

Степаньян Олег Владимирович

**ВЛИЯНИЕ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА МАКРОФИТЫ БАРЕНЦЕВА,
ЧЕРНОГО, АЗОВСКОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

03.02.10 - «гидробиология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Севастополь – 2021

Работа выполнена в лаборатории прикладной океанографии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»

Научный консультант:

Григорий Михайлович Воскобойников, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией альгологии Мурманского морского биологического института РАН

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки
Титлянов Эдуард Антонинович
Национальный научный центр морской биологии им. Жирмунского ДВО РАН – ИБМ, главный научный сотрудник

доктор биологических наук, профессор
Шошина Елена Васильевна
РОО «Санкт-Петербургское Общество Естествоиспытателей», главный научный сотрудник

доктор биологических наук
Корнева Людмила Генриховна
Институт биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина РАН, зав. лабораторией альгологии

Ведущая организация: Камчатский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)

Защита состоится “ 18 ” мая 2021 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 900.009.01 при ФГБУН “Федеральный исследовательский центр Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН” по адресу: 299011 г. Севастополь, пр. Нахимова – 2. e-mail: dissovet@ibss-ras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН “Федеральный исследовательский центр Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН” по адресу: 299011 г. Севастополь, пр. Нахимова – 2. и на сайте по адресу: <https://ibss-ras.ru/science/dissertation-council/announcement/1039/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат биологических наук

Наталья Валериевна Поспелова

Актуальность работы

Макрофиты (макроводоросли и травы) являются важными компонентами прибрежных морских экосистем, формирующими высокопродуктивные сообщества. В северных и южных морях России макрофиты дают до 60% первичной продукции (Водоросли..., 1989; Блинова, 2007), к тому же, часть видов имеют важное промысловое значение. Видовой состав подводных фитосообществ, пространственное и вертикальное распределение, особенности экологии и физиологии отдельных видов определяются океанологическими факторами. Значительное влияние на указанные параметры оказывают также климатические изменения и уровень загрязнения морской среды, вследствие чего макрофиты и бентосные сообщества являются хорошими биомаркерами климатических и антропогенных изменений (Sherman et al., 2005; Merzouka, Johnson, 2011; Węśławski et al., 2011; Sjøtun et al., 2015; Van de Poll et al., 2016).

В настоящее время одна из глобальных экологических проблем – это нефтяное загрязнение вод Мирового Океана. Основные источники поступления антропогенных углеводородов в морскую среду – сбросы судами балластных и технических вод, катастрофы на нефтедобывающих платформах и аварии нефтяных танкеров, речной сток. Интерес к проблеме влияния разливов нефти на природные биоценозы возник около 100 лет назад, но основное внимание специалистов было сфокусировано на этом вопросе после крупных катастроф – крушения танкеров: «Торри Каньон» возле берегов Великобритании (1967 г.), «Амоко Кадиз» у атлантического побережья Франции (1978 г.), «Эксон Вальдез» у берегов Аляски (1989 г.), крупнейшего за последние десятилетия разлива нефти при взрыве нефтедобывающей платформы в Мексиканском заливе (2010 г.). За последние 20 лет произошел ряд разливов нефтепродуктов в морских акваториях России, крупнейший из которых – в Керченском проливе в ноябре 2007 г. Выводы, полученные в результате исследования последствий подобных катастроф, были различны: от минимальных последствий до катастрофических изменений и полной деградации прибрежных экосистем. Практически всегда оценка различалась в зависимости от типа анализируемой экосистемы (Lobban et al., 1985; Robinson et al., 2013).

Практически весь российский шельф, в том числе и внутренних морей, перспективен для добычи нефтеуглеводородов (Патин, 2017). Поскольку уровни содержания нефтепродуктов на большей части акватории южных морей России и некоторых участках Баренцева моря (Кольский залив, Печерское море) значительно превышают ПДК (Немировская, 2013; Матишов и др., 2013; Немировская, 2017; Немировская, Островская, 2018; Немировская и др., 2019), то исследование отклика макрофитов на нефтяное загрязнение представляется весьма актуальным.

Активное хозяйственное освоение шельфа происходит на фоне глобальных климатических изменений. Для южных и северных морей России характерны многолетние циклические

колебания температуры, солености, прозрачности вод. Отметим, что выявление факторов среды цикличной природы – отдельная научная задача в океанологии и гидробиологии. В настоящее время имеются достаточно полные многолетние (около 150 лет) ряды достоверных наблюдений за температурой и соленостью морей европейской части России, менее длинные ряды наблюдений (50–70 лет) – за прозрачностью (мутностью) вод и гидрохимическими параметрами водной среды (в том числе по содержанию углеводородов нефти в морской воде и донных осадках) (Атлас климатических изменений..., 2014; база данных Мирового центра данных по океанографии NOAA (<http://www.nodc.noaa.gov>); база данных Единой (российской) государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) (<http://data.oceaninfo.ru>).

Если говорить о прибрежных акваториях европейской части России, то одна из сложных задач, стоящих перед исследователями, это – выявление многолетних изменений видового разнообразия и популяционных показателей макрофитобентоса на фоне происходящих в последние годы климатических изменений и антропогенного воздействия. Многолетние ряды наблюдений, в значительной степени фрагментированные, имеются только для крупных портовых акваторий, например, южной части Кольского залива, Новороссийской и Севастопольской бухт, или для акваторий, где был развит активный промысел водных биоресурсов (Филлофорное поле Зернова). Для других прибрежных участков морей такие данные или отсутствуют, или «разрывы» в наблюдениях достигают десятков лет. Например, для некоторых участков побережья Баренцева моря повторные альгологические исследования были проведены только в середине 2000 – начале 2010-х гг., через 100–150 лет после первых описаний фитобентоса. Масштабные исследования в южных морях России осуществлялись в конце 1960 – начале 1970 гг., позднее подобных исследований, «одномоментных» по времени и охватывающих значительные по площади и глубине акватории, не проводилось. Более того, несмотря на большое количество работ, затрагивающих различные аспекты экологии и биологии фитобентоса южных и северных морей европейской части России, результатам исследований реакции фитоценозов на современные изменения климата и нефтяное загрязнение посвящены лишь отдельные публикации, при этом количественные данные зачастую отрывочны или противоречивы.

Иными словами, комплексная оценка влияния климатических изменений и антропогенного воздействия (нефтяного загрязнения) на состояние фитоценозов морей европейской части России представляется весьма актуальной задачей.

Объект и предмет исследования.

Объект исследования - макрофиты (макроводоросли и травы) северных и южных морей России на разных уровнях организации: организменном, популяционном, сообществ.

Предмет изучения – отклик сообществ морских макрофитов на нефтяное загрязнение и климатические изменения.

Цель исследования – на основе натурных наблюдений, экспериментальных данных и математического моделирования выявить основные причины трансформации сообществ макрофитобентоса северных и южных морей России в ответ на нефтяное загрязнение и изменения климата и дать прогнозную оценку дальнейшего развития растительных сообществ в условиях роста загрязнения и динамики климатических изменений.

Постановка конкретных задач:

- выявить пространственные и временные изменения сообществ макрофитов северных и южных морей России при климатических изменениях и воздействии хронического нефтяного загрязнения;
- в экспериментальных условиях изучить устойчивость макрофитов на разных стадиях развития к нефтяному загрязнению;
- адаптировать математические модели к их использованию при изучении динамики пространственного распределения макрофитобентоса при изменении факторов окружающей среды и нефтяном загрязнении;
- методически обосновать возможность применения макроводорослей в экологическом мониторинге нефтегазовых компаний;
- разработать концептуальную схему устойчивости макрофитобентоса арктических и южных морей России к нефтяному загрязнению.

Методологические основы исследования.

Используя методологические подходы, разработанные отечественными и зарубежными океанологами и гидробиологами для концепции Больших морских экосистем (БМЭ) (Sherman, Matishovetal., 2005; Матишов, 2016), можно определить влияние климата и загрязнения на биологическое разнообразие и распределение макрофитов, построив прогностические модели «поведения» фитоценозов, оптимизировать управление биоресурсами, что существенным образом может влиять на социально-экономическую ситуацию конкретных прибрежных территорий российского Севера и Юга. В пределах российской экономической зоны находятся 12 признанных на международном уровне БМЭ. Две БМЭ – Баренцево море и Черное море, включая Азовское, рассматривается в данной работе, также как и Каспийское море, которое соответствует критериям БМЭ. Подход к изучению и управлению БМЭ опирается на пять блоков с условными названиями: “биопродуктивность”, “рыболовство”, “загрязнение морской среды и

“здоровье экосистемы”, “социально-экономическая ситуация” и “правовой режим и организация управления”. В работе нами оценивалось влияние на фитобентос климатических изменений и антропогенной деятельности. Экспериментальные исследования проводили по общей методологии, предложенной для исследования водорослей (на ранних стадиях развития) северных и умеренных морей (Воскобойников, 2006; Макаров, 2010). При математическом моделировании использовали пространственно-детализированные модели динамики водной и прибрежно-водной растительности (Бердников, 2004; Бердников и др., 2009, 2013).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Изменения океанографических факторов влияют на устойчивость фитоценозов к негативному антропогенному воздействию (нефтяному загрязнению), повышая или понижая уязвимость отдельных компонентов водорослевых сообществ.
2. Трансформация фитоценозов наиболее выражена в крупных портовых акваториях: Новороссийской бухте Черного моря и Кольском заливе Баренцева моря, что связано с совместным влиянием климатических изменений и загрязнением морской среды нефтепродуктами.
3. Крупнейший в новейшей российской истории разлив нефтепродуктов (мазута) в Керченском проливе в ноябре 2007 г. не оказал значительного влияния на функционирование сообществ макрофитов.
4. Макроводоросли разных таксономических групп отличаются степенью устойчивости к воздействию нефти и нефтепродуктов: наиболее устойчивы – фукусовые и ламинариевые, менее – ульвовые, бангиевые, церамиевые и пальмариевые. Водоросли на ранних стадиях развития максимально чувствительны к действию нефти и ее производных.
5. Морские макрофиты из загрязненных мест обитания более устойчивы к нефтяному воздействию, чем водоросли чистых мест.
6. Предложенная концептуальная схема устойчивости фитобентоса северных и южных морей России к нефтяному загрязнению и адаптированные математические модели позволяют прогнозировать долговременные изменения фитоценозов и ущерб водным биоресурсам при антропогенной нагрузке и изменении климата.

Научная новизна

На основе собственных исследований и анализа литературных данных описаны трансформации сообществ макрофитов в Новороссийской бухте Черного моря и Кольском заливе Баренцева моря, вызванные климатическими изменениями и хозяйственной деятельностью, в том числе нефтяным загрязнением. Впервые экспериментально определена устойчивость различных систематических групп макрофитов к действию нефти и

нефтепродуктов; устойчивость снижается в ряду: бурые (фукусовые, ламинариевые) → зеленые (ульвовые) → красные (бангиевые, церамиевые, пальмаривые) водоросли. Построены математические модели отклика водной растительности Баренцева, Азовского, Каспийского (северной части) морей на изменение факторов среды и нефтяное загрязнение. Впервые дан прогноз изменений состояния макрофитобентоса северных и южных морей России при сохранении имеющихся тенденций изменения климата и загрязнения, что необходимо при проведении эколого-инженерных мероприятий при комплексном освоении морского шельфа. Предложена концептуальная схема чувствительности (реакции) фитоценозов северных и южных морей России к воздействию нефтепродуктов, которая позволяет ранжировать вероятные негативные воздействия и показывает отклик фитосообществ.

Практическая ценность и теоретическое значение.

Сформулированы современные представления о влиянии нефтяного загрязнения на макрофиты. Предложены теоретические основы концептуальной схемы устойчивости фитобентоса арктических и южных морей России к нефтяному загрязнению. Адаптированные математические модели позволяют прогнозировать долговременные изменения и более точно произвести оценку ущерба водным биоресурсам при антропогенной нагрузке. Разработана концептуальная схема чувствительности сообществ макрофитов северных и южных морей России к нефтяному загрязнению выявляющая и описывающая сходные реакции макрофитов различных широт. Результаты работы рекомендуется использовать при организации экологического мониторинга и прогнозировании, при разработке мероприятий по реабилитации и охране водных ресурсов. Результаты разработок применяются в практической работе российских компаний - ООО «ФРЭКОМ», ООО «Новый формат», ООО «Событие».

Личный вклад соискателя. Автор принимал непосредственное участие в экспедиционном сборе и экспериментальных работах, обработке и анализе фактического материала. Научные идеи, обоснования, постановка научных задач, методические разработки принадлежат автору, что подтверждается самостоятельностью большинства публикаций.

Степень достоверности и апробация результатов. Фактическим материалом диссертации являются полевые и экспериментальные данные, полученные автором по стандартным и апробированным методикам. Полученный материал репрезентативен и согласуется с литературными данными. Результаты исследований были представлены на 62 международных и российских научных конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 статья в рецензируемых российских и международных изданиях, рекомендованных ВАК для представления материалов по защите докторских диссертаций, из них 10 статей в изданиях, индексируемых Scopus и WoS.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и выводов. Текст изложен на 267 страницах, содержит 35 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 545 наименований, в том числе 119 на иностранных языках.

Благодарность. Автор выражает благодарность научному консультанту профессору д.б.н. Г.М. Воскобойникову. Автор благодарен академику Г.Г. Матишову за многолетнюю поддержку исследований. Автор признателен д.г.н. С.В. Бердникову, к.т.н. В.В. Кулыгину, к.г.н. В.В. Сапрыгину без помощи которых результаты по математическому моделированию были бы невозможны. Полевые работы проведены при поддержке д.б.н. П.Р. Макаревича, д.б.н. Е.В. Шошиной, к.б.н. И.В. Рыжик, к.б.н. Н.И. Булышевой, к.б.н. И.В. Шохина, к.б.н. Г.В. Ковалёвой, Е.С. Матишовой. Автор признателен за ценные консультации в разные годы со стороны академика В.Н. Егорова (ФИЦ ИнБЮМ), д.б.н. М.В. Макарова (ММБИ РАН), д.б.н. В.В. Громова (ММБИ РАН), д.б.н. А.Н. Камнева (ИО РАН), д.б.н. В.Н. Никитиной (СПбГУ), д.г.н. А.А. Шавыкина (ММБИ РАН), к.б.н. Н.В. Евсеевой (ВНИРО), к.б.н. С.Е. Садогурского (НБСИ РАН). Особую благодарность выражаю ушедшим коллегам, чьи советы и наставления сыграли важную роль в работе – д.б.н. Л.Л. Кузнецову†, к.б.н. А.Р. Болтачёву†, к.б.н. Е.И. Блиновой†. Автор глубоко признателен чл.-корр. РАН Д.Г. Матишову† за поддержку исследований в течение многих лет.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Приведена физико-географическая характеристика районов исследований, включая оценку уровней антропогенной нагрузки. Освещены теоретические и практические наработки по изучению влияния нефтяного загрязнения на макрофиты. Проведен анализ опубликованных данных и выявлены слабоизученные направления исследований.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Полевые наблюдения

Отбор проб для определения видового состава фитоценозов, границ его распространения и условий обитания водной растительности производили в экспедициях в Новороссийской бухте Черного моря (июнь-июль 1995–2012 гг.), Кольском заливе и губе Зеленецкой Баренцева моря (июль-август 2000–2002 гг.), Керченском проливе (2003, 2004, 2005, 2007 (июль, ноябрь, декабрь), 2008 (февраль, апрель, июль, сентябрь), 2011 гг. Сравнение литоральных сообществ водорослей Баренцева моря (чистых и загрязненных участков побережья) проводили в начале 2000-х годов, когда эффект потепления для вод Кольского залива еще не был столь выраженным. Для качественной и количественной оценки распределения водорослей использовали стандартные гидробиологические методы: гидробиологические разрезы (до глубины 10 м) и пробные площадки (рамка 0,25 м²). Видовую принадлежность водорослей определяли на месте или в процессе камеральной обработки фиксированных проб по классическим определителям (Зинова, 1967; Виноградова, 1974, 1979; Определитель, 1980). В данной работе видовые названия представлены с учетом современных таксономических изменений (www.algaebase.org). Для оценки видового разнообразия применялся индекс Шеннона (Мэгарран, 1993).

Экспериментальные работы

Подготовка эмульсии нефти и нефтепродуктов

В экспериментах использовали концентрации нефти и нефтепродуктов (дизельное топливо, бензин), в несколько раз превышающие ПДК для рыбохозяйственных водоемов и характерные для загрязненных черноморских и баренцевоморских акваторий в современный период (5–50 мг/л в районе морских портов, 500 мг/л при залповых выбросах при авариях, например, в Керченском проливе в ноябре 2007 г).

В экспериментах с макрофитами Черного моря использовали малосмолистую, сернистую, парафиновую, с высоким выходом светлых фракций сырую нефть Ромашкинского месторождения (Республика Татарстан), которая транспортируется через порты Черного моря. В экспериментах с макрофитами Баренцева моря использовали малосмолистую, малосернистую, парафиновую, с высоким выходом светлых фракций сырую нефть Песчаноозерского месторождения (Архангельская область, о. Колгуев), которая в основном транспортируется морским транспортом в страны Европы и другие регионы.

Эмульсию сырой нефти в морской воде получали следующим образом: в склянку с притертой крышкой наливали 400 мл отфильтрованной морской воды (Баренцево море: соленость 32-33‰, $t_{\text{воды}} 8,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$, Черное море: соленость 18‰, $t_{\text{воды}} 18,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$), и добавляли нефть, получая объемные концентрации нефти в морской воде – 5, 10, 20, 30 мг/л. Смесь в течение 30 мин встряхивали на электрокачалке с частотой такта 3,6 качаний в секунду при температуре воздуха $9,0^\circ\text{C}$ в «северных» и $20,0^\circ\text{C}$ в «южных» экспериментах. Аналогично готовили эмульсию летнего судового дизельного топлива (концентрации 5, 10, 15 мг/л) и бензина с октановым числом 92 (концентрации 5, 20, 30, 50 мг/л). В ходе предварительных экспериментов было установлено, что максимальный объем нефти (сумма водорастворимой и эмульгированной фракций), который может быть эмульгирован без образования пленки на поверхности воды, при указанных условиях равен для нефти – 30, для дизельного топлива – 15, для бензина – 50 мг/л, что составило максимальные концентрации, используемые в экспериментах. Для экспериментов брали только свежеприготовленную смесь.

Виды и варианты лабораторных и натуральных экспериментов представлены в табл. 1.

При исследовании уровня нефтяного загрязнения южных морей определение общего содержания нефтепродуктов в морской воде проводили стандартным методом с экстракцией тетрахлорметаном, выделением углеводородных фракций методом колоночной хроматографии и ИК-регистрацией на концентратомере КН-2м (аналитическая лаборатория ЮНЦ РАН, оператор к.х.н. В.М. Харьковский).

Лабораторные эксперименты проводили в термостатированной комнате при температуре воздуха $9,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$, фотопериоде 24 ч, интенсивности освещения 100 Вт/м^2 . Температура морской воды составляла $8,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$. Эксперименты осуществляли в двух повторностях, каждое измерение – в трех аналитических повторностях.

Для всех экспериментов одновременно в аналогичных условиях был поставлен контроль (без добавления токсикантов).

Для расчета относительной скорости роста использовали формулу (Coombs et al., 1985):

$$\text{RGR} = (\ln A_2 - \ln A_1) / T * 100\%,$$

где A_1 – начальный размер объекта исследований, A_2 – конечный размер объекта исследований, T – время между начальным и конечным измерением, выражаемое в сутках.

Получение и обработку фотоизображений водорослей осуществляли с помощью программно-аппаратного комплекса (микроскоп ЕС БИММ Р-11-1, цветная цифровая видеокамера JVCTK-C1381).

Таблица 1- Виды и варианты лабораторных и натурных экспериментов

Лабораторные эксперименты			
Виды водорослей	Объект исследования	Параметры	Концентрации нефтепродуктов
<i>Ceramium virgatum</i> <i>Polysiphonia elongata</i> <i>Ulva intestinalis</i> <i>Cystoseira barbata</i>	2-3-дневные проростки	число клеток в нитевидном проростке, его длина и ширина. образование апикальных отростков, их длина и ширина. число клеток в нитевидном проростке, его длина и ширина длина ризоида проростка.	нефть – 10, 50, 500 мг/л
<i>Saccharina latissima</i> <i>Fucus vesiculosus</i> <i>Ulva prolifera</i>	зооспоры, эмбриоспоры, гаметофиты, ранние спорофиты антерозоиды, яйцеклетки, зиготы, проростки зиготы, проростки	степень подвижности и тип движения зооспор, рост и развитие эмбриоспор, гаметофитов и ранних спорофитов; степень подвижности и тип, движения антерозоидов, развитие зигот и рост проростков; развитие зигот и рост проростков.	нефть – 5, 10, 20, 30 мг/л летнее судовое дизельное топливо – 5, 10, 15 мг/л бензин с октановым числом 92 – 5, 20, 30, 50 мг/л
<i>Saccharina latissima</i> (возраст – 0+), <i>Fucus vesiculosus</i> <i>Fucus distichus</i> (возраст – 1+) <i>Ascophyllum nodosum</i> (возраст – 2+) <i>Palmaria palmata</i> <i>Porphyra umbilicalis</i>	высечки из зоны роста апикальные участки талломов апикальные участки талломов пролификации (8-10 см) талломы (10–12 см)	относительная скорость роста, фотосинтез, дыхание	
<i>Fucus vesiculosus</i> (возраст – 1+) из губы Зеленецкой и Мурманского морского порта	апикальные участки талломов		

Продолжение Таблицы 1			
Полевые эксперименты			
1. имитация условий при «полной» воде: пленка нефти (слик) плавает по поверхности воды, не соприкасаясь с макрофитами			
<i>Saccharina latissima</i> , (возраст – 0+), <i>Fucus vesiculosus</i> <i>Fucus distichus</i> (возраст – 1+) <i>Ascophyllum nodosum</i> (возраст – 2+)	целые талломы длиной 10-15см	фотосинтез, дыхание	нефть – 1.2% к объему воды
2. имитация условий при отливе: пленка нефти «накрывает» литоральные ванны с макрофитами			
<i>Fucus vesiculosus</i> (возраст – 1+) <i>Ascophyllum nodosum</i> (возраст – 1+)	целые талломы длиной 8-10 см	фотосинтез, дыхание	нефть – 1% к объему воды

Статистическая обработка материала – построение таблиц и графиков, расчет средних, стандартного отклонения, стандартной ошибки и коэффициента вариации проводили с использованием пакета программ STATISTICA 6.0. Различия считали достоверными на уровне значимости $p \leq 0,05$. Для визуализации данных использовали графики диаграмм размаха («ящик с усами»), изображающие одномерное распределение вероятностей. На графиках показаны средние значения и стандартное отклонение.

Методика модельных математических экспериментов

Для оценки возможного загрязнения прибрежной зоны **Баренцева моря** в результате аварийных ситуаций при транспортировке сырой нефти была использована усовершенствованная технология прогнозирования распространения и эволюции нефти в морской среде (Бирюков и др., 2011). Для определения риска загрязнения акватории и береговой зоны были подготовлены сценарии аварийных разливов в точках, расположенных через 25 км вдоль основных морских путей в Баренцевом море (Шавыкин и др., 2008). Расчеты выполнялись для каждого месяца в период август 2008 – июль 2009 гг. Каждый эксперимент представлял собой залповый сброс нефти в объеме 10 тыс. т в одной из выделенных точек в первые числа соответствующего месяца. В результате вычислительного эксперимента выполнялось деление пятна (слика) на 100 микропятен, каждое из которых или рассеивалось в водной толще, или достигало береговой линии и кромки льда, или же покидало границы акватории Баренцева моря.

Для оценки риска загрязнения береговой зоны *Азовского моря* использовалась система прогнозирования «EX-MARE» и входящая в нее математическая модель распространения нефти в морской среде (Бердников и др., 2015; Berdnikov et al., 2018). Были подготовлены сценарии аварийных разливов в точках, расположенных вдоль основных морских путей транспортировки грузов в Азовском море. Весь транспортный путь разделили на 81 участок, для каждого из которых рассчитали индекс опасности разлива нефти I_{os} , измеряемого в условных баллах (от 0 до 100), и пропорционального количеству судов, перевозящих нефтепродукты по указанному участку. На основе индекса опасности нефтеразливов в различные сезоны проводились модельные эксперименты для оценки возможного загрязнения береговой линии Азовского моря. В ходе расчетов был смоделирован ряд залповых сбросов нефтепродуктов (объемом 1000 т). Всего по 81 точке сброса и 8 направлениям ветра по основным румбам суммарно проведено 648 экспериментов. В дальнейшем выполнялось его деление на 100 микропятен, каждое из которых в результате вычислительного эксперимента или рассеивалось в водной толще, или достигало береговой линии. В результате каждого модельного эксперимента оценивалась территория загрязнения нефтью береговой зоны.

При нормировании степени устойчивости сообществ растений использовали принятые в подобных работах (Шахин, Пинаев, 2013; Шавыкин, Ильин, 2010) балльные оценки от 1 до 3, где 1 – малоустойчивые, 2 – устойчивые и 3 – высокоустойчивые сообщества. При оценке устойчивости учитывали видовой состав растительных сообществ, их проективное покрытие и биомассу, степень устойчивости к нефти.

Для анализа многолетней динамики водной и прибрежно-водной растительности *северной части Каспийского моря* использовали методы математического моделирования, совмещенные с ГИС-технологиями. Предложены две пространственно-детализированные математические модели динамики сообществ – водных (*Stuckenia pectinata* и *Zostera noltei*) и прибрежно-водных (*Phragmites australis*) растений (Бердников и др., 2009; 2017).

ГЛАВА 3 НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

3.1 Фитобентос крупных портовых акваторий: деградация в условиях хозяйственной деятельности и климатических изменений

3.1.1 Новороссийская бухта

Новороссийская бухта – крупнейшая бухта Черного моря, где более 150 лет функционируют крупнейший в регионе морской торговый порт и свыше 50-ти лет – нефтяной порт. Новороссийская бухта – это уникальный природный объект, для которого имеется документированные (но фрагментарные) наблюдения за фитобентосом за более чем 100-летний период. Предполагаемое по генеральной схеме реконструкции расширение Новороссийского порта практически на всю акваторию бухты неизбежно приведёт к росту загрязнения прибрежных вод и негативному влиянию на донные биоценозы.

В ходе наших исследований для летнего периода 2011 г. выявлено 102 вида водорослей: зеленых – 26, красных – 53, бурых – 23. По числу видов преобладали представители родов *Ulva*, *Cladophora*, *Ceramium*, *Polysiphonia*, *Ectocarpus*. Наибольшее видовое разнообразие отмечено для относительно чистых, удаленных от портовой акватории участков восточного и западного побережья. Индекс разнообразия Шеннона (H) для акватории порта составил 1,64, для западного берега 2,08, для восточного – 2,18. Отмечено преобладание поли- и мезосапробионтных видов тепловодного комплекса. Биомасса водорослей Новороссийской бухты изменялась в значительном диапазоне: 0,3 кг/м² в районе порта, 1,5–1,8 кг/м² в средней части бухты, 3–3,5 кг/м² – на выходе из бухты. Такие изменения количественных показателей водорослей можно объяснить различием в солености (в кутовой части бухты соленость 13,0–13,5, на остальной части – 17,6–18,2‰), хроническом загрязнении нефтяными углеводородами на акватории порта (в воде – 0,4–0,8, в донных осадках 0,88–0,94 мг/кг), большим содержанием взвеси в морской воде – 11,0–14,5 мг/л (фоновые значения в центре бухты 0,6 мг/л).

Видовое разнообразие фитобентоса Новороссийской бухты к началу 2010-х годов, в сравнении с концом 1960 - началом 1970-х гг., уменьшилось в 1,3–1,5 раза, в основном за счет холодноводной группы водорослей, и в настоящее время насчитывает от 102 до 125 таксонов (Теюбова, 2008; Теюбова, Мильчакова, 2011; Теюбова, 2012; Степаньян, 2014), при этом преобладают виды сапробиальных групп тепловодного комплекса. Значительно (в 3 раза по сравнению с 1960-ми гг.) сократились площади и биомасса цистозир – основного эдификатора и средообразующего вида зарослей средиземноморского типа (Рисунок 1). На большей части прибрежной зоны Новороссийской бухты сообщества формируются короткоциклическими сезонными видами. Уменьшились глубина произрастания, проективное покрытие и биомасса многолетних бурых и красных водорослей.

Такие изменения обусловлены, на наш взгляд, несколькими причинами. Основная причина связана с изъятием грунтов и строительством портовой инфраструктуры: фактически береговая линия на десятки километров оказалась «затянута» в бетон, что и привело к исчезновению типичных субстратов для развития бурых водорослей. Особенно наглядно это проявляется в районе Геопорта, где в ходе реконструкции и строительства базы ВМФ в 2008–2015 гг. практически полностью были утрачены естественные природные сообщества на твердых субстратах до глубины 5 м. На расположенных здесь бетонных гидротехнических сооружениях также формируются сообщества водорослей, но они характеризуются меньшим разнообразием и продуктивностью, чем фитоценозы естественных твердых субстратов. Негативное влияние на фитобентос Новороссийской бухты оказывает также расширение площадей дна, занятых иловыми отложениями с признаками сероводородного заражения, ограничивающими его распространение по глубине. Второй фактор – это долговременный тренд (100-летний) роста загрязнения: в 1920–1950-е гг. он был обусловлен действием сточных канализационных вод, с 1960-х гг. – нефтяного загрязнения, связанного с деятельностью нефтепорта «Шесхарис». С хозяйственной деятельностью связано увеличение мутности морской воды (строительство в береговой зоне, изменение маршрутов перемещения наносов).

В последние годы (с начала 2000-х гг.) изменение прозрачности вод в Черном море связывают с катастрофическим развитием кокколитофорид (Микаелян и др., 2011; Копелевич и др., 2012), которое, в свою очередь, обусловлено потеплением морских вод в указанный период. На наш взгляд, альгофлора Новороссийской бухты и особенно сообщества *Cystoseira* реагируют как на усиление антропогенного воздействия, наблюдавшегося в последнее десятилетие, так и на климатические изменения. Эффект потепления оказывает существенное влияние на фитобентос: доля холодноводного комплекса водорослей уменьшается, а тепловодного возрастает. Представители холодноводного комплекса, особенно арктическо-бореальной группы, сократили область распространения, большая часть видов водорослей перешла в категорию редких или исчезла.

Отметим, что уменьшение видового разнообразия холодноводного комплекса при одновременном увеличении разнообразия тепловодного комплекса макроводорослей – это глобальная тенденция, наблюдаемая в морях умеренного пояса Северного полушария (Merzouka, Johnson, 2011).

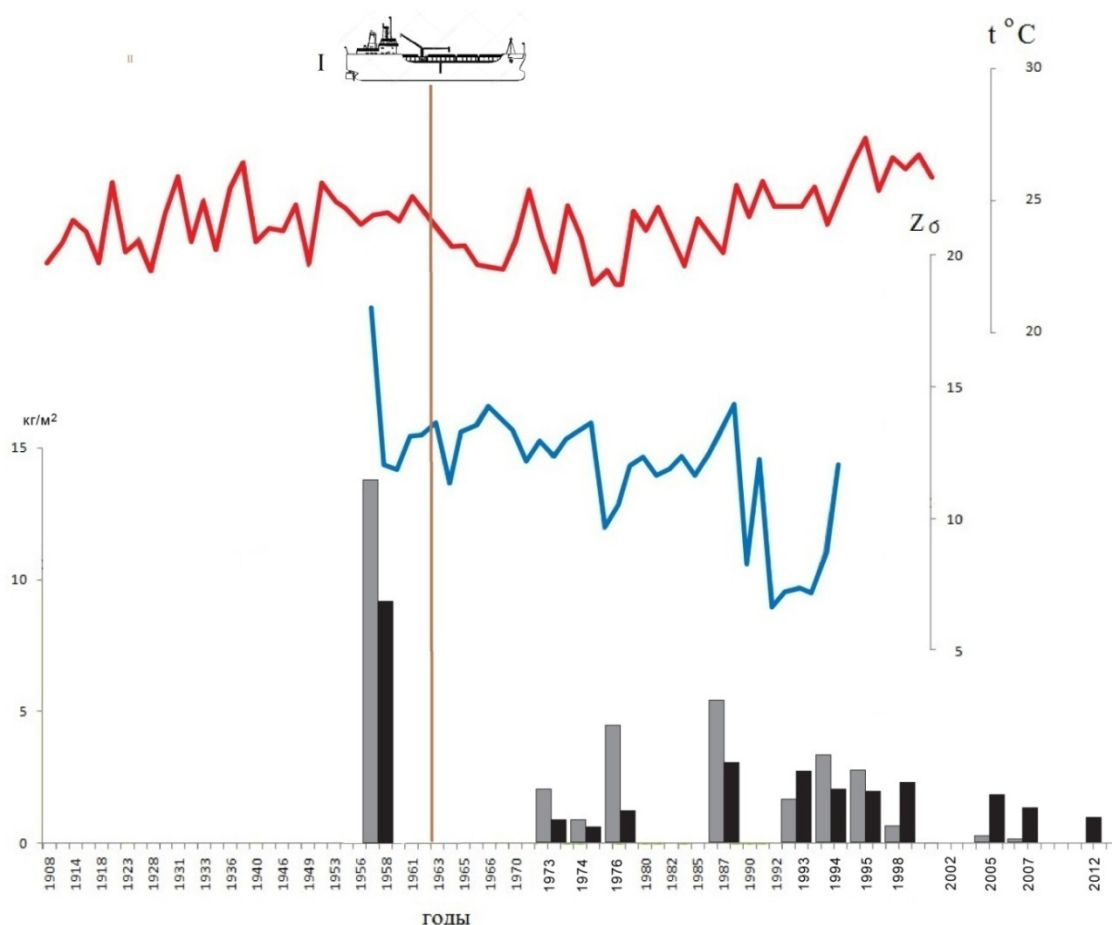


Рисунок 1 - Динамика биомассы *Cystoseira* у мыса Шесхарис на глубинах 1 м (1) и 3 м (2) [построено по данным: Громов, 1973, Калугина-Гутник, 1975, Громов, 1999; собственные данные], температура поверхностного слоя Черного моря (август) (по: Kontoyiannis et al., 2012); прозрачность морской воды в глубоководной части Черного моря (по: Кукушкин и др., 2013), I – начало работы нефтепорта «Шесхарис»

В последние годы негативные изменения характерны для фитобентоса как в западной части бухты, так и восточной. Дальнейшее расширение морского порта Новороссийска вдоль восточного берега бухты до мыса Дооб, Пенайских банок и бухты Кабардинка со строительством мощных портовых сооружений, в первую очередь нефтеперевалочных, выпускных коллекторов сточных вод в пос. Мысхако и Кабардинка, приведет к окончательной деградации подводной растительности этого уникального района Черного моря

3.1.2 Кольский залив

Кольский залив - наиболее освоенная акватория Баренцева моря, по его берегам находится множество хозяйственных объектов, предприятий, база Северного флота и крупнейший город русского Севера – Мурманск. Основная часть объектов, как и город, находятся в южном колене залива, сюда же втекает р. Кола. С 1990-х гг. поверхностные воды Кольского залива обозначаются как умеренно загрязненные (Доклад ..., 2015), при этом основной загрязнитель вод залива, многие годы негативно воздействующий на фитобентос, - это нефтяные углеводороды.

Наши исследования (Воскобойников, Степаньян, 2005; Макаров, Степаньян, 2009) и работы коллег (Малавенда, Малавенда, 2012; Малавенда и др., 2015, 2017, Шошина, Канищева, 2015; Капков, Шошина, 2018; и др.) показали, что в Кольском заливе существенные трансформации фитобентоса произошли ещё к началу 2000-х годов (отметим, что фактические наблюдения за динамикой фитобентоса и его изменениями с середины 1930-х до конца 1990-х гг. отсутствовали из-за недоступности акватории залива для научных исследований). Особенно негативные изменения выявлены в южном колене залива в районе Мурманского порта.

Сообщества фукусовых в Кольском заливе отличаются меньшим видовым разнообразием по сравнению с сообществами других, не загрязненных губ Мурманского побережья (губа Зеленецкая). Общая биомасса и численность водорослей в сообществах фукусовых в исследованных местах Кольского залива значительно варьирует. Масса водорослей в выборках или низкая (район моста г. Мурманск, кутовая часть залива) или может быть достаточно высокой (район пос. Абрам-мыс, пос. Белокаменка, центральная часть залива), приближаясь по значениям к таковым незагрязненных мест Баренцева моря (губа Зеленецкая). При этом высокая биомасса наблюдается при общей низкой численности растений или наоборот: низкая биомасса – при высокой численности растений.

Суммарная площадь поверхности растений в поселениях фукусовых варьирует от 2,8 до 37,6 м² на площади 1 м² литорали. По величине этого параметра можно говорить о зарослях водорослей как о подводных лесах. Этот показатель выше в 3 раза у растений за пределами залива по сравнению с таковыми из его кутовой части. При высоких значениях индивидуальной площади поверхности растений, обитающих в этих районах, плотность произрастания растений ниже, чем в естественных ненарушенных условиях. Кроме того, в Кольском заливе в сообществах фукусовых практически отсутствуют эпифиты (или их очень мало). От открытой части залива к кутовой прослеживается обеднение видового состава сообществ, образуемых фукусовыми, в том числе и доминирующих видов. В целом, видовое разнообразие сообществ фукусовых значительно выше в чистых районах мурманского побережья, к которым относится и губа Зеленецкая, поэтому можно ожидать, что суммарная площадь поверхности водорослей в сообществах ненарушенных мест обитания будет на порядок выше, чем в загрязненном Кольском заливе.

Изменение популяционных характеристик было проанализировано на примере поселений *Fucus vesiculosus* - фукуса пузырчатого, наиболее широко распространенного на литорали Кольского залива. Это – наиболее пластичный вид фукоидов, способный к выживанию в различных местообитаниях при большой вариации факторов среды (соленость, прибойность и т.д.).

Возрастная структура. Возраст *F. vesiculosus* определяли по числу дихотомических ветвлений, считая, что за год на центральной оси слоевища формируется два дихотомических ветвления (Максимова, 1980). Длинный возрастной ряд характерен для всех исследованных поселений *F. vesiculosus*. Различий в общей продолжительности жизни между макрофитами из разных мест обитания не обнаружено. Макроводоросли возрастом до 10 лет встречены в губе Зеленецкой и до 8 лет – в районе пос. Белокаменка. Таким образом, взрослых экземпляров в поселениях фукусовых в Кольском заливе может быть немного, но по длительности жизни они могут приближаться к максимальным значениям, известным для данного вида.

Для поселений фукусов Кольского залива характерно присутствие всех возрастных групп – от ювенальных до зрелых и способных к размножению. Основное различие между поселениями состоит в относительном количестве водорослей возраста 1–3 года. Так, в поселениях в районе пос. Абрам-мыс и пос. Белокаменка, по сравнению с другими поселениями, молодых экземпляров относительно немного. В то же время в районе моста г. Мурманск ювенильных водорослей оказалось очень много, т.е. для выживания проростков условия предыдущего года оказались благоприятными в этом месте и неблагоприятными в районе пос. Абрам-мыса (противоположный берег). Эти данные свидетельствуют о нестабильности заселения субстрата водорослями.

Функционирование водорослевых сообществ Кольского залива находится под значительным влиянием нефтяного загрязнения. При продолжительном и интенсивном воздействии различных токсикантов некоторые чувствительные виды водорослей, например, *Ulva*, *Porphyra*, *Palmaria* исчезают, меняя структуру фитоценозов данного района. Оставшиеся виды находятся под постоянным влиянием токсических веществ, что сказывается на их физиологических показателях и структуре популяции. Однако, на уровне популяции фукусовые водоросли обладают большими адаптивными возможностями к изменению факторов среды.

3.2 Влияние разлива мазута на макрофиты и прибрежно-водные растения в Керченском проливе (ноябрь 2007 г.)

В ноябре 2007 г. в Керченском проливе произошла крупнейшая в новейшей российской истории катастрофа, связанная с крушением нескольких судов, в том числе танкера. В морскую воду тогда попало свыше 2000 т мазута и 1000 т серы. После аварии концентрации углеводородов нефти на акватории пролива изменялись от 0,03 до 0,94 мг/л. По наблюдениям, в пленке мазута оказались морские травы – *Zostera marina*, *Z. noltei*; водоросли – зеленые (*Ulva*, *Chaetomorpha*), красные (*Gracilaria*, *Ceramium*, *Polysiphonia*), бурые (*Cystoseira*, *Ectocarpus*); прибрежно-водные растительность – сообщества *Phragmites australis*. Большая часть водной и прибрежно-водной растительности в этот период была представлена однолетними и сезонными видами, которые

завершили вегетацию. В осенне-зимний период для Керченского пролива весьма характерны штормовые выбросы макрофитов. С каждым последующим штормом количество замазученных макрофитов в выбросах сокращалось. Наиболее опасен был бы контакт макрофитов с осевшими на дно нефтепродуктами в случае их всплытия в весенний период, т.к. именно в этот период начинается активный рост и размножение большинства видов макрофитов. Но высоких концентраций нефтепродуктов в воде и донных отложениях и вторичного загрязнения нефтепродуктами макрофитов в весенний период не было зафиксировано, что свидетельствует об эффективном самоочищении вод Керченского пролива. Основной «удар» катастрофы пришелся на птиц, потери которых составили до 30 тыс. особей (Матишов и др., 2008).

Анализ последствий катастрофы в Керченском проливе позволил сделать следующие выводы:

- Потери водной растительности составили не более 5% от количества (биомассы) макрофитов, попавших в зону поражения.
- Проникновение мазута вглубь тростниковых зарослей составило не более 6 м, подавления роста тростника не обнаружено, что позволяет рассматривать заросли данного вида как естественные боновые ограждения, препятствующие распространению мазута вдоль береговой линии.
- При ликвидации последствий уничтожено до 100 га тростниковых зарослей, т.е. менее 1% попавших в зону поражения.
- Гибель водорослей-обрастателей на волноломах составила 30% при прямом контакте с мазутом и 90–100% -после ликвидационных мероприятий (коса Чушка, дамба Тузла).
- Выбросы макрофитов являются естественными ловушками и сорбентом для нефтепродуктов.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ВЛИЯНИЮ НЕФТИ НА МАКРОВОДОРОСЛИ БАРЕНЦЕВА И ЧЕРНОГО МОРЕЙ

4.1 Влияние нефти на ранние стадии развития водорослей Баренцева моря

Более взрослые проростки фукуса оказываются устойчивей к воздействию токсиканта, чем проростки, которые подверглись негативному воздействию на стадии яйцеклетки. Обнаружено, что воздействие углеводов нефти на стадии формирования зиготы фукуса ведет к выживанию и развитию более мелких по размеру зигот. Проведенные эксперименты показали возможность существования и развития водорослей Баренцева моря в среде загрязненной нефтью, при этом эмульгированная нефть менее токсична, чем нефтяная пленка, хотя и под ней

возможно развитие проростков водорослей. Бурые водоросли (*F. vesiculosus* и *S. latissima*) более устойчивы к токсическому воздействию, чем зеленые (*U. prolifera*). Для *S. latissima* и *U. prolifera* максимально уязвимыми стадиями жизненного цикла в условиях нефтяного загрязнения являются гаметогенез и ювенильный спорофит, для *F. vesiculosus* – прорастающая зигота.

4.2 Влияние сырой нефти на основные функциональные параметры макроводорослей Баренцева моря

Результаты экспериментов показали, что рост бурых водорослей *S. latissima* и *F. vesiculosus* под влиянием сырой нефти в концентрации до 30 мг/л не прекращался. Для бурой водоросли *A. nodosum*, а также красных водорослей (*P. palmata*, *P. umbilicalis*) активный рост отмечен только при концентрациях нефти до 10 мг/л (Рисунок 2). Увеличение концентрации нефтепродуктов в воде приводило к существенному снижению относительной скорости роста этих видов. В контрольном эксперименте фотосинтетическая активность исследованных видов уменьшается в ряду *A. nodosum* – *S. latissima* – *F. vesiculosus* – *P. palmata* – *P. umbilicalis*. Показатели фотосинтеза у всех видов водорослей, за исключением *A. nodosum*, с увеличением содержания нефтепродуктов в воде снижались, в то время как интенсивность дыхания колебалась. Полное подавление фотосинтетической активности к концу экспозиции при концентрациях нефти выше 10 мг/л выявлено у *P. umbilicalis* и *P. palmata*, хотя при концентрациях нефти до 10 мг/л у указанных видов отмечены аналогичные или большие значения интенсивности фотосинтеза, чем в контроле. Для *A. nodosum* наблюдалась стимуляция фотосинтетической активности при всех использованных концентрациях нефти.

Предполагается, что стимуляция роста водорослей в условиях нефтяной интоксикации связана с наличием в нефти нафтеновых кислот, выступающих наряду с некоторыми другими углеводородами нефти в качестве факторов роста, а также металлов, выполняющих функции микроэлементов в клеточном метаболизме водорослей (Hsiaoetal., 1978). Альтернативное объяснение – гипотеза экзогенного поступления в таллом водорослей низко- и высокомолекулярных органических соединений (Makager, Sandjienses, 1990), которые могут образовываться при деструкции нефти в воде и включаться в метаболические (гетеротрофия) или энергетические (органотрофия) процессы. Экзогенное проникновение углеводов нефти возможно в случае их сорбции на поверхности клеток и контакта с микроперифитонным сообществом, что может сопровождаться разрушением сложных углеводов до более простых. Вероятно, именно этим объясняется устойчивость фукусовых водорослей к воздействию сырой нефти (Воскобойников и др., 2004, 2017).

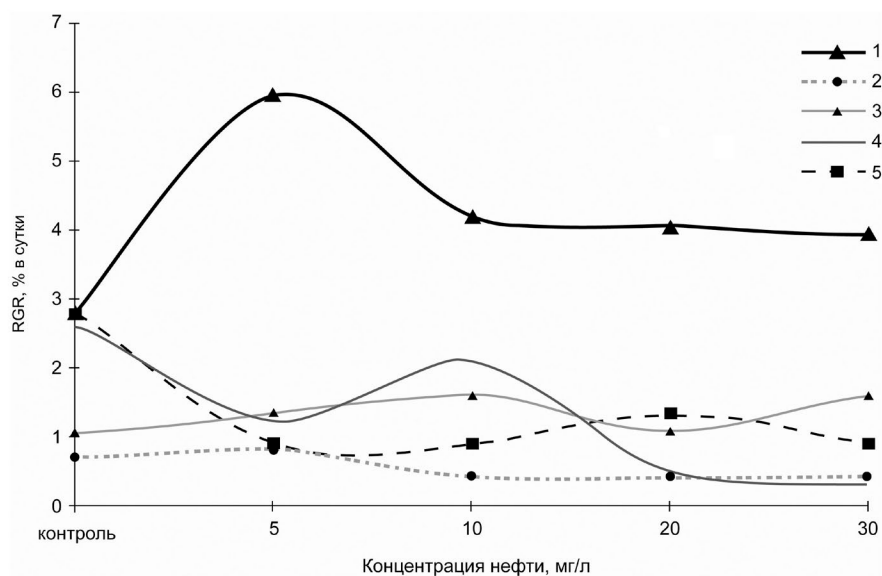


Рисунок 2 - Влияние эмульсии сырой нефти на относительную скорость роста (RGR) макроводорослей. 1 – *Saccharina latissima*, 2 – *Porphyra umbilicalis*, 3 – *Fucus vesiculosus*, 4 – *Ascophyllum nodosum*, 5 – *Palmaria palmata*

4.3 Влияние пленки нефти на бурые макроводоросли Баренцева моря

В ходе эксперимента был показан неравнозначный отклик различных видов макроводорослей на присутствие пленки нефти на поверхности воды. У *S. latissima* наблюдали снижение скорости фотосинтеза и увеличение интенсивности дыхания уже через 2 ч экспозиции, минимальные значения отмечены через 5 ч (Рисунок 3). Далее интенсивность фотосинтеза возрастала, но дыхание превалировало. У *A. nodosum* произошло увеличение скорости фотосинтеза более чем в 6 раз через пять часов экспозиции, а затем снижение до первоначальных значений.

Менее интенсивные изменения в скорости фотосинтеза наблюдали у *F. vesiculosus* и *F. distichus*. Снижение скорости фотосинтеза через 2 ч экспозиции компенсировалось ее повышением до контрольных значений, а к концу экспозиции скорость составляла менее 50% от первоначальных значений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что первоначальное снижение скорости фотосинтеза и увеличение интенсивности дыхания, вероятно, связано с токсическим действием нефти, а далее (через 5 ч экспозиции) «включаются» механизмы, компенсирующие это воздействие.

В полевых экспериментах на литорали Баренцева моря показано, что бурые водоросли (*F. vesiculosus*, *F. distichus*, *A. nodosum*, *S. latissima*) в условиях нефтяного загрязнения могут поддерживать свою функциональную активность с первых часов, адаптируясь к

токсическому воздействию; полусуточный ход фотосинтеза и дыхания остается выраженным и неизменным.

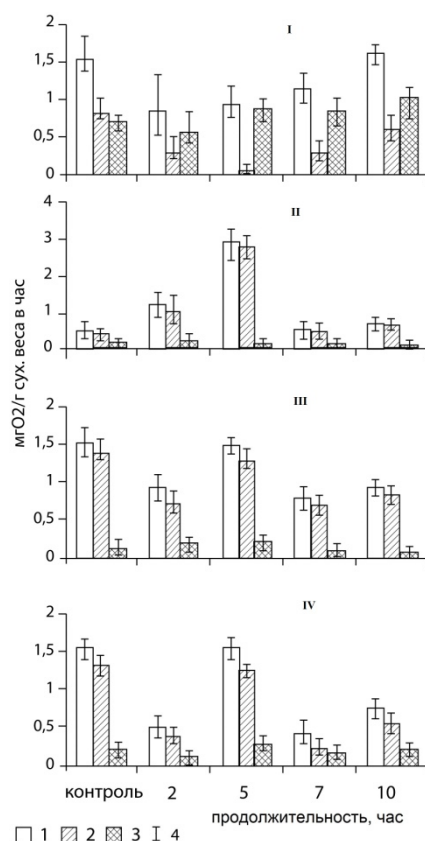


Рисунок 3 - Динамика валового фотосинтеза (1), чистого фотосинтеза (2) и дыхания (3) бурых водорослей в эксперименте. По оси ординат – время от начала эксперимента, где контроль – значения функциональных показателей до начала эксперимента; I – *S. latissima*,

II – *A. nodosum*, III – *F. distichus*, IV – *F. vesiculosus*

4.4 Оценка устойчивости макроводорослей из загрязненных мест обитания к нефтяному воздействию

Одним из значимых факторов для макроводорослей, особенно в портовых акваториях, является хроническое поступление в морскую воду нефтепродуктов. Некоторые водоросли, в том числе *F. vesiculosus*, способны выжить в таких экстремальных условиях. В этой связи правомерен вопрос – приводит ли хроническое загрязнение к повышению устойчивости *F. vesiculosus* к воздействию углеводородов нефти? В ходе экспериментов выявлено, что при воздействии эмульсии нефти и нефтепродуктов отклик водорослей из загрязненной акватории отличается от такового водорослей из незагрязненной акватории. В эксперименте с водорослями из загрязненных местообитаний с увеличением концентраций эмульсии нефти и дизельного топлива уровень фотосинтеза водорослей возрастает в 1,5–2 раза, снижаясь только при максимальных концентрациях токсикантов (Рисунок 3–4). У водорослей из чистых

местообитаний при действии эмульсии нефти и дизельного топлива в концентрации от 5 мг/л интенсивность фотосинтеза резко уменьшается. В экспериментах минимальная концентрация эмульсии бензина (5 мг/л) не оказала подавляющего воздействия на фотосинтез, но дыхание усилилось. Возрастание концентрации эмульсии бензина привело к подавлению фотосинтеза и увеличению интенсивности дыхания, при наибольшей концентрации эмульсии (50 мг/л) отмечена гибель водорослей на 2 сут.

Эксперименты показали, что токсичность эмульсии для *F. vesiculosus* увеличивается в ряду нефть – дизельное топливо – бензин.

Оценка скорости изменения сухого вещества показала, что при воздействии эмульсии нефти и дизельного топлива происходит его накопление, а в эмульсии бензина содержание сухого вещества снижается. В эксперименте с водорослями из чистых местообитаний отмечено снижение содержания сухого вещества при всех концентрациях токсикантов.

На примере *F. vesiculosus* из различных местообитаний Кольского залива показано, что в акваториях с умеренным загрязнением интенсивность роста и площадь поверхности могут быть выше, чем у водорослей из более чистых местообитаний (Гончарова, Шошина, 2013). Натурные наблюдения (Воскобойников и др., 2004) подтверждают данные наших экспериментов и показывают, что *F. vesiculosus*, произрастающий в местах с присутствием в воде нефтепродуктов, оказывается преадаптированным к экстремальным воздействиям токсикантов и способен перенести большие концентрации, в то время, как у водорослей из чистого местообитания в аналогичных условиях функциональные показатели фотосинтеза и дыхания снижаются. Полевые эксперименты по воздействию пленки нефти на бурые водоросли показали, что у *F. vesiculosus* ход суточного фотосинтеза практически не нарушается, и водоросли способны адаптироваться к воздействию нефтяной пленки в течение первых часов. И.В. Рыжик (2012) обнаружила, что метаболическая активность клеток (МАК) *F. vesiculosus* повышается при наличии нефтепродуктов в водной среде, но у образцов, произраставших в незагрязненном районе, МАК увеличивалась в течение нескольких минут, а из загрязненного района – только на третьи сутки. Это также свидетельствует об эффективных механизмах репарации и адаптации у водорослей, произрастающих в условиях хронического загрязнения. Ранее нами было показано, что при хроническом загрязнении в популяции *F. vesiculosus* может происходить отбор устойчивых форм на самых ранних стадиях онтогенеза (Степаньян, 2013). Аналогичные закономерности выявлены для микроводорослей (Гапочка, 1981).

Водоросли умеренно загрязненных акваторий оказываются более приспособленными к воздействию углеводородов нефти, чем таковые из чистых районов. Следовательно, при крупных техногенных авариях и попадании в морскую среду нефти устойчивость сообществ *F. vesiculosus*

умеренно загрязненных прибрежных акваторий будет выше, чем у сообществ, произрастающих в чистых местообитаниях.

В последние годы активно разрабатываются эффективные методы борьбы с нефтяным загрязнением арктических акваторий с использованием водорослевых плантаций-биофильтров (Воскобойников и др., 2017). Использование водорослей из умеренно загрязненных местообитаний для плантаций-биофильтров позволит эффективней использовать этот подход в фиторемедиации.

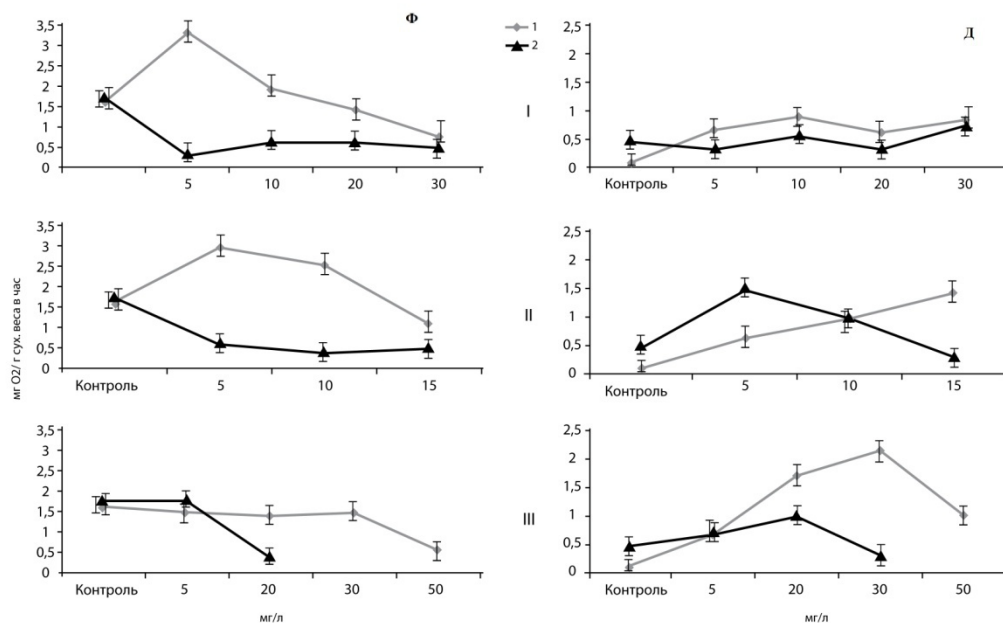
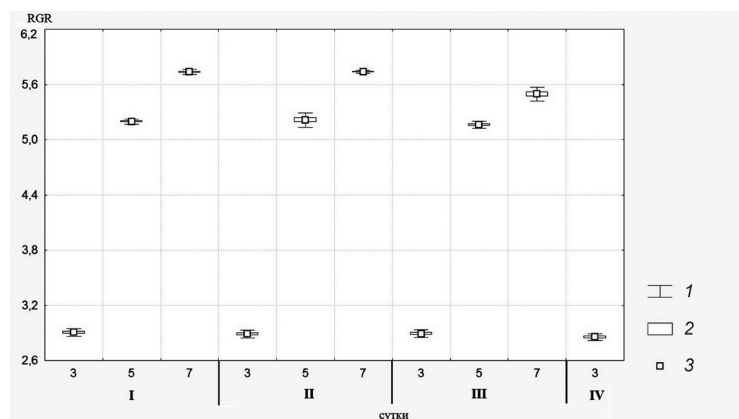


Рисунок 4 - Динамика фотосинтеза (Φ) и дыхания (Д) *Fucus vesiculosus* из загрязненного (1) и чистого (2) местообитаний при воздействии эмульсии нефти (I), дизельного топлива (II) и бензина (III)

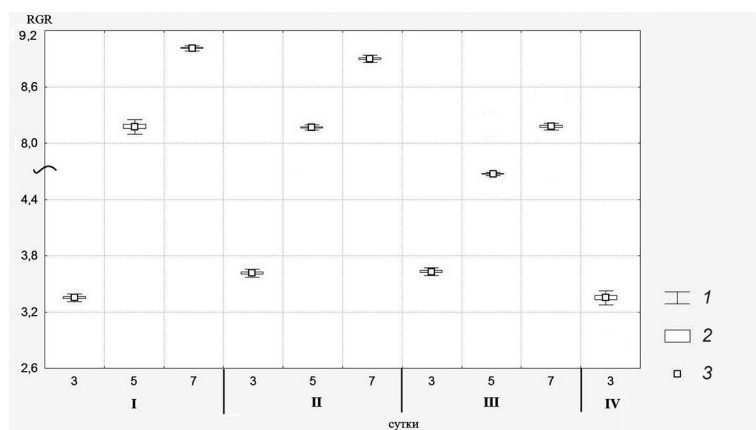
4.5 Влияние нефти на ранние стадии развития водорослей Черного моря

Проростки черноморских водорослей *C. barbata*, *U. intestinalis*, *C. virgatum*, *Polysiphonia elongata* показали высокую устойчивость к действию эмульсии нефти и нефтепродуктов, нормально развиваясь при концентрациях до 50 мг/л, большие концентрации токсикантов (500 мг/л) полностью подавляли развитие водорослей, приводя к их гибели на 3 день (Рисунок 5). Концентрации нефти и дизельного топлива до 10 мг/л стимулировали рост проростков водорослей.

По степени снижения устойчивости черноморские водоросли можно расположить следующим образом: *C. barbata* – *U. intestinalis* – *C. virgatum* – *P. elongata*. Как и для водорослей Баренцева моря, наиболее устойчивы – фукусовые водоросли, менее – ульвовые и церамиевые.



а



б

Рисунок 5 - Влияние нефти (I – контроль, II – 10 мг/л, III – 50 мг/л, IV – 500 мг/л) на относительную скорость роста (RGR) проростков *Cystoseira barbata* (а), *Ulva intestinalis* (б), *Ceramium virgatum* (в), *Polysiphonia elongata* (г). Условные обозначения: 1 – стандартное отклонение, 2 – стандартная ошибка среднего, 3 – среднее

ГЛАВА 5 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕАКЦИИ МАКРОФИТОБЕНТОСА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ЗАГРЯЗНЕНИИ

5.1 Моделирование реакции фитоценозов Баренцева моря при нефтяных разливах

На литорали и верхней сублиторали Баренцева моря насчитывается около 200 видов макроводорослей, массовыми и доминирующими являются зеленые (*Ulvaceae*) и бурые (*Fucaceae*, *Laminariaceae*) водоросли (Кузнецов, Шошина, 2003).

Наши экспериментальные данные и полевые наблюдения позволили выявить наиболее уязвимые участки прибрежной зоны Баренцева моря при воздействии нефтяного загрязнения (Рисунок 6). В результате серии численных экспериментов были построены карты для

сравнительных оценок рисков загрязнения береговой зоны по календарным сезонам. При достижении нефтью побережья, первыми в течение несколько дней погибнут литоральные красные и зеленые водоросли (представители родов *Porphyra*, *Palmaria*, *Ulva*). При «накрывании» пленкой нефти литорали слоем в несколько миллиметров (более 200 г/м²) исчезнет часть фукусовых водорослей. Это произойдет как из-за прямого токсического воздействия, так и из-за обрыва утяжеленных нефтью талломов. Но фукусовые водоросли, которые произрастают в литоральных ваннах и расщелинах, будут способны выжить в этих условиях. В зависимости от амплитуды прилива *S. latissima*, находясь под водой и не контактируя с пленкой нефти, может пережить катастрофу в течение нескольких недель.

Вероятность масштабных катастроф существенна, особенно с началом нефтедобычи в Печерском море и активизацией перевозок в западном направлении. Наши модельные расчеты распространения нефтяного пятна при вероятном разливе нефти показали, что в осенне-зимний период наиболее загрязненным может быть побережье Новой Земли и Печерского моря, а в весенне-летний – побережье Восточного Мурмана и северной части Белого моря (Рисунок 6). В побережье Печерского моря и Новой Земли запасы водорослей минимальны, макрофиты верхней литорали практически отсутствуют, но на Восточном Мурмане сосредоточены основные запасы водорослей, именно для этого участка Баренцева моря вероятный ущерб от гибели фитобентоса будет наиболее существенным. Сезонный ход развития фитобентоса на литорали Баренцева моря существенно влияет на устойчивость всей прибрежной экосистемы. Анализ возможных сценариев показал, что аварийное попадание нефти в морскую воду не приведет к полному исчезновению бурых водорослей.

В случае крупной аварии (попадании в морскую воду более 10 тыс. т) и концентрации нефти в прибрежной зоне более 200 г/м² или 50 мг/л (1000 ПДК) наиболее уязвимы фитоценозы литоральной зоны. Особенно опасны аварии в летний период, когда происходят репродуктивные процессы у большинства фукусовых и ламинариевых водорослей. Наиболее чувствительны участки литорали распресненных заливов с преобладанием красных и зеленых водорослей. Максимальный ущерб фитобентосу и морской биоте может быть нанесен при попадании нефти в прибрежную зону в сизигийный отлив, когда становятся уязвимы фитоценозы супралиторали (зона заплеска) и сублиторали.

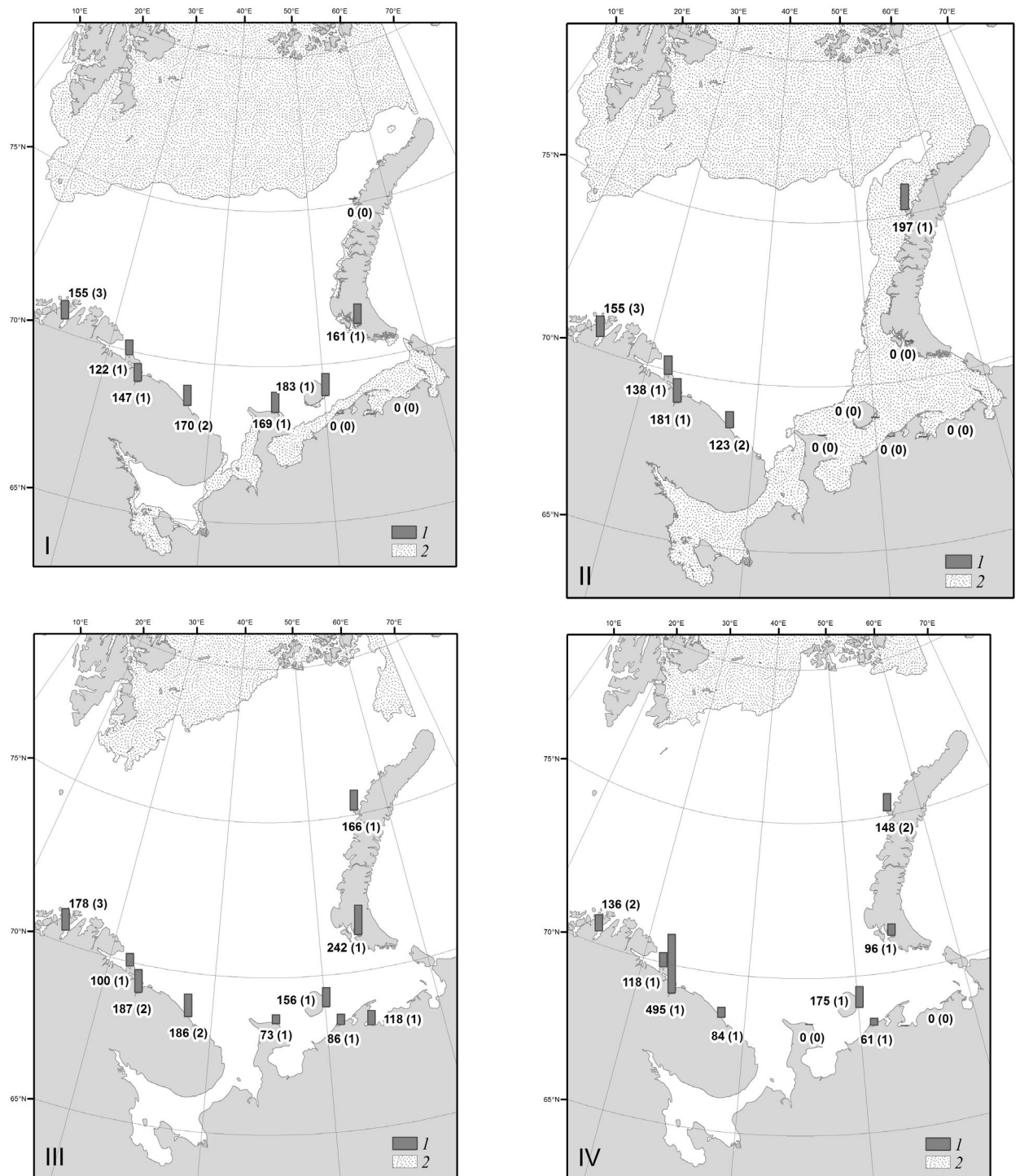
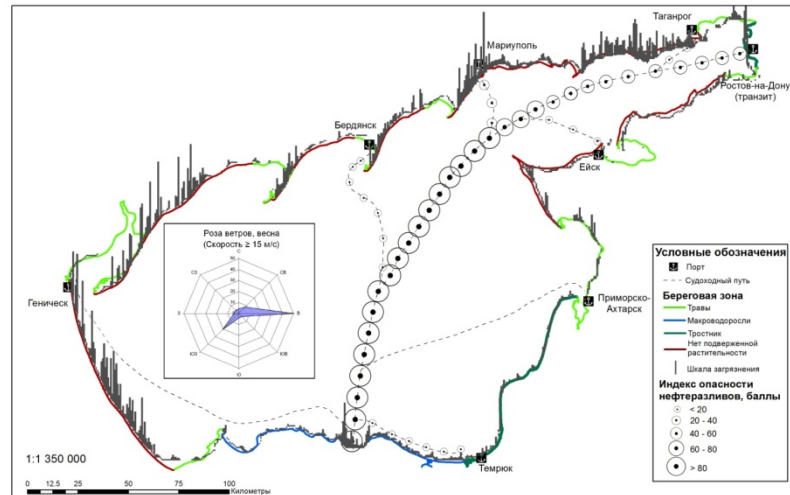


Рисунок 6 - Величины средней концентрации нефтепродуктов, достигших береговой зоны в случае аварийного нефтяного разлива в ходе транспортировки, по календарным сезонам (I – зима, II – весна, III – лето, IV - осень). I – концентрация нефтепродуктов, г/м²; в скобках приведен балл, характеризующий степень уязвимости фитобентоса прибрежной зоны; 2 – лед

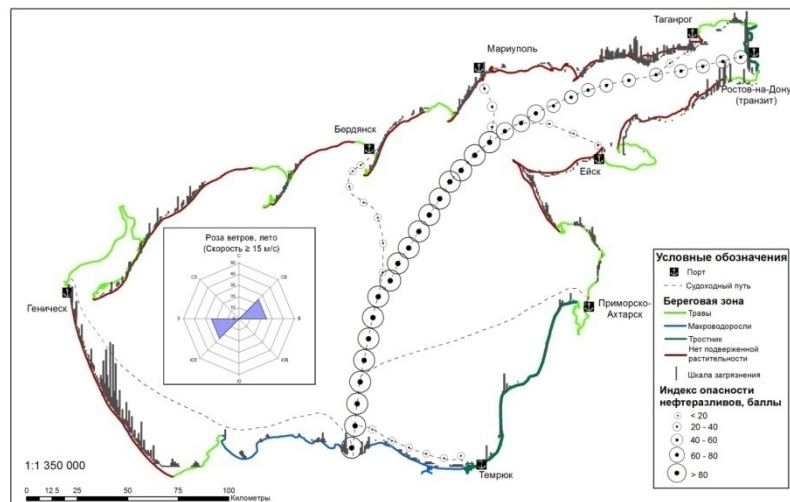
5.2 Моделирование реакции фитоценозов Азовского моря при нефтяных разливах и изменении солености

Для оценки вероятности загрязнения береговой зоны при аварийных разливах нефти граничная область моделирования была разделена на Керченский пролив и части береговой линии Азовского моря (с водной растительностью, тростниковыми зарослями и участки с отсутствием растительности). Для каждого из сезонов (кроме зимы) и всего года в целом результаты оценки объемов нефти, достигших береговой зоны, для всех сценарных экспериментов суммировались. Эта итоговая суммарная величина для конкретного участка береговой зоны рассматривалась как относительная величина, характеризующая вероятность загрязнения береговой линии в соответствующий сезон. На основе этих данных получены вероятностные картосхемы загрязнения береговой зоны по сезонам (Рисунок 7). По картосхемам видно, что зоны максимального вероятного загрязнения соответствуют направлению преобладающих ветров.

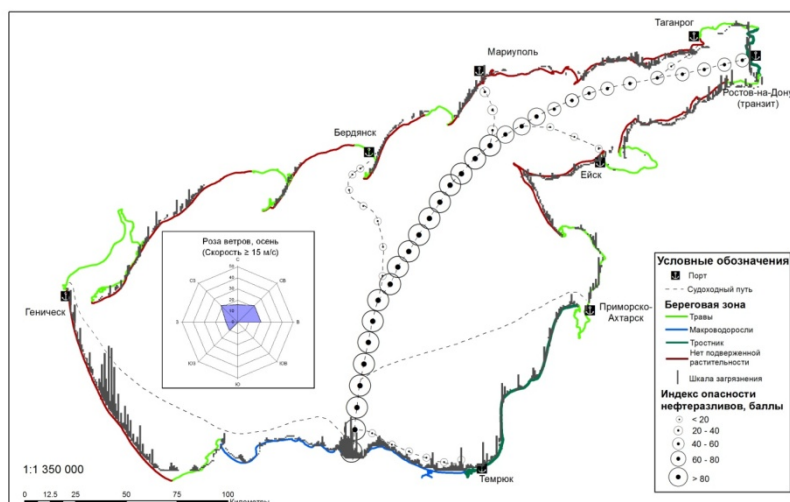
Известно, что наиболее устойчивые сообщества к разливам нефти и нефтепродуктов – это тростниковые заросли, которые часто используются в качестве биофильтров для очистки загрязненных сточных вод (Морозов, 2001). Тростник составляет основу растительности в дельтах рек Дон и Кубань и занимает площадь более 500 и 4000 км² соответственно, ширина по береговой линии достигает не менее 30 км для Дона и 110 км для Кубани. На Керченском п-ове и в районе мыса Ахеллион на твердых субстратах формируются устойчивые к действию нефти и нефтепродуктов сообщества водорослей – *Ulva*, *Ceramium*, *Cystoseira*, которые, как показали эксперименты, могут в течение 10 и более суток вынести воздействие значительных (до 50 мг/л) концентраций нефтетоксикантов (Степаньян, 2018). Протяженность береговой линии с такими сообществами составляет 80 км. Однако опыт ликвидации последствий катастрофы (Керченский пролив, 2007 г.) показал, что использование диспергентов может привести к 100% гибели живых организмов, в том числе водорослей. Наименее устойчивые к действию нефти растительные сообщества – это сообщества подводных трав придельтовых акваторий (на устьевых барах), в заливах и лиманах (Lewis, Pryor, 2013). Площадь таких участков в Азовском море составляет не менее 55 км², протяженность по береговой линии 270 км. Важно учитывать многолетние колебания солености в водоеме, т.к. в период осолонения моря (среднегодовые значения солености выше 14‰) будут формироваться более устойчивые к воздействию нефти и нефтепродуктов сообщества морских трав, прежде всего *Zostera noltei*, а в периоды распреснения (соленость 9–10‰) – менее устойчивые сообщества из представителей *Potamogeton*, *Ceratophyllum*, *Myriophyllum*, *Vallisneria*. Разливы нефти объемом до 1000 т не будут критичны для развития прибрежно-водных и водных растений на большей части акватории Азовского моря и не приведут к значительному ущербу.



Весна



Лето



Осень

Рисунок 7 - Оценка риска загрязнения береговой зоны и сообществ макрофитов Азовского моря при аварийных разливах нефтепродуктов

5.3 Моделирование изменений пространственного распределения водной и прибрежно-водной растительности северной части Каспийского моря при изменении уровня моря

В российской части Северного Каспия активная добыча углеводородов началась с 2008 г. В этой связи представляется интересным оценить состояние водной и прибрежно-водной растительности до начала масштабных работ по добыче углеводородного сырья в Северном Каспии и выявить роль естественных факторов (колебания уровня, изменения солености) в пространственной динамике сообществ водных растений. Это позволит более четко оценить возможные негативные последствия деятельности добывающих нефтегазовых компаний.

Были выполнены расчеты по оценке влияния изменения уровня моря и сопряженных факторов на пространственное распределение двух массовых видов *Zostera noltei* и *Stuckenia pectinata* Северного Каспия. Указанные виды выбраны в связи с тем, что у них при определенных условиях может быть «перекрывание» местообитаний и, как следствие, конкуренция за субстрат, свет и питательные вещества. Результаты моделирования позволили выявить потенциальные зоны контакта двух видов, в которых возможны конкурентные взаимоотношения. Пространственно-детализированная модель показывает, что при снижении уровня Каспийского моря происходит исчезновение *Z. noltei* на небольших глубинах и ее локализация в центральной части на глубинах более 10 м. Граница распространения рдеста сдвигается в сторону меньших глубин, площадь покрытия уменьшается более чем в 2 раза (Рисунок 8). Полученные результаты показывают, что распределение водных растений на акватории Северного Каспия определяется естественными факторами, в первую очередь глубиной (определяемой изменением уровня моря) и соленостью. В настоящее время в Северном Каспии наблюдается расширение зоны распространения морских трав и увеличение их промысловых запасов.

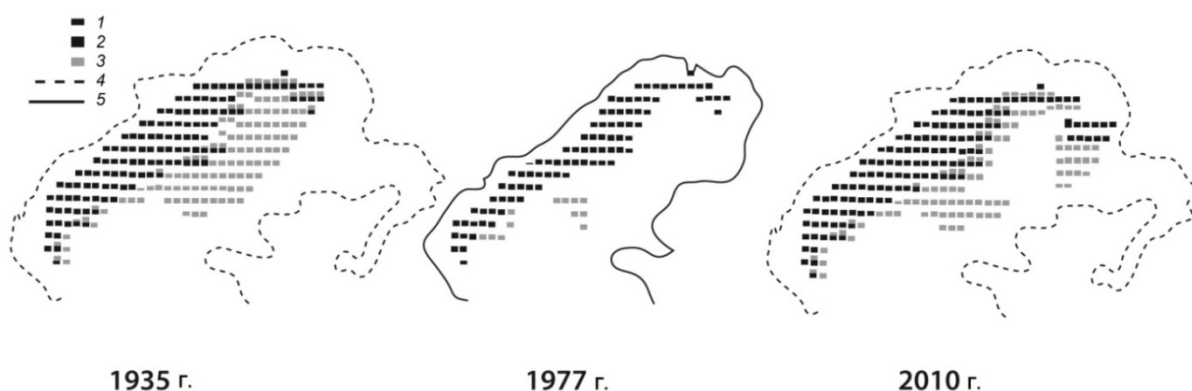


Рисунок 8 - Визуализация результатов модельных расчетов пространственной динамики биомассы (1 кг/м²) (1) *St. pectinata* (2) и *Z. noltei* (3) Северного Каспия, где (4, 5) границы моря

ГЛАВА 6 МАКРОФИТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПАНИЙ

Южные и северные моря России активно осваиваются нефтегазовыми компаниями – ведутся производственный экологический мониторинг, разведка, добыча и перекачка углеводородного сырья. Морские макроводоросли – одна из компонент в системе производственного мониторинга нефтегазовых компаний (Патин, 2017, Шавыкин, 2016). Однако в практике экологического производственного мониторинга роль макроводорослей оценивается в основном в разделе оценки состояния окружающей среды (ОСС), в разделе оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) оценка негативного воздействия практически не проводится. Отчасти это связано с тем, что экологический мониторинг нефтегазовых компаний проводится в границах лицензионных участков, которые обычно расположены на удалении от береговой зоны. Районы проведения производственного экологического мониторинга расположены за пределами верхних отделов морского шельфа (в южных морях России это – зона супралиторали и сублиторали), и компании, проводящие инженерно-экологические исследования, зачастую игнорируют исследование фитобентоса, исключая этот компонент из программы мониторинга.

Анализ существующей практики показал, что в разделах ОСС дается описание распределения фитосообществ в районе исследований, оценивается видовое разнообразие, иногда указывается межгодовая динамика функционирования нескольких ключевых видов. На наш взгляд, существующий раздел необходимо дополнять анализом влияния климатических изменений на многолетнюю динамику биомассы и видового разнообразия фитоценозов в ключевых районах с использованием методов математического моделирования.

В разделе ОВОС обычно рассчитывается ущерб для массовых промысловых видов, остальные компоненты фитосообществ игнорируются. Необходимо создавать математические модели, которые будут учитывать реакцию водорослей на различных стадиях развития на воздействие различных токсикантов, в первую очередь, углеводородов нефти. Использование плантаций-биофильтров с участием водорослей необходимо сделать базовым пунктом в Планах ликвидации аварийных разливов нефти.

Распоряжением Минприроды РФ от 22.09.2015 № 25-р «Об утверждении перечня видов флоры и фауны, являющихся индикаторами устойчивого состояния морских экосистем Арктической зоны Российской Федерации» утвержден перечень видов водорослей, в том числе 12 видов макроводорослей, которые являются индикаторами устойчивого развития арктических экосистем. Это – первый федеральный документ, в котором признается роль морских фитоценозов для устойчивого развития Арктики и предлагается включить морские макрофиты в программы сохранения биологического разнообразия. На наш взгляд, необходима разработка аналогичных нормативных актов и для других морских водоемов России, включая южные моря.

Отметим, что в список водорослей-индикаторов устойчивого развития могут войти редкие, исчезающие виды, виды-эндемики, например, *Desmotrichum punctaroides*, *Phyllophora crispa*, *Gracelaria dura*, *Dasya apiculata*, *Laurencia coronopus*, *Chaetomorpha zernovii*, *Cladophora siwaschensis*, *Ulva maeotica*, включенные в Красную книгу РФ и региональные Красные книги, например, Республики Крым (2015). Сюда следует добавить также промысловые виды (*Cystoseira*, *Zostera*), которые являются эдификаторами подводных растительных сообществ и выполняют множество экосистемных функций - от биотопа и пищевого объекта для беспозвоночных и рыб до регулятора парниковых газов в системе океан / атмосфера и консерватора тяжелых металлов и радионуклидов. В программах экологического мониторинга должно уделяться особое внимание промысловым и средообразующим видам с учетом динамики их запасов под действием климатических факторов.

Имеющиеся подходы к определению уязвимых зон морского побережья, в том числе на основе оценки состояния сообществ макроводорослей, не лишены недостатков, на что указывают сами разработчики (Новиков, 2013; Шавыкин и др., 2015, 2018). Основное внимание в них уделяется определению видового состава, биомассы, численности макрофитов и на основе этих показателей проводится оконтуривание ключевых водорослевых сообществ.

Нами предложен более качественный подход к определению уязвимых зон морского побережья на основе макрофитобентоса, в котором, наряду с указанными выше показателями (видовой состав, биомасса численность ключевых видов макрофитов), используются следующие показатели:

- морфофизиологические параметры макрофитов (интенсивность роста, дыхания, фотосинтеза, стадии размножения, стадии зрелости) на конкретных участках побережья, в том числе подверженных антропогенному воздействию.
- экспериментально определенный порог устойчивости доминирующих, средообразующих и массовых видов к конкретным маркам нефти и нефтепродуктов, вероятность попадания которых в морскую среду для определенных участков побережья значительна.

В дополнение к этому необходимо использовать прогностические модели разливов нефти («поведения» нефтяного пятна) для конкретных районов побережья, а также оценивать ответную реакцию сообществ макрофитов на загрязнение и давать оперативный прогноз (от нескольких суток до нескольких лет) развития сообществ при вероятных или реальных разливах нефти.

Используя разработанный подход, можно получить не только более точную оценку реакции сообщества макрофитов при воздействии нефтепродуктов, но и дать объективный прогноз развития сообществ макрофитов при нефтяном загрязнении в ближайшем или отдаленном будущем.

Чувствительность фитоценозов северных и южных морей России к воздействию нефтепродуктов имеет выраженный сезонный характер. При разливе нефтепродуктов в весенний период и гибели большей части популяций водорослей, уже осенью могут появиться новое поколение, образовавшиеся из спор и зигот оставшихся фертильных талломов. Однолетние макрофиты с высокой скоростью продуцирования гамет также могут достаточно быстро «нарастить свое присутствие». В этом случае восстановление популяции произойдет за 1 год, и ущерб для прибрежной экосистемы будет минимален. При катастрофе в летне-осенний период, когда происходят репродуктивные процессы у большинства водорослей, ущерб будет значителен. Могут погибнуть не только вегетативные талломы, но и ювенильные проростки макроводорослей. В этом случае восстановление фитоценозов литорали и сублиторали займет 2–3 года в зависимости от наличия «фонда» фертильных водорослей, оставшихся за пределами участка катастрофы и сохраняющегося уровня нефтяного загрязнения воды и донных осадков.

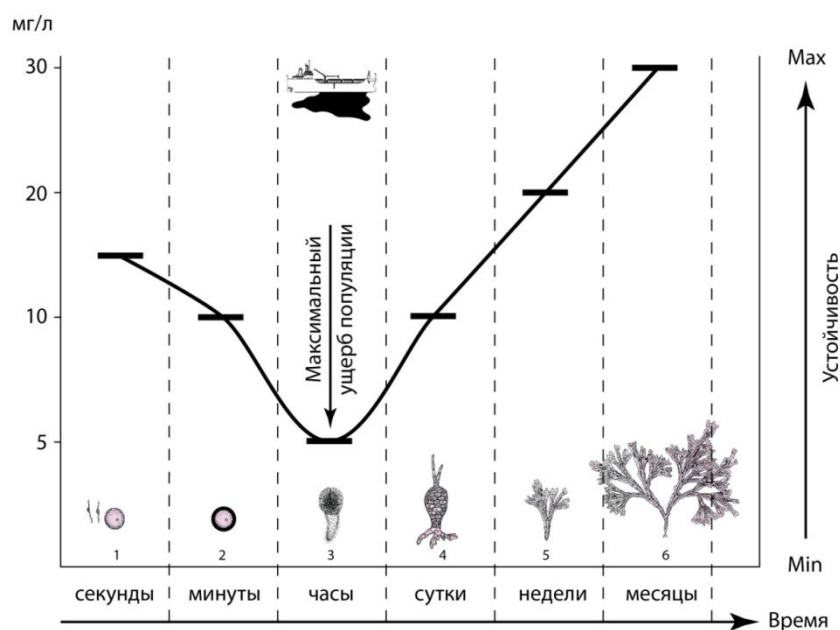


Рисунок 9 - Устойчивость *Fucus vesiculosus* в течение жизненного цикла к действию нефти (1 - яйцеклетка и антерозоиды; 2 - зигота, 3 - прорастающая зигота с ризоидом; 4 - проросток с дифференцированной ризоидальной и талломической частями; 5 - ювенильный таллом; 6 - взрослый таллом)

Максимально чувствительными к действию нефти и нефтепродуктов являются: прорастающие зиготы *F. vesiculosus* и *C. barbata*; ювенильные спорофиты *S. latissima*; ювенильные спорофиты *Ulva prolifera*. В случае вероятной катастрофы, с последующим разливом нефти, максимальный ущерб популяциям указанных водорослей будет нанесен в период развития на указанных стадиях (Рисунок 9).

На наш взгляд, локальная катастрофа скажется не столь значительно, как, например, хроническое поступление нефтетоксикантов в условиях полузакрытых губ. Однократное попадание нефти не приведет к полному исчезновению бурых водорослей, которые являются доминантами прибрежной экосистемы. Структурный «скелет» сообщества сохранится, но вместе с тем, могут исчезнуть чувствительные к воздействию нефти группы беспозвоночных животных и водорослей. Это может привести к дисбалансу в прибрежных экосистемах и спровоцировать возникновение трудно прогнозируемых явлений, которые способны повлиять на продуктивность и распределение макроводорослей на литорали и сублиторали. Вероятно, сукцессионные процессы в сообществе макроводорослей будут развиваться аналогично наблюдаемым в Новороссийской бухте или Кольском заливе. В то же время, популяции макрофитов, обитающие в условиях хронического загрязнения, вероятно, выработали способность к адаптации к неблагоприятным условиям. Наши эксперименты показали большую устойчивость фукусовых водорослей из загрязненных акваторий к действию нефтепродуктов, чем аналогичные виды из относительно чистых местообитаний.

ГЛАВА 7 КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СХЕМА РЕАКЦИИ СООБЩЕСТВ МАКРОФИТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Создание концептуальных схем устойчивости живых организмов к воздействию различных токсикантов – важная научная задача в гидробиологии. Отметим концептуальную модель акад. Г.Г. Поликарпова (Polikarpov, 1998), где обоснованы, градуированы и визуализированы степени воздействия радиоизотопов на живые организмы: от бактерий, растений и животных до Человека и Биосферы, от клеток и организмов до популяций и биологических сообществ. Г.Г. Поликарпов выделяет условный верхний предел устойчивости Биосферы – «зону неопределенности», которая требует еще своего осмысления и расчета предельной устойчивости компонентов Биосферы к воздействию сверхмощных доз радиации. Концептуальная схема самоочищения вод морей умеренной зоны от токсикантов, в том числе нефтепродуктов, профессора О.Г. Миронова (1985) показывает вклад абиотических и биотических факторов в этот процесс и ведущую роль живого биофильтра. О.Г. Миронов уделяет значительное внимание животной компоненте природных систем и показывает высокую устойчивость некоторых групп беспозвоночных к токсическому воздействию различных поллютантов. При этом «живой биофильтр» не только осуществляет очистку водной толщи от углеводородов нефти, но и способствует их консервации и захоронению в донных отложениях. С.А. Патиным (2017) предложена схема восстановления и сукцессии прибрежных сообществ. Показано, что после

воздействия нефти восстановившаяся прибрежная экосистема может не совпадать по своим характеристикам с сообществом, существовавшим до фазы острого воздействия. С.А. Патин (2017) подчёркивает, что главное – это восстановление уровней и динамики изменчивости (сезонной, межгодовой) продуктивности экосистемы, зафиксированных до воздействия, а какие виды сформируют новую экосистему – не столь важно, исключением являются экосистемы, сложенные промысловыми видами, исчезновение которых может нанести ущерб экономике прибрежных территорий. В концептуальной схеме Г.М. Воскобойникова с коллегами (2017) показаны взаимосвязи морских макрофитов и сообществ эпифитных нефтеокисляющих бактерий, исследованы процессы трансформации углеводородов нефти на поверхности талломов макрофитов. Это позволило создать новые подходы и технологии в области биоремедиации морских акваторий.

На основе проведенных исследований нами предлагается концептуальная схема реакции сообществ макрофитов северных и южных морей России к воздействию нефтяного загрязнения (Рисунок 10). Концентрации нефти 10 мг/л и выше будут критичны для развития водорослей на стадии размножения и молодых проростков. По мере увеличения концентрации нефти в морской воде до 50 мг/л будет наблюдаться снижение выживаемости макроводорослей, в т.ч. фукусовых, и увеличение уязвимости водорослевых сообществ. Концентрации нефти более 50 мг/л (соответствует 200 г/м²) приведут к тотальной гибели массовых видов водорослей. В то же время возможна достаточно быстрая (1–2 года) колонизация поврежденных (уничтоженных) участков литорали макрофитами из соседних акваторий.

При больших концентрациях нефти в морской воде, появлении нефтяного «мусса», возникновении нефтяных slicks различной толщины, будет отмечаться гибель популяций и прибрежных сообществ, при этом период восстановления прибрежных экосистем будет измеряться десятилетиями. Вероятно, разливы сотен тысяч тонн в морском мелководье будут означать тотальную экологическую катастрофу, и восстановление таких участков побережья займет несколько десятилетий. Или это будет означать начало нового цикла развития прибрежных экосистем, где «жизненного места» макрофитам уже не найдется, а их экологическую нишу займет бактериальная экосистема?

Опыт подобных региональных или масштабных катастроф показывает, что запас прочности природных экосистем значителен. И даже катастрофы с разливами нефти до 100 тыс. т и выше не приведут к тотальной гибели Живого. Прибрежные экосистемы восстановятся, однако этот процесс может длиться десятилетиями, а новые сообщества зачастую будут иметь упрощенную структуру и меньшую продуктивность.

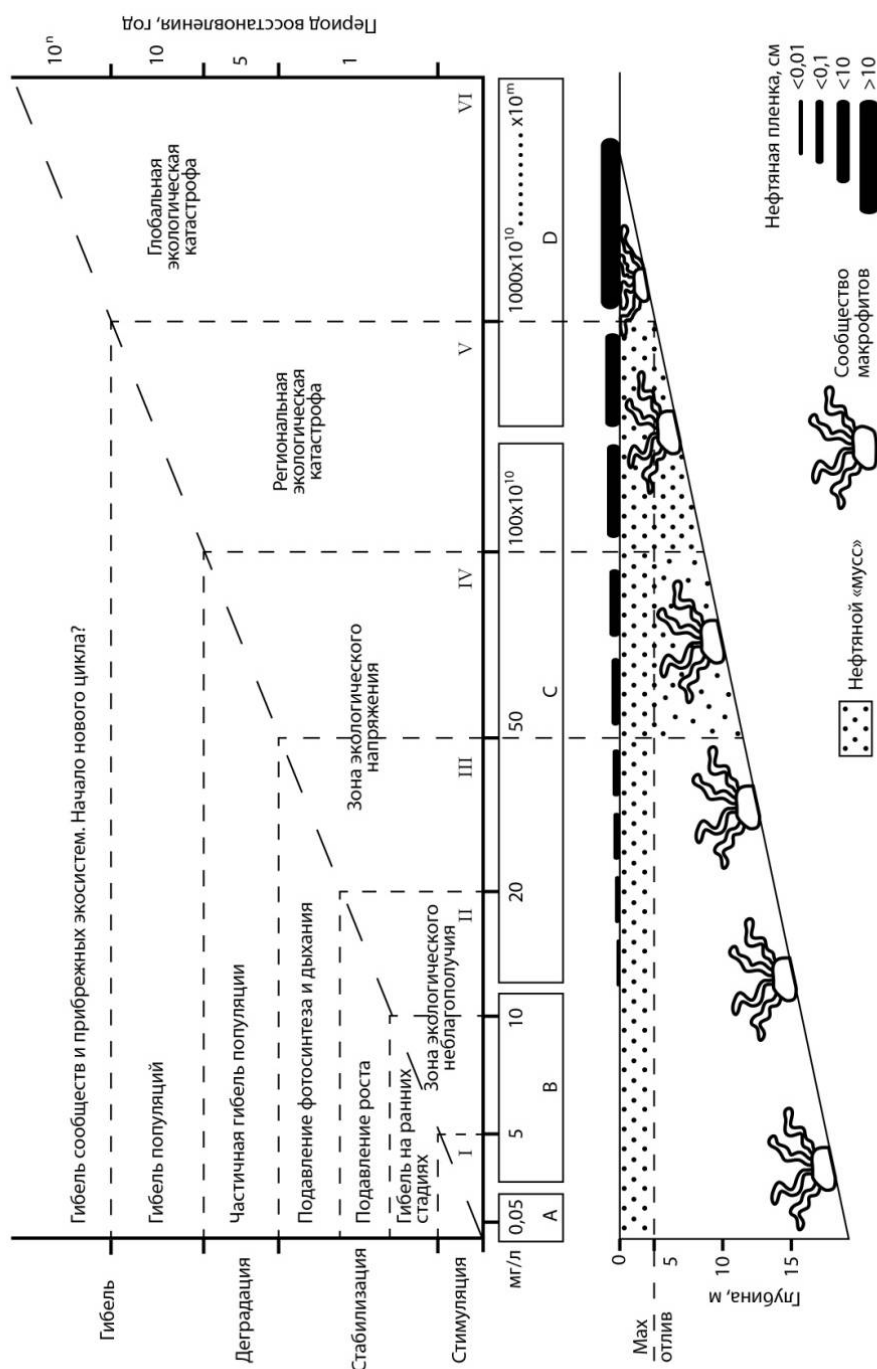


Рисунок 10 - Концептуальная схема реакции сообществ макрофитов к воздействию нефтяного загрязнения

Концентрация нефтепродуктов: А - ПДК по нефтепродуктам в водоемах, В - уровень загрязнения в портовых акваториях (до 200 ПДК), С - уровень загрязнения при региональных разливах нефти до 5 тыс. т (Балтийском море (1989 г.), в Керченском проливе (2007 г.)), D – уровень загрязнения при глобальных разливах нефти свыше 50 тыс. т (у берегов Франции (1967 г.), на Аляске (1989 г.), в Персидском (1991) и Мексиканском заливах (2010 г.)). Состояние природных систем (по: Шохин, Пинеев, 2012): I – естественное, II – равновесное, III – кризисное, IV – критическое, V – катастрофическое, VI – коллапс

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Макроводоросли являются важнейшим компонентом прибрежных экосистем северных и южных морей России. Нефть и нефтепродукты способны вносить дисбаланс в структуру и функционирование экосистем, оказывая негативное воздействия на макроводоросли – фототрофные организмы.

Наши исследования позволили установить ряд закономерностей, характерных для процесса взаимодействия растворенной и пленочной нефти с макроводорослями. Реакция макроводорослей на токсическое действие нефти и нефтепродуктов прослеживается на всех стадиях жизненного цикла. Действие нефтетоксикантов, как и других поллютантов и абиотических факторов окружающей среды (температура, освещенность, соленость и др.), способно вызывать изменения морфофункциональных характеристик макроводорослей. При этом снижается уровень фотосинтеза, увеличивается интенсивность дыхания, что вызывает падение относительной скорости роста или гибель организма. Наименее устойчивыми к воздействию нефти и нефтепродуктов являются макроводоросли на ранних стадиях жизненного цикла. Максимальные концентрации, которые способны они переносить на этих стадиях развития, не изменяя своих морфофункциональных характеристик, не превышают 5 мг/л (что соответствует 100 ПДК для нефтепродуктов для рыбохозяйственных водоемов) для нефти и бензина, хотя их рост и развитие возможны и при более высоких концентрациях нефтетоксикантов. Вегетативные талломы макроводорослей менее восприимчивы к воздействию токсикантов и их развитие возможно при концентрациях нефтепродуктов в воде, достигающих 50 мг/л (1000 ПДК).

В то же время, высокая устойчивость макрофитов к воздействию углеводородов нефти позволяет использовать санитарные водорослевые плантации на основе *F. vesiculosus*, *S. latissima* и нефтеокисляющих микроорганизмов для биоремедиации прибрежных акваторий от нефтепродуктов, что уже активно практикуется в нашей стране (Семенов и др., 2014; Воскобойников и др., 2017).

Нами экспериментально доказано, что при наличии на поверхности воды пленки нефти толщиной даже несколько миллиметров процессы фотосинтеза не прекращаются. Более того, через некоторое время уровни фотосинтеза водорослей достигают практически первоначальных значений, что свидетельствует об определенных адаптивных механизмах в функциональной системе макроводорослей.

Район произрастания макроводорослей, его гидрохимическая характеристика накладывают определенный отпечаток на развитие водорослей. Водоросли, произрастающие в загрязненных нефтью и нефтепродуктами акваториях, более устойчивы к воздействию нефтетоксикантов, чем

аналогичные виды из относительно чистых участков литорали. Климатические изменения (увеличение температуры вод в Черном и Баренцевом морях, колебания солености в Азовском и Каспийском морях) также влияют на устойчивость сообществ макрофитов к действию поллютантов: изменяются видовой состав, зоны распространения, продуктивность, сроки размножения и развития водорослей.

При колебаниях параметров водной среды может измениться скорость биодеструкции углеводородов нефти в морской воде, что повлияет на устойчивость водорослевых популяций и сообществ. В то же время макроводоросли (многолетние виды со сложно дифференцированным талломом) являются субстратом для многих нефтеокисляющих бактерий, что значительно повышает эффективность такого живого биофильтра в очистке водных акваторий от нефтепродуктов, как в естественных условиях, так и при практическом применении в биоремедиации.

Новороссийская бухта и Кольский залив, несмотря на различия, во многом сходны. Главное сходство в том, что они являются крупными морскими эстуарными экосистемами, подвергающимися значительному антропогенному воздействию на протяжении более 100 лет. Природа и Человек провели «совместный эксперимент» по вековой трансформации макрофитобентоса. В случае попадания нефти в прибрежную зону морей реакция фитоценозов будет подобной произошедшей в районе портов Мурманск и Новороссийск. Необходимо отметить, что уровень загрязнения нефтепродуктами в настоящее время на отдельных участках Черного моря (Керченский пролив, район Новороссийска и Туапсе), и в обжитых бухтах и заливах Баренцева моря уже достаточно высок, превышая ПДК в десятки раз.

Представленная работа является шагом в сторону познания устойчивости природных систем на основе макрофитов. Несмотря на многолетние исследования влияния нефтяного загрязнения на макрофиты многие аспекты данного процесса остаются неизученными. Прежде всего, неясны механизм проникновения и накопления углеводородов нефти в талломах водорослей и их дальнейшая деструкция, а также границы устойчивости к нефтепродуктам водорослей со сложным жизненным циклом на ранних стадиях (для которых получение спорowego материала в экспериментальных условиях затруднительно). Мы можем только предполагать о некоторой части негативных эффектов в сложных экосистемах, где действие нефти влияет на все уровни экосистемы от бактерий и фототрофов до растительноядных организмов, хищников и консументов. Только недавно в мире начаты исследования генетической структуры популяций фототрофов, пострадавших при разливах нефтепродуктов. Без окончательного ответа остается вопрос: как будут влиять глобальные климатические изменения в экосистемах на их устойчивость к возрастающему антропогенному воздействию, в том числе нефтяному загрязнению.

ВЫВОДЫ

1. Циклические изменения океанографических факторов (соленость, температура, прозрачность воды) могут влиять на устойчивость фитоценозов к нефтяному загрязнению, повышая или понижая уязвимость отдельных компонентов водорослевых сообществ. В условиях повышения солености Азовского и Каспийского морей устойчивость фитоценозов к воздействию нефтяных разливов увеличивается, в Черном и Баренцевом море (в условиях повышения температуры и снижения прозрачности воды) уязвимость фитоценозов возрастает.

2. Многолетняя трансформация фитобентоса Кольского залива Баренцева моря и Новороссийской бухты Черного моря (двух наиболее крупных морских акваторий, имеющих в настоящее время и в перспективе большое хозяйственное значение) имеет сходные черты, что обусловлено, как климатическими изменениями, так и антропогенным воздействием, в т.ч. нефтяным загрязнением.

3. В Черном море и Керченском проливе масштабная катастрофа танкера (ноябрь 2007 г.) с разливом более 2000 т нефтепродуктов (мазута) не оказала долговременного значительного воздействия на прибрежные сообщества макрофитов, что связано с сукцессионными процессами фитоценозов в позднеосенний период.

4. На основе натурных и экспериментальных данных для водорослей Баренцева и Черного морей определено, что наиболее устойчивыми к действию нефти и нефтепродуктов являются фукусовые и ламинариевые, менее – ульвовые, бангиевые, церамиевые и пальмариевые. Фукусовые водоросли менее восприимчивы к воздействию токсикантов и их развитие возможно при концентрациях нефтепродуктов в морской воде до 50 мг/л.

5. Макроводоросли на ранних стадиях развития наиболее чувствительны к действию углеводов нефти и могут являться индикаторами оценки состояния водной среды. Максимальные концентрации нефтепродуктов, которые способны переносить устойчивые виды (фукусовые водоросли) на ранних стадиях развития, не превышают 5 мг/л.

6. Экспериментальные исследования показали, что макрофиты, произрастающие в умеренно загрязненных акваториях, в отличие от водорослей из чистых районов, адаптированы к воздействию высоких концентраций углеводов нефти. При крупных техногенных авариях и попадании нефти в морскую среду устойчивость водорослевых сообществ умеренно загрязненных прибрежных зон будет выше, чем у сообществ из чистых акваторий.

7. Отмеченный широкий диапазон толерантности к нефтепродуктам у ряда доминантных видов бурых водорослей Баренцева и Черного морей, наряду с представленными в литературе сведениями об их способности к поглощению и нейтрализации углеводов нефти, позволяет

дать более высокую оценку роли макрофитов в очистке прибрежных акваторий от нефтяного загрязнения.

8. Предложен новый подход к определению уязвимых зон морского побережья на основе оценки состояния макрофитобентоса, включающий исследование морфо-физиологических характеристик макрофитов; экспериментальное обоснование устойчивости макрофитов к конкретным сортам нефти и нефтепродуктов, вероятность попадания которых в морскую среду для ключевых участков побережья значительна; применение прогностических моделей разливов нефти («поведения» нефтяного пятна) для наиболее чувствительных прибрежных акваторий; оценка ответной реакции сообществ макрофитов на нефтяное загрязнение и скорости восстановления подводных сообществ.

9. На основе оригинальных многолетних экспериментов и литературных данных по влиянию нефтепродуктов на морские макрофиты впервые предложены адаптированные математические модели, которые позволяют прогнозировать ущерб водным биоресурсам при разливах нефти в Азовском, Каспийском и Баренцевом морях.

10. Впервые разработанная концептуальная схема реакции сообществ макрофитов северных и южных морей России к нефтяному загрязнению, выявляющая и описывающая сходные реакции макрофитов различных широт к данному фактору, адекватно отражает реально происходящие природные процессы, дает возможность прогнозирования долговременных изменений и может служить методической основой для проведения экологического картирования прибрежных акваторий.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях WoS, Scopus:

1. **Stepanyan, O.V.** Effect of oil and oil products on morphofunctional parameters of marine macrophytes / O.V. Stepanyan, G.M. Voskoboinikov // Russian Journal of Marine Biology. – 2006. – Vol. 32. – № 4. – P. 241–248. doi: 10.1134/S1063074006070042 (WoS, Scopus).
2. **Stepanyan, O.V.** Effects of crude oil on major functional characteristics of macroalgae of the Barents Sea / O.V. Stepanyan // Russian Journal of Marine Biology. – 2008. – Vol. 34. – № 2. – P. 131–134. doi: 10.1134/S1063074008020077 (WoS, Scopus)
3. **Stepanian, O.V.** Distribution of Macroalgae and Seaweed in the Azov Sea, Kerch Strait, and Taman Bay / O.V. Stepanian // Oceanology. – 2009. – Vol. 49. – № 3. – P. 361–367. doi: 10.1134/S0001437009030084 (WoS, Scopus).
4. Matishov, G.G. Assessment of the Modern State of the Black Sea Ecosystem (Republic of Abkhazia) / G.G. Matishov, D.G. Matishov, **O.V. Stepanyan** // Doklady Earth Sciences. – 2014. – Vol. 454. – № 6. – P. 213–217. (WoS, Scopus)
5. **Stepanyan, O.V.** Modern biodiversity of macroalgae of the Sea of Azov, the Black Sea, and the Caspian Sea / O.V. Stepanyan // Doklady Earth Sciences. – 2014. – Vol. 458. – P. 1. – P. 1158–1160. doi:10.1134/S1028334X14090220. (WoS, Scopus)
6. Matishov, G.G. Marine Investigations on the Research Vessels Deneb and Professor Panov during Expeditions in 2013 / G.G. Matishov, **O.V. Stepanyan**, K.S. Grigorenko et al. // Oceanology. – 2015. – Vol. 55. – № 5. – P. 780–784. (WoS, Scopus)
7. **Stepanyan, O.V.** Macrophytobenthos of the Caspian Sea: Diversity, distribution, and productivity / O.V. Stepanyan // Oceanology. – 2016. – Vol. 56. – №3. – P. 395–405. doi: 10.1134/S0001437016030218. (WoS, Scopus)
8. **Stepanyan, O.V.** Daily dynamics of photosynthesis, respiration and production of *Fucus vesiculosus* L. in the Barents sea / O.V. Stepanyan // International Journal on Algae. – 2019. – Vol. 21. – Is. 4. – P. 359–364. doi: 10.1615/InterJAlgae.v21.i4.60. (Scopus)
9. **Stepanyan, O.V.** Expansion of *Ulva maeotica* and *Cladophora siwaschensis* (Chlorophyta, Chlorophyceae) in the Sea of Azov and the Black Sea / O.V. Stepanyan// International Journal on Algae. – 2019. – Vol. 21. – Is. 3. – P. 227–234. doi: 10.1615/InterJAlgae.v21.i3.30. (Scopus)
10. **Stepanyan, O.V.** Brown Algae of the Genus *Cystoseira* in the Sea of Azov: Settling or Expansion of the Range? / O.V. Stepanyan // Russian Journal of Biological Invasions. – 2020. – Vol. 11. – №3. – P. 277–282. doi: 10.1134/S2075111720030108. (Scopus)

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

11. Матишов, Г.Г. Комплексная оценка воздействия на экосистему Северного Каспия

при освоении морских нефтегазовых месторождений / Г.Г. Матишов, С.В. Бердников, **О.В. Степаньян** и др. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 1. – С. 5–20 (ВАК).

12. Бердников, С.В. Пространственно-детализированная модель многолетней динамики прибрежно-водной растительности и численности водоплавающих птиц устьевой области Волги / С.В. Бердников, Л.В. Маркитан, **О.В.Степаньян** // Успехи современной биологии. – 2009. – Т. 129. – № 1. – С. 80–92 (ВАК).

13. **Степаньян, О.В.** Влияние сырой нефти на ранние стадии развития макроводорослей Баренцева моря / О.В. Степаньян // Ботанич. журнал. – 2013. – Т. 98. – № 7. – С. 903–912 (ВАК).

14. **Степаньян, О.В.** Воздействие нефтяной пленки на фотосинтез бурых водорослей Баренцева моря / О.В.Степаньян // Ботанич. журнал. – 2014. – Т. 99. – № 10. – С. 1095–1100. (ВАК)

15. Иванов, В.А. Керченский пролив в осенний период 2011 года: результаты совместных комплексных исследований, выполненных в экспедиции МГИ НАН Украины и ЮНЦ РАН / В.А. Иванов, Г.Г. Матишов, В.М. Кушнир, С.В. Бердников, А.И. Чепыженко, В.В. Поважный, **О.В. Степаньян** // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 1. – С. 44–57. (ВАК)

16. Матишов, Г.Г. Современные данные по загрязнению Азовского и Чёрного морей углеводородами нефти / Г.Г. Матишов, **О.В. Степаньян**, В.М. Харьковский, В.Г. Соьер // Вестник Южного научного центра. – 2014. – Т. 10. – № 4. – С. 49–52. (ВАК)

17. Матишов, Г.Г. Морские исследования у берегов Абхазии / Г.Г. Матишов, **О.В. Степаньян** // Природа. – 2014. – № 11. – С. 70–78. (ВАК)

18. Матишов, Г.Г. Особенности гидролого-гидрохимического режима Азовского и Черного морей в 2013 г. / Г.Г. Матишов, **О.В. Степаньян**, Григоренко К.С. и др. // Вестник Южного научного центра. – 2015. – Т. 11. – № 2. – С. 36–44. (ВАК)

19. **Степаньян, О.В.** Хроническое загрязнение повышает устойчивость бурой водоросли *Fucus vesiculosus* (L.) к действию углеводородов нефти / О.В. Степаньян // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2015. – № 2. – С. 22–25. (ВАК)

20. **Степаньян, О.В.** Как меняется фитобентос Южных морей России? / О.В. Степаньян // Природа. – 2016. – № 2. – С. 32–42. (ВАК)

21. Матишов, Г.Г. Нефтяное загрязнение Азовского и Черного морей растёт / Г.Г. Матишов, **О.В. Степаньян**, В.М. Харьковский, В.Г. Соьер // Природа. – 2016. – № 5. – С. 64–69. (ВАК)

22. **Степаньян, О.В.** Устойчивость макроводорослей Баренцева моря к нефтяному загрязнению / О.В. Степаньян, Г.Г. Матишов, В.В. Кулыгин // Наука Юга России. – 2017. – Т. 13. – №3. – С. 103–108. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-3-103-108. (BAK)
23. **Степаньян, О.В.** Макрофитобентос Новороссийской бухты (Черное море): деградация в условиях хозяйственной деятельности и климатических изменений / О.В. Степаньян // Вестник КамчатГТУ. – 2018. – №45. – С. 110–116. doi: 10.17217/2079-0333-2018-45-110-116. (BAK)
24. **Степаньян, О.В.** Влияние разливов нефти на прибрежно-водные и водные растения Азовского моря (модельный эксперимент) / О.В. Степаньян, В.В. Кулыгин // Вестник КамчатГТУ. – 2018. – №46. – С. 114–122. doi: 10.17217/2079-0333-2018-46-114-122. (BAK)
25. **Степаньян, О.В.** Влияние нефти и нефтепродуктов на ранние стадии развития макроводорослей Черного моря / О.В. Степаньян // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2018. – №3. – С. 32–37. doi: 10.30713/2411-7013-2018-3-32-37. (BAK)
26. Бердников, С.В. Оценка влияния разливов нефти на распределение прибрежно-водной растительности и водоплавающих птиц Северного Каспия (модельный эксперимент) / С.В. Бердников, **О.В. Степаньян**, Л.В. Маркитан // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2018. – №5. – С. 14–19. doi: 10.30713/2411-7013-2018-5-14-19. (BAK)
27. **Степаньян, О.В.** Филлофорное поле Зернова: 110 лет открытию уникального биологического объекта в Черном море / О.В. Степаньян // Природа. – 2019. – №6. – С. 62–70. doi: 10.7868/S0032874X19060085. (BAK)
28. **Степаньян, О.В.** Воздействие разливов нефтепродуктов на прибрежно-водные и водные растения / О.В. Степаньян // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2019. – №2. – С. 12–17. doi: 10.33285/2411-7013-2019-2(287)-12-17. (BAK)
29. **Степаньян, О.В.** Концептуальная схема реакции сообществ макрофитов к воздействию нефтяного загрязнения / О.В. Степаньян // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2020. – №3. – С. 26–32. doi: 10.33285/2411-7013-2020-3(294)-26-32. (BAK)
30. **Степаньян, О.В.** Макрофитобентос Черного и Азовского морей: флористические и экологические аспекты (обзор) / О.В. Степаньян // Наука юга России. – 2020. – Т. 16. – №4. – С. 26–38. doi: 10.7868/S25000640200404. (BAK)
31. **Степаньян, О.В.** Макрофитобентос в больших экосистемах южных морей России / О.В. Степаньян // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2020. – Т. 84. – №2. – С. 228–238. doi: 10.31857/S2587556620020132. (BAK)