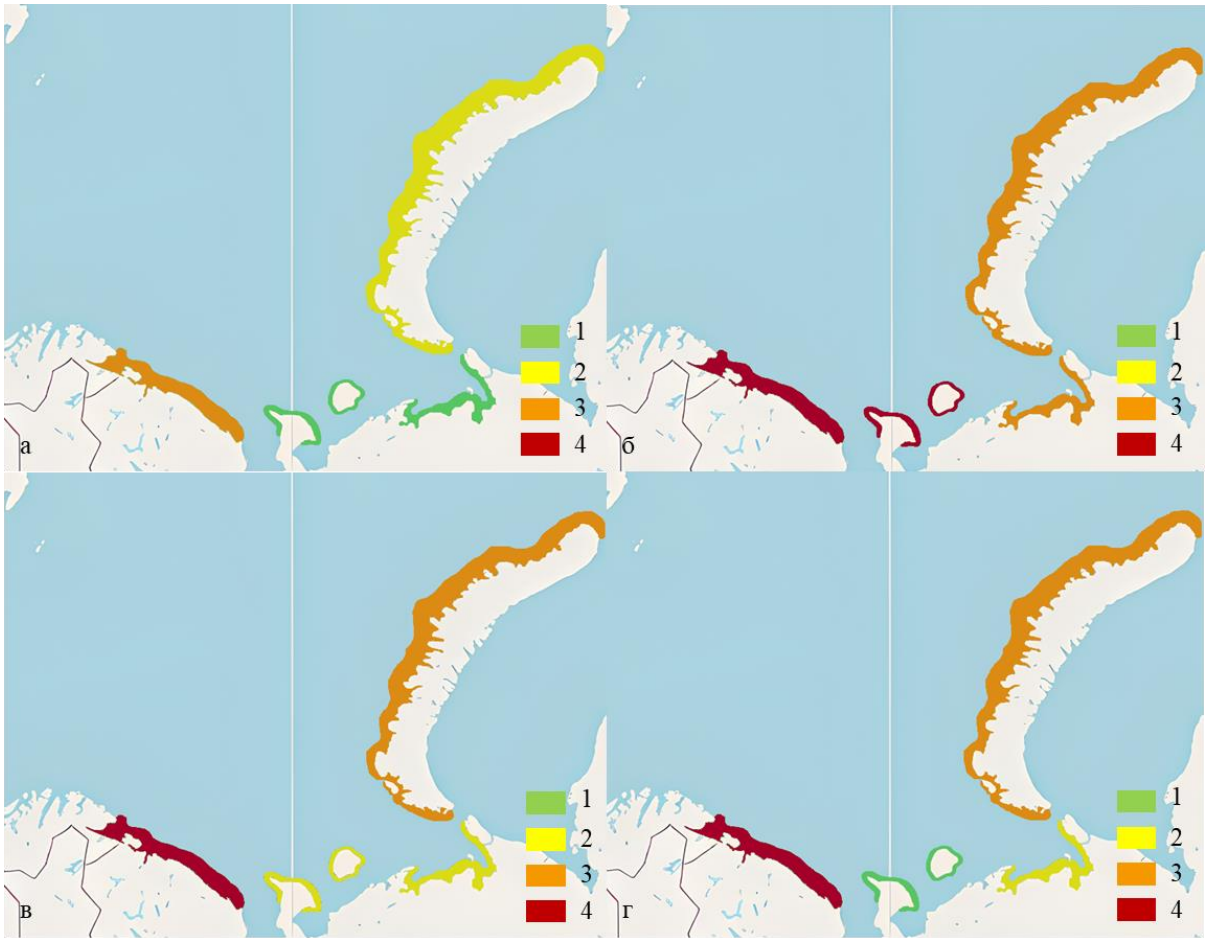

Рисунок 3.1 – Карты интегральной уязвимости для прибрежных зон Баренцева моря: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень.

Картографический анализ сезонных карт интегральной экологической уязвимости Баренцева моря (рис. 3.1) демонстрирует выраженные закономерности пространственно-временного распределения экологических рисков в прибрежных зонах.

Побережье Кольского полуострова характеризуется устойчиво высокой уязвимостью на протяжении года. Зимой этот регион демонстрирует высокую уязвимость, а в весенний, летний и осенний периоды достигает критического уровня. Такая стабильно высокая уязвимость обусловлена сочетанием интенсивной антропогенной нагрузки (судоходство, нефтегазовая деятельность), высокой концентрации промысловых видов рыб и повышенного содержания углеводородов (РМ=0,65) даже в зимний период.

Архипелаг Новая Земля проявляет меньшую сезонную вариабельность. Зимой этот регион имеет умеренную уязвимость, а в остальные сезоны стабильно сохраняет высокий уровень. Это связано с присутствием колоний морских птиц и млекопитающих, круглогодичной чувствительностью уникальных бентосных сообществ и относительно низким антропогенным загрязнением (PM=0,118).

Восточные регионы - полуостров Канин и остров Колгуев - демонстрируют наиболее выраженную сезонную изменчивость. Зимой и осенью эти территории характеризуются низкой уязвимостью, что связано с ледовым покровом и сниженной биологической активностью. Весной происходит резкий переход к критической уязвимости из-за массового нереста рыб, миграции морских млекопитающих и птиц. Летом уязвимость снижается до умеренного уровня.

Прибрежная зона Печорского моря (юго-восточная часть карт) показывает сложную динамику уязвимости. Зимой регион находится преимущественно в категории низкой уязвимости, весной резко переходит к критическому уровню, летом и осенью постепенно снижается до умеренной уязвимости. Такие колебания отражают влияние сезонного цветения фитопланктона, миграционных процессов и ледового режима.

Зима является периодом относительной стабильности, когда большинство регионов демонстрируют низкую или умеренную уязвимость. Исключение составляет побережье Кольского полуострова с высоким уровнем риска, что требует постоянного мониторинга и контроля судоходства даже в зимний период.

Весна становится сезоном максимальной уязвимости, когда практически все прибрежные зоны переходят в категорию высокого или критического риска. Это период наиболее строгих ограничений хозяйственной деятельности, особенно в районах нереста рыб и миграции птиц.

Лето характеризуется сохранением высокой уязвимости в западных районах (Кольский полуостров, Новая Земля) при снижении рисков в восточной части моря. Это позволяет дифференцировать природоохранные меры, сосредоточив их в зонах повышенного риска.

Осень демонстрирует постепенное снижение уязвимости в восточных регионах при сохранении критического уровня на Кольском полуострове. Это период, когда можно планировать восстановительные мероприятия в наименее уязвимых зонах.

Прибрежная зона Печорского моря (юго-восточная часть карт) показывает сложную динамику уязвимости. Зимой регион находится преимущественно в категории низкой уязвимости (ранг 1, зеленая окраска), весной (рис. б) резко переходит к критическому уровню (ранг 4), летом и осенью (рис. в, г) постепенно снижается до умеренной уязвимости (ранг 2, желтая окраска). Такие колебания отражают влияние сезонного цветения фитопланктона, миграционных процессов и ледового режима.

Пространственный анализ показывает четкую градацию уязвимости с запада на восток: максимальные риски сосредоточены в западной части моря (Кольский полуостров), умеренные - в центральной и северной частях (архипелаг Новая Земля), а восточные районы характеризуются наибольшей сезонной изменчивостью. Такое распределение обусловлено сочетанием антропогенных факторов (интенсивность судоходства, близость промышленных центров) и природных особенностей (распределение биомассы, гидрологические условия).

Наиболее уязвимыми являются мелководные прибрежные акватории с высокой биопродуктивностью, особенно в периоды репродуктивной активности морских организмов. Глубоководные участки и районы с устойчивым ледовым покровом демонстрируют более низкие показатели экологической уязвимости.

Затем карты интегральной уязвимости прибрежных зон Баренцева моря были совмещены с действующими ООПТ (рис. 3.2).

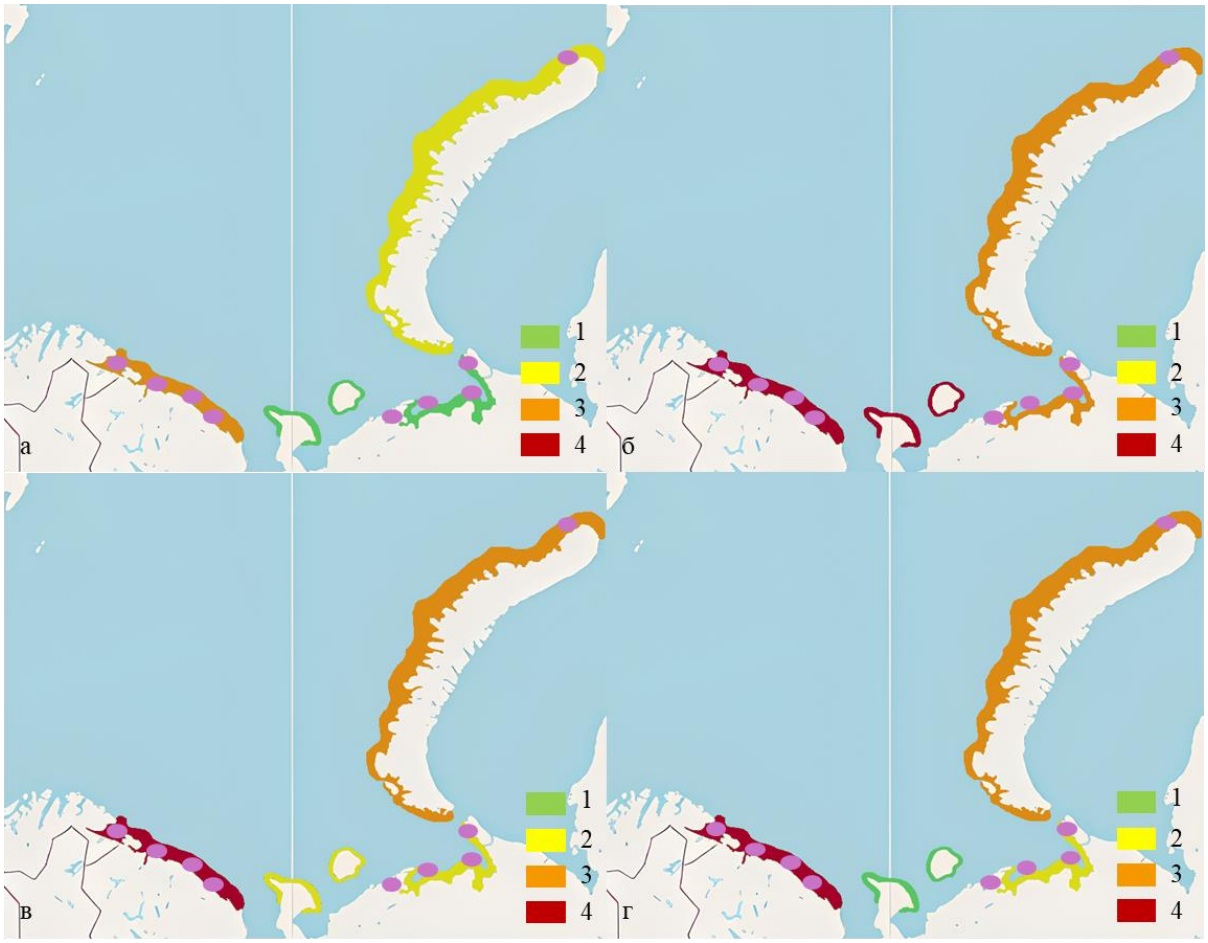

Рисунок 3.2 – Карты интегральной уязвимости для прибрежных зон Баренцева моря: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. На карте действующие ООПТ обозначены розовыми кругами.

Мы можем заметить, что большинство ООПТ расположено в районах наибольшей уязвимости акватории от разливов нефти (рис. 3.2).

Данный метод анализа интегральной экологической уязвимости, который основан на ранжировании итоговых значений и сочетает в себе биологические показатели, уровень загрязнения и сезонные факторы. Его ключевое преимущество – простота интерпретации: цветовые карты с градацией от зеленого до красного позволяют быстро выделить зоны риска,

такие как побережье Кольского полуострова, где уязвимость достигает критического уровня (ранг 4) весной, летом и осенью. Метод достаточно гибкий – коэффициенты можно адаптировать под специфику регионов. Однако ему присущи ограничения: субъективность в выборе весовых коэффициентов, игнорирование динамики нефти (распространение, седиментация); не учет гидрометеорологических факторов (температура, течения, волнение); отсутствия достаточных сведений о численности и биомассе биологических компонентов, а также содержании нефтяных загрязнений (содержание УВ, ПАУ), из-за чего использование ГИС-технологий было недоступно.

Сравнение с альтернативными методами:

1. Метод PSSR учитывает не только экологические, но и социально-экономические факторы (рыболовство, туризм), а также восстановление экосистем. Однако он сложнее в реализации, так как требует ГИС-анализа и данных по инфраструктуре [34].
2. Интеграция динамических данных моделирует поведение нефти в воде, что полезно для прогнозирования конкретных сценариев разлива, но требует гидродинамических расчетов и не дает простой ранжированной оценки [24].
3. Пространственный подход анализирует частоту исторических разливов и плотность портов, создавая heat-карты риска, но не оценивает экологическую чувствительность видов [29].
4. Структурно-стрессовая модель разделяет уязвимость на ценность экосистемы и воздействие нефти, но сложна в настройке и не адаптирована для сезонных изменений [33].

Метод, примененный в данной работе эффективен для оперативного управления рисками в условиях нехватки данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выполнена комплексная оценка интегральной экологической уязвимости прибрежных зон Баренцева моря к нефтяному загрязнению и построены сезонные карты уязвимости для пяти ключевых регионов. Анализ охватил побережье Кольского полуострова, полуостров Канин, остров Колгуев, архипелаг Новая Земля и прибрежную зону Печорского моря.

Адаптирована методика оценки интегральной экологической уязвимости морских акваторий, основанная на системе индексов чувствительности ESI и российских разработках Мурманского морского биологического института. Сформулировано определение уязвимости применительно к арктическим морским экосистемам как многокомпонентного показателя, характеризующего способность экосистем сохранять структурную и функциональную организацию в условиях нефтяного загрязнения с учетом специфических климатических условий региона.

Проведен детальный анализ сезонной динамики шести основных групп биоты: фитопланктона, зоопланктона, ихтиофауны, зообентоса, морских птиц и морских млекопитающих. Рассчитаны коэффициенты чувствительности для каждой группы организмов на основе четырех критериев: трофического уровня, способности к биоаккумуляции, репродуктивной уязвимости и эндемичности.

Установлено, что наибольшей уязвимостью к нефтяному загрязнению характеризуются морские млекопитающие (коэффициент чувствительности 7,9) и морские птицы (7,5), что обусловлено их положением на вершине пищевых цепей и высокой способностью к биоаккумуляции токсикантов. Рыбы демонстрируют высокую уязвимость (6,1), особенно на ранних стадиях развития.

Выявлены значительные различия в уровне экологических рисков между исследованными регионами. Побережье Кольского полуострова характеризуется критической уязвимостью на протяжении большей части года (весна - 17557,34 ед., лето - 11597,47 ед., осень - 11734,49 ед.), что обусловлено высокой антропогенной нагрузкой и коэффициентом загрязнения PM=0,65.

Полуостров Канин и остров Колгуев демонстрируют выраженную сезонную изменчивость с весенними максимумами уязвимости (9454,15 и 8865,20 ед. соответственно) и минимальными зимними значениями. Архипелаг Новая Земля и прибрежная зона Печорского моря характеризуются стабильно умеренными показателями уязвимости благодаря низкому уровню загрязнения.

Весенний период является наиболее критичным для всей акватории Баренцева моря, когда практически все прибрежные зоны переходят в категорию высокого или критического риска. Это связано с массовым цветением фитопланктона, нерестовыми миграциями рыб и активизацией морских птиц и млекопитающих.

Зимний сезон характеризуется минимальной биологической активностью и наименьшими показателями уязвимости во всех регионах, за исключением побережья Кольского полуострова, где антропогенная нагрузка остается значительной даже в условиях ледового покрова.

Проанализированы основные источники нефтяного загрязнения, включая шельфовую добычу углеводородов, морской транспорт и портовую инфраструктуру. Максимальные концентрации углеводородов (до 60 мкг/л) зафиксированы в прибрежных водах Кольского полуострова и полуострова Канин.

Построены сезонные карты интегральной экологической уязвимости с ранжированием от 1 (низкая) до 4 (критическая уязвимость). Карты обеспечивают наглядную визуализацию зон риска и могут использоваться

управленческими структурами для принятия решений по природоохранным мероприятиям без специализированных компетенций.

Результаты исследования указывают на необходимость дифференцированного подхода к управлению экологическими рисками с учетом пространственных и временных факторов. Побережье Кольского полуострова требует постоянного мониторинга и усиленных природоохранных мер. Восточные регионы нуждаются в особом внимании в весенний период.

Полученные материалы могут служить начальной основой для разработки природоохранных мероприятий, планирования судоходства и создания системы экологического мониторинга Баренцева моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арашкевич Е.Г. Зоопланктон Баренцева моря // Система Баренцева моря / под ред. акад. А.П. Лисицына. – М.: ГЕОС, 2021. – С. 332–351.
2. Блиновская Я.Ю., Мазлова Е.А., Лаппо А.Д., Мартынов В.Г. Геолого-экологические аспекты освоения морских акваторий России: теория, практика, перспектива: монография. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2020.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 1. Баренцево море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Ф. С. Терзиева [и др.]. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1990. – 280 с.
4. Деев М.Г., Баранчиков Е.В. Баренцево море // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. – URL: https://bigenc.ru/c/barentsevo-more-37b31a/?v=7838722 (дата обновления: 13.07.2023).
5. Денисенко С.Г., Денисенко Н.В. Зообентос Баренцева моря // Система Баренцева моря / под ред. акад. А.П. Лисицына. – М.: ГЕОС, 2021. – С. 352–369.
6. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2022 / под ред. Коршенко А.Н. – М.: ФГБУ «ГОИН», 2024. – С. 169–171.
7. Клепиковский Р.Н., Ившин В.А., Трофимов А.Г. Особенности распределения и условий обитания китообразных в Баренцевом море (2004–2021) // Труды ВНИРО. 2024.
8. Лучшее время для ловли трески в Баренцевом море // Рыбаклёв. – URL: https://joyfish.ru/blog/articles/luchshee-vremya-dlya-lovli-treski-v-barentsevom-more/ (дата обращения: 01.05.2025).
9. Макаревич П.Р. Первичная продукция Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2012. Т. 15, № 4. С. 786–788

10. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). – Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2014. – 256 с. – ISBN 978-5-4358-0080-7.
11. Моря СССР. Баренцево море // Моря СССР: физико-географическая характеристика. – URL: https://tapemark.narod.ru/more/12.html (дата обращения: 08.03.2025).
12. Национальный атлас России. Баренцево море. – URL: https://nationalatlas.ru/tom2/264.html (дата обращения: 28.01.2025).
13. Немировская И.А., Титова А.М., Храмцова А.В. Углеводороды в водной толще и донных осадках Баренцева моря // Система Баренцева моря. – М.: ГЕОС, 2021. – Гл. 10.1.
14. Паутова Л.А. Фитопланктон Баренцева моря // Система Баренцева моря. – М.: ГЕОС, 2021. – С. 317–330.
15. Паутова Л.А., Силкин В.А., Кравчишина М.Д., Якубенко В.Г., Чульцова А.Л. Летний фитопланктон северной части Баренцева моря (75–80º N) // Экология гидросферы. 2019. № 2(4). – С. 8–19. URL: http://hydrosphere-ecology.ru/176 (дата обращения: 08.05.2025).
16. Пестов С.В. "Зоологический журнал" – статьи по жесткокрылым за 45 лет: 1968–2012 гг. – URL: https://www.zin.ru/Animalia/Coleoptera/eng/zoolzh45.htm (дата обращения: 21.12.2024).
17. Промысловые рыбы России: В 2 т. / под ред. Гриценко О.Ф. и др. – М.: ВНИРО, 2006. – Т. 2. – С. 931–934.
18. Спиридонов В.А., Соловьёв Б.А., Онуфреня И.А. Пространственное планирование сохранения биоразнообразия морей Российской Арктики. – М.: WWF России, 2020. – 376 с.
19. Титов О.В., Лепесевич Ю.М., Педченко А.П. и др. Особенности экосистемы Баренцева моря. – URL: https://helion-ltd.ru/sovremennoe-sostoyanie-i-tendencii-izmeneniya-ekosistemy-barenceva-morya/ (дата обращения: 21.04.2025).

20. Трофимов А.Г., Ярагина Н.А., Ившин В.А. и др. Распределение трески в Баренцевом море в условиях изменяющегося климата // Труды ВНИРО. 2023. Т. 192. – С. 68–84. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-192-68-84.
21. Трофимова В.В., Олейник А.А., Макаревич П.Р. Фотосинтетические пигменты фитопланктона Кольского залива // Вестник МГТУ. 2006. Т. 9, № 5. – С. 779–784.
22. Фитопланктон Баренцева моря // Баренцево море: продукционные процессы. – URL: https://barenzevo.arktikfish.com/produktsionn/fitoplankton (дата обращения: 05.01.2025).
23. Шавыкин А.А., Ильин Г.В. Оценка интегральной уязвимости Баренцева моря от нефтяного загрязнения. – Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2010. – 110 с.
24. Шавкин А.А., Карнатов А. Картографирование экологической уязвимости морских прибрежных зон к разливам нефти: предварительный метод, примененный к Кольскому заливу, Баренцево море: электрон. журн. – 2019. – Т. 7, № 7. – Статья 216. – URL: https://www.mdpi.com/2077-1312/7/7/216 (дата обращения: 01.06.2025).
25. Шилин М.Б., Погребов В.Б., Мамаева М.А. и др. Уязвимость экосистем береговой зоны Финского залива к дреджингу // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 25. – С. 107–121.
26. Шипилов Э.В., Шкарубо С.И. Тектоника баренцевоморской континентальной окраины // Система Баренцева моря. – М.: ГЕОС, 2021. – С. 11–25. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(4).
27. Barents Sea LME – Factsheet // PAME. – URL: https://pame.is/images/03_Projects/EA/LMEs/Factsheets/5_Barents_Sea_LME_revised.pdf (дата обращения: 15.03.2025).
28. Fall J., Skern-Mauritzen M. White-beaked dolphin distribution and association with prey in the Barents Sea. Marine Biology Research. 2014. Vol. 10(10). P. 957–971.

29. Kreber D., Coldenhoff Y., Pool D. Модель частоты разливов для оценки рисков судовых нефтеразливов. – Maritime Research Institute Netherlands, 2017. – 12 с. URL: https://www.marin.nl/api/marin/ (дата обращения: 01.06.2025).
30. Netherlands Journal of Sea Research. 1991. Vol. 27, Issues 3–4. – P. 407–422.
31. Spitsyn V.M., Glazov P.M., Anufriev V.V. et al. An updated annotated list of birds of the Novaya Zemlya archipelago // Biharean Biologist. 2020. Vol. 14(2). – P. 98–104.
32. UNEP Press Release. – URL: https://press.un.org/en/2004/unep244.doc.htm (дата обращения: 08.06.2025).
33. Zhang S., Zhang C., Chen S. et al. Оценка уязвимости прибрежных водно-болотных угодий эстуария Хуанхэ // Frontiers in Marine Science. 2024. Vol. 11. – Статья 1481868. URL: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2024.1481868/full (дата обращения: 01.06.2025).