

ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ
ЭКОСИСТЕМ И МОРСКАЯ РАДИОХЕМОЭКОЛОГИЯ

УДК 574.64

DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.07

БИОТЕСТИРОВАНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ МОРСКИХ ВОД В РАЙОНЕ АНАПЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАНКТОННЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ
PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM

Горбунова Т. Л.¹, Захарихина Л. В.¹, Лесникова П. С.¹, Рогожина Е. В.¹,
Керимзаде В. В.¹, Черненко С. П.¹, Быхалова О. Н.²

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр
Российской академии наук», Сочи, Российская Федерация,

²Государственный заповедник «Утриш», Анапа, Российская Федерация,

e-mail: tatianashaw@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена анализу токсических свойств морской воды в районе Анапы после разлива мазута марки М100 в Керченском проливе. Отбор проб морской воды осуществлялся в два этапа с целью изучения динамики изменения токсических свойств воды. Анализ проводился методом биотестирования с использованием культуры диатомовых планктонных водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. Выявлено снижение токсических свойств морской воды за период исследования. На первом этапе работы, проводившемся непосредственно после разлива мазута, вода на всех исследуемых станциях имела токсические свойства по отношению к тест-объекту. Второй этап, предпринятый примерно через два месяца после катастрофы, выявил снижение степени токсичности, как острой, так и хронической. При этом морская вода в акватории ст. Благовещенской демонстрировала наибольшую степень токсичности, а вода, отобранная в акватории с. Витязево, показала максимальное снижение токсических свойств по сравнению с первым этапом. Рекомендовано продолжить изучение динамики токсичности прибрежной морской воды в районе г. Анапы, принимая во внимание разлив мазута в Керченском проливе. Одновременно с этим необходимо исследовать качественно-количественную композицию биоценоза макрофитов для установления их влияния на изменение токсических свойств нефтепродукта в естественной среде и ремедиации прибрежных биоценозов.

Ключевые слова: нефтепродукты, токсичность, биотестирование, планктонные морские водоросли, ингибирование, биотрансформация

Введение

15 декабря 2024 г. в Керченском проливе произошёл разлив топочного мазута марки М100. Данный нефтепродукт по плотности близок к плотности воды или тяжелее её, поэтому, в отличие от других нефтепродуктов, не всплывает на поверхность, а уходит на дно или плавает в толще воды. В мире нет испытанных технологий по его удалению из толщи воды и опробованных программ комплексного эколого-геохимического мониторинга компонентов природной среды при соответствующем виде загрязнения [Третьякова, 2025].

Керченский пролив представляет собой важнейшую часть транспортной инфраструктуры, обеспечивающей связь между портами Азовского, Чёрного, и Средиземного морей и имеющей значительный грузооборот, в том числе мазута. При этом значительная часть таких нефтепродуктов перегружается с борта на борт на якорных стоянках в открытой части Керченского пролива.

С учётом этого риск разливов нефтепродуктов в морскую среду возрастает [Кузнецов, Федоров, Заграничный, 2011]. Подтверждением этого служат как серия аварий в Керченском проливе в 2007 г., так и инцидент с танкерами в декабре 2024 г. Описанная выше ситуация служит подтверждением высокой актуальности разработки системы экологического мониторинга прибрежной морской среды, включающего как физико-химические методы, так и биологические [Дрейзис, Видищева, Копырин, 2020].

Анализ качества морской воды с использованием планктонных диатомовых водорослей является неотъемлемой частью комплексного мониторинга воздействия загрязнителей на развитие прибрежных гидробиоценозов. Микроводоросли обладают сравнительно простой организацией, коротким жизненным циклом и являются представителями первичного звена трофических цепей водных экосистем. Эти качества позволяют использовать их в качестве надёжного тест-объекта при анализе текущего состояния морских вод [Stelmakh, Kovrigina, Gorbunova, 2021].

Ряд авторов описывают способность планктонных микроводорослей, в частности представителей диатомовых и перединиевых, адаптироваться к антропогенному загрязнению нефтяными углеводородами [Миронов, 1972; Миронов, 1985; Prouse, Gordon, Keizer, 1976]. Также было выявлено, что повышенное содержание нефтепродуктов в морской среде оказывало токсическое воздействие на скорость прироста численности клеток микроводорослей и подавление процесса их фотосинтеза. Однако при микроконцентрациях некоторых нефтяных углеводородов наблюдался эффект стимуляции роста численности морских пелагических микроводорослей [Патин, 2017; Gordon, Prouse, 1973]. Кроме того, в экспериментах с загрязнённой нефтепродуктами морской водой с использованием диатомовых водорослей были отмечены процессы трансформации нефтяных углеводородов в темновую фазу фотосинтеза, что приводило к увеличению токсического эффекта [Пуговкин и др., 2022].

С учётом вышесказанного аспекты воздействия различных нефтепродуктов на жизнедеятельность планктонных морских водорослей, являющихся основой трофических цепей биоценозов моря, и роль водорослей в процессах деструкции нефтяных углеводородов остаются недостаточно изученными [Воскобойников и др., 2020; Пуговкин и др., 2022]. Поэтому работа по изучению тест-реакций морских диатомовых планктонных водорослей на загрязнение прибрежных вод Чёрного моря нефтепродуктами в результате недавней катастрофы в Керченском проливе и мониторинг динамики их изменений во времени является актуальной. Целью нашего исследования было изучение токсического воздействия морской прибрежной воды на прирост численности клеток культуры диатомовых водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin в период после разлива мазута марки М100 в Керченском проливе.

Материалы и методы

В ходе данной работы изучалось токсическое воздействие морской прибрежной воды в районе г. Анапы на культуру диатомовых водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. Проводилось сравнение результатов биотестирования проб, отобранных на идентичных станциях в два этапа:

- 1) 22.01.2025;
- 2) с 14.02.2025 по 16.02.2025.

Пробы морской прибрежной воды были отобраны на следующих станциях (рис. 1):

- 1) г. Анапа, галечниковая часть пляжа (Ан 1);
- 2) г. Анапа, песчаная часть пляжа рядом с пирсом (Ан 2);
- 3) ст. Благовещенская (Ан 3);
- 4) с. Витязево, рядом с пирсом (Ан 4).

Проба Ан 1 была отобрана только в феврале 2025 г., во время экспедиции, из-за затруднений при отборе, вызванных штормовой погодой в регионе.

В качестве фоновых были приняты пробы морской воды прибрежной акватории заповедника «Утриш», отобранные 14.02.2025 при содействии сотрудников этой ООПТ в следующих локациях:

- 1) северная оконечность мыса Большой Утриш (Утр 1);
- 2) южная оконечность мыса Большой Утриш (Утр 2);
- 3) заповедник «Утриш», 900 м на юго-восток от западной границы заповедника (Утр 5).

Месторасположение станций отбора проб, а также содержание в водах нефтепродуктов относительно ПДК (ПДК содержания нефтепродуктов в морской воде — $0,05 \text{ мг/м}^3$ согласно Приказу № 552 Минсельхоза России от 13.12.2016 г.) и регионального фона показано на рис. 1. Сравнение значений содержания нефтепродуктов в морской воде с их ПДК в рыбохозяйственных водоёмах и региональным фоном было сделано для отображения изменений содержания нефтепродуктов в морской воде по отношению как к нормативным, так и к обычным для региона показателям.

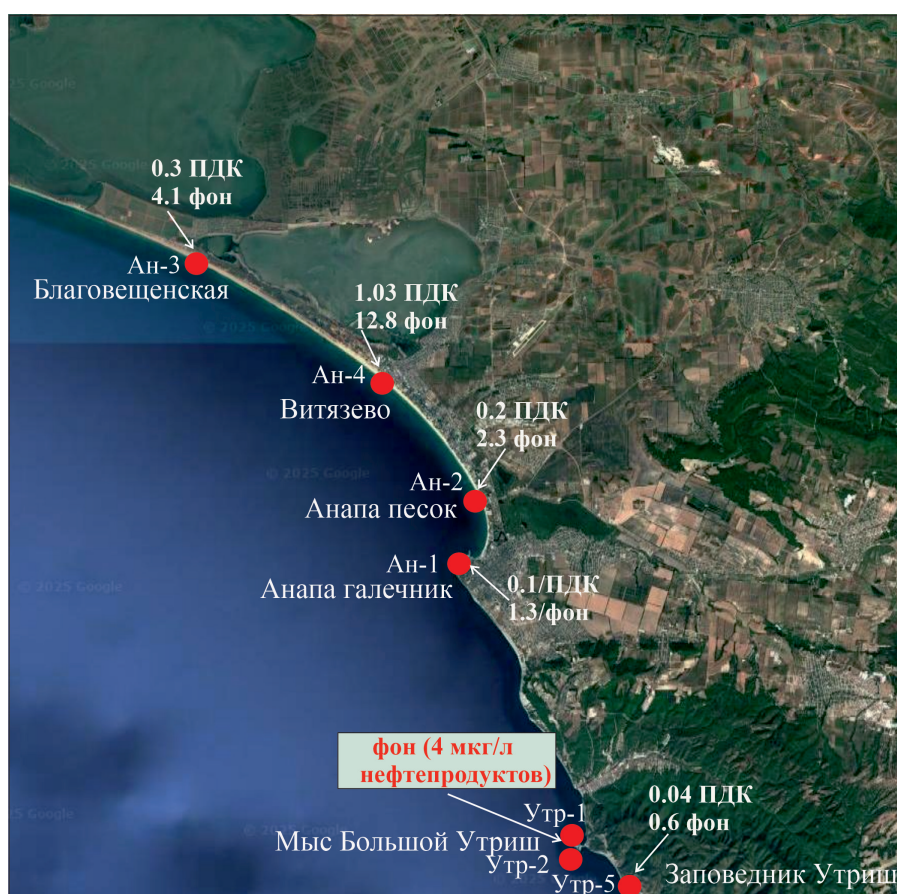


Рис. 1. Расположение станций отбора проб

Содержание нефтепродуктов в морской воде установлено методом флуориметрии [ПНД Ф 14.1:2:4.128-98].

Для биотестирования морской воды с использованием культуры морских планктонных водорослей *Phaeodactylum tricorutum* Bohlin проводились эксперименты по определению острой (24 часа экспозиции), подострой (72 часа экспозиции) и хронической (7 суток) токсичности загрязнённой морской воды в соответствии с методическими рекомендациями [Р 52.24.690-2006; Финенко и др., 2008]. Перед экспериментом морскую воду фильтровали через фильтр Millipore с диаметром пор $0,3 \text{ мкм}$ для удаления микроорганизмов, влияющих на результаты опытов.

Колбы с контрольными и тестируемыми пробами после добавления среды Гольдберга экспонировались в люминостате при оптимальной температуре (20 ± 2) °С и освещённости 2000 лк. Клетки водорослей просчитывались в камере Горяева, после чего рассчитывали коэффициент прироста/ингибирования численности клеток по формуле:

$$K = N_n / N_t, \quad (1)$$

где N_t — исходная численность клеток, рассчитанная в начале эксперимента в контроле и тестируемой воде;
 N_n — численность водорослей, просчитанная через n-е время со дня постановки эксперимента (1 сутки, 3 суток, 7 суток).

Степени отклонения значений коэффициента прироста численности клеток водорослей в опыте от контроля определяли по формуле:

$$X_k = (K_{\text{оп}} - K_{\text{конт}}) / K_{\text{конт}} \times 100 \%, \quad (2)$$

где X_k — отклонение коэффициента прироста численности клеток микроводорослей, %;
 $K_{\text{оп}}$ — коэффициент прироста численности клеток микроводорослей в опыте;
 $K_{\text{конт}}$ — коэффициент прироста численности клеток микроводорослей в контроле.

Критерием токсичности вод было достоверное отклонение от контроля средних значений коэффициентов прироста численности водорослей в опыте и контроле, которое оценивали по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью $P = 0,95$.

Результаты и обсуждение

Пробы прибрежной морской воды, отобранные в акватории заповедника «Утриш», не имели достоверных отклонений от контроля по показателям прироста численности. Выявленные незначительные вариации значений коэффициентов прироста численности клеток *P. tricornutum* в экспериментах находятся в рамках статистической погрешности (табл. 1).

Таблица 1

Результаты биотестирования проб прибрежной морской воды с использованием культуры микроводорослей *P. tricornutum* в акватории заповедника «Утриш» при $n = 6$, $p = 0,05$, $tSt = 2,23$ (табл.)

Дата отбора	Станция	Острое токсическое действие (24 ч)		Подострое токсическое действие (72 ч)		Хроническое токсическое действие (7 сут.)	
		отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента	отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента	отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента
14.02.25	УТР1	-1,34	0,25 < 2,23	-5,25	0,86 < 2,23	1,81	0,18 < 2,23
14.02.25	УТР2	8,75	2,00 < 2,23	2,31	0,49 < 2,23	14	2,18 < 2,23
14.02.25	УТР5	4,36	1,14 < 2,23	-0,23	0,07 < 2,23	6,87	0,87 < 2,23

Примечание: достоверных отклонений от контроля в исследуемых пробах не выявлено.

Прибрежные морские воды акватории заповедника «Утриш» могут использоваться как фоновые при исследовании воздействия загрязнённой морской воды региона на гидробионты. Минимальные концентрации нефтепродуктов выявлены в прибрежной акватории заповедника «Утриш» (Утр 5), что подтверждает факт предельно чистого местообитания в заповедной зоне и свидетельствует о том, что ООПТ выполняет свою основную функцию сохранения естественных условий обитания для живых организмов. Кроме того, результаты биотестирования воды акватории заповедника говорят о том, что мазутное загрязнение не распространяется юго-восточнее пляжа г. Анапы. Однако в качестве фона в данном исследовании принята акватория вблизи мыса Большой Утриш (Утр 1 и Утр 2). Последний расположен вне зоны загрязнения мазутом. При этом ситуация вблизи мыса в полной мере отражает нехарактерную для заповедника обстановку, связанную с регулярным судоходством в акватории, что позволяет исключить фоновое загрязнение.

Все исследуемые пробы морской прибрежной воды, отобранные в январе (22.01.2025), продемонстрировали выраженное токсическое воздействие (табл. 2) на прирост клеток *P. tricornutum* по сравнению с контролем. Проба воды в акватории галечного пляжа г. Анапы 22.01.25 не отбиралась. Отмечено острое токсическое воздействие (24 ч экспозиции) с эффектом ингибирования роста численности клеток в пробе Ан 2 (г. Анапа, песчаная часть пляжа рядом с пирсом). Эффект усиливался по мере увеличения экспозиции: обнаружено подострое токсическое действие (72 ч экспозиции).

Вода, отобранная на станции в ст. Благовещенской (Ан 3), также обладала выраженными токсическими свойствами с эффектом ингибирования роста численности клеток водорослей. В течение экспозиции продолжительностью от 24 ч до 7 суток токсический эффект возрастает. Похожая динамика выявлена и в опытах с водой со станции Ан 4 в с. Витязево.

По данным биотестирования, проведённого с пробами, отобранными на втором этапе исследования (14.02.25–16.02.25), острое токсическое воздействие отсутствовало в большинстве проб, кроме пробы со станции Ан 3 (ст. Благовещенская). Однако степень токсичности снизилась по сравнению с предыдущим отбором (в 1,9 раза в 24-часовом и в 1,1 раза в 72-часовом экспериментах, в 1,8 раза в 7-суточном опыте). Наибольшая токсичность была отмечена в этой пробе в 72-часовом эксперименте, отражающем подострое токсическое воздействие. В хроническом эксперименте (7 суток экспозиции) степень токсичности незначительно снизилась, но осталась существенной (отклонение от контроля по приросту численности клеток водорослей составило 45,98 %).

Вода песчаного пляжа в г. Анапе (Ан 2), отобранная в феврале, не оказывала острого токсического действия (за 24 ч экспозиции) на *P. tricornutum*. По сравнению с пробой, отобранной на первом этапе исследования, ингибирующее воздействие было снижено в 1,8 раза. В этой пробе было обнаружено подострое воздействие (72 ч экспозиции), также со снижением эффекта ингибирования в 1,8 раза. При экспозиции продолжительностью 7 суток в феврале достоверных отклонений от контроля обнаружено не было, что указывает на отсутствие хронического токсического воздействия на тест-объект в данной пробе. В пробе выявлен слабый (статистически недостоверный) эффект стимуляции роста численности водорослей.

При тестировании воды пробы, отобранной в акватории с. Витязево, острого токсического воздействия выявлено не было, отклонение от контроля, по сравнению с предыдущим отбором проб, снижено в 2,8 раза. Вода оказывала подострое токсическое действие в 72-часовом эксперименте, указывающем на наличие подострой токсичности. По сравнению с пробой, отобранной 22.01.2025, степень токсичности снизилась незначительно (в 1,1 раза). В то же время в длительном эксперименте (7 суток экспозиции), отражающем хроническое токсическое действие, степень токсичности была снижена в 4,3 раза, однако достоверное воздействие на водоросли морской воды в этой пробе сохраняется.

Результаты экспериментов отражены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты биотестирования проб прибрежной морской воды с использованием культуры микроводорослей *P. tricorutum* на побережье г. Анапы, подверженных воздействию загрязнения нефтяными углеводородами при $n = 6$, $p = 0,05$, $tSt = 2,23$ (табл.)

Дата отбора	Станция	Острое токсическое действие (24 ч)		Подострое токсическое действие (72 ч)		Хроническое токсическое действие (7 сут.)	
		отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента	отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента	отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента
14.02.25	Ан 1	14,60	1,60 < 2,23	38,41	7,28 > 2,23	44,77	6,35 > 2,23
22.01.25	Ан 2	20,49	2,41 > 2,23	82,54	3,03 > 2,23		
14.02.25	Ан 2	11,50	1,51 < 2,23	45,08	7,53 > 2,23	-3,64	0,59 < 2,23
22.01.25	Ан 3	32,65	4,31 > 2,23	61,68	6,83 > 2,23	84,47	11,85 > 2,23
14.02.25	Ан 3	17,41	4,27 > 2,23	58,53	11,29 > 2,23	45,98	6,86 > 2,23
22.01.25	Ан 4	21,92	3,71 > 2,23	28,98	5,6 > 2,23	82,67	9,71 > 2,23
14.02.25	Ан 4	7,91	1,26 < 2,23	25,06	4,14 > 2,23	19,21	3,07 > 2,23

Примечание: наличие достоверного отклонения от контроля показано полужирным шрифтом.

Таким образом, анализ сравнения показателей токсичности прибрежной морской воды в исследуемом районе показал, что эффект токсичности по отношению к *P. tricorutum* снизился за период исследования. При этом только на одном участке отмечается сохранение степени острой токсичности воды по отношению к используемому тест-объекту (ст. Благовещенская) при значительном её снижении по сравнению с предыдущим отбором проб. Из всех тестируемых проб максимум снижения степени токсичности в 24-часовых экспериментах наблюдался в пробах акватории пляжа с. Витязево (2,8 раза). Во всех пробах морская вода сохраняла токсические свойства в 72-часовом эксперименте с относительно незначительным снижением его степени по сравнению с 1-м этапом исследования (от 1,8 до 1,1 раза). При длительной экспозиции в пробах акватории песчаного пляжа г. Анапы в феврале хронического токсического воздействия выявлено не было, в то время как на первом этапе отбора хронический эксперимент на пробах данного участка не ставился ввиду высокой степени ингибирования реакций, влияющих на выживаемость водорослей на ранних этапах тестирования (82,54 % отклонения от контроля в 72-часовом опыте). Таким образом, хроническая токсичность морской прибрежной воды сохранялись на двух участках — в районах ст. Благовещенской и с. Витязево. При этом максимальное снижение степени токсического воздействия за длительный период экспозиции, по сравнению с предыдущим отбором, наблюдалось в экспериментах с морской водой, отобранной в прибрежной полосе с. Витязево (в 4,3 раза).

Предположительно, на динамику токсических свойств загрязнённой нефтепродуктами морской воды может влиять целый ряд факторов различного генезиса. Наряду с такими абиотическими характеристиками, как удалённость от места разлива мазута, геоморфология береговой линии, температура морской воды, сила прибойной волны, освещённость исследуемых участков, на воздействие нефтяных углеводородов на гидробионты и их трансформацию в природной среде также влияют и биотические факторы [Картамышева, Иванченко, 2018; Пуговкин и др., 2022].

Например, выявлено, что присутствие в морских биотопах некоторых видов гидробионтов (микро- и макроводорослей) способно ускорять естественную биотрансформацию нефтепродуктов в морской среде не только путём физического аккумуляирования нефтяных углеводородов на своей поверхности, но и включением их в клеточный метаболизм [Wrabel, Peckol, 2000].

Исследованием выявлено, что присутствие в прибрежных морских сообществах зелёных водорослей рода *Ulva*, толерантных к загрязнению углеводородами, способствует ремедиации таких токсикантов и снижению их токсических свойств. Установлено, что в присутствии талломов ульвы концентрации нефтепродуктов снижались до 86 % на пятые сутки в лабораторных условиях. Однако снижение токсических свойств может происходить не только за счёт уменьшения концентрации поллютанта, но и за счёт изменения его свойств [Воскобойников и др., 2020; Salakhov et al., 2021].

По наблюдениям авторов, обрастания пирса на пляже с. Витязево, где осуществлялся отбор проб, продемонстрировавших максимальное снижение токсических свойств за период исследования, включали значительное количество макрофитов рода *Ulva*, в то время как две другие станции (Ан 2 и Ан 3) были расположены на удалении от таких фитоценозов водорослей-обрастателей.

Изменения степени токсичности прибрежной морской воды, загрязнённой нефтепродуктами, по отношению к морским планктонным диатомовым водорослям *P. tricornutum* показано на графике (рис. 2).

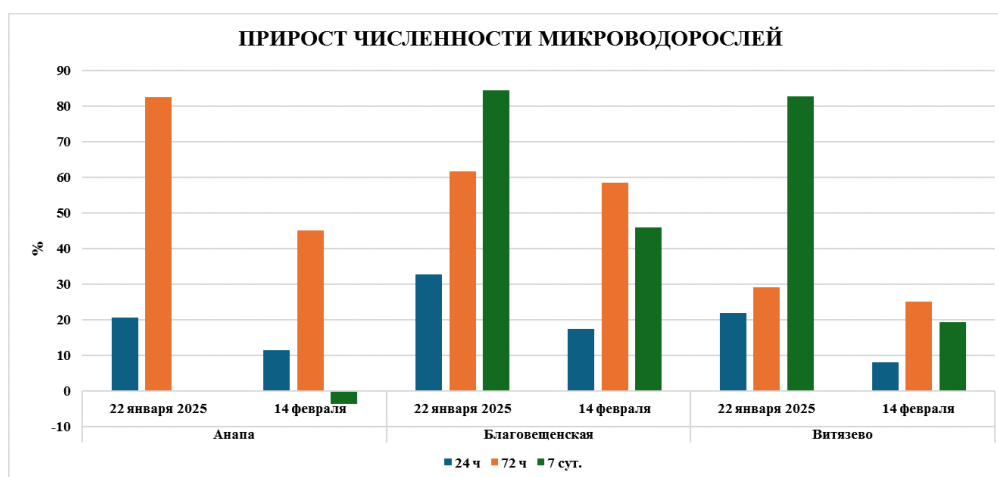


Рис. 2. Коэффициенты прироста численности клеток *P. tricornutum* в экспериментах биотестирования проб прибрежной морской воды в районе г. Анапы, отобранных в разные периоды

Принимая во внимание результаты данного исследования, для лучшего понимания процессов естественной трансформации нефтяных углеводородов в морской среде и возможного снижения их токсических свойств в результате жизнедеятельности, в том числе функционирования адаптивных механизмов гидробионтов (в особенности сообществ организмов-автотрофов), рекомендуется продолжить работу с учётом анализа качественно-количественного состава прибрежных биоценозов бентоса и перифитона.

Изучение системы донные отложения — вода — макроводоросли — микроорганизмы (микроводоросли и бактерии) и её роли в ремедиации морской прибрежной экосистемы в контексте загрязнения среды нефтяными углеводородами может не только предоставить сведения о состоянии прибрежных биоценозов моря, но и дать ключ к разработке эффективной системы мер по снижению воздействия экологической катастрофы.

Выводы

На основе исследования были сделаны следующие выводы:

Результаты биотестирования воды и натуральных наблюдений прибрежных биоценозов акватории заповедника «Утриш» соответствуют состоянию предельно чистого местообитания в заповедной зоне и свидетельствует о том, что ООПТ выполняет свою основную функцию сохранения естественных условий обитания. Это позволяет использовать данный участок в качестве фонового при дальнейшем исследовании морских прибрежных экосистем в регионе и антропогенного воздействия на них.

Токсическое воздействие морских прибрежных вод в районе г. Анапы на планктонные диатомовые водоросли *P. tricornutum* снижалось в продолжение приблизительно двух месяцев после разлива мазута. Обнаружено, что все исследуемые пробы морской прибрежной воды, отобранные на первом этапе работы, продемонстрировали выраженное токсическое воздействие на тест-объект по сравнению с контролем, преимущественно с эффектом ингибирования роста численности водорослей. Однако в большинстве проб, отобранных в феврале, острое токсическое воздействие отсутствовало. Выявлено, что вода, отобранная на станциях ст. Благовещенской и с. Витязево, сохраняла свойства подострой и хронической токсичности за время исследования. Степень токсичности этих проб была существенно снижена по сравнению с первым этапом.

При этом наиболее выраженный эффект токсичности наблюдался в пробах из акватории ст. Благовещенской, а максимальное снижение токсических свойств, по сравнению с первым этапом исследования, отмечено в пробах из акватории с. Витязево.

Рекомендуется на следующих этапах исследования, с целью мониторинга состояния прибрежной полосы Чёрного моря, подвергшейся влиянию разлива нефтепродуктов, анализа динамики изменений водной среды и её биоценозов и разработки системы мер их ремедиации, продолжить комплексное изучение системы донные отложения — вода — макроводоросли — микроорганизмы, частью которого является настоящая работа.

Список литературы

1. Воскобойников Г. М., Рыжик И. В., Салахов Д. О., Метелькова Л. О., Жаковская З. А., Лопушанская Е. М. Поглощение и преобразование дизельного топлива водорослью *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber et D. Mohr, 1805 (Rhodophyta) и ее возможная роль в биоремедиации морской воды // Биология моря. – 2020. – Т. 46, № 2. – С. 135–141. – <https://doi.org/10.31857/S0134347520020102>
2. Дрейзис Ю. И., Видищева Е. В., Копырин А. С. Современные подходы к управлению качеством окружающей среды морских рекреационных территорий (на примере Краснодарского края) // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020. – № 11-3. – С. 468–476. – <https://doi.org/10.17513/vaael.1450>
3. Картамышева Е. С., Иванченко Д. С. Загрязнение Мирового океана нефтью и нефтепродуктами // Молодой ученый. – 2018. – № 25. – С. 20–23. – <https://www.elibrary.ru/ousvth>
4. Кузнецов А. Н., Федоров Ю. А., Заграничный К. А. О результатах трехлетнего мониторинга разлива мазута в Керченском проливе // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. – 2011. – № 4. – С. 90–95. – <https://www.elibrary.ru/oetzlz>
5. Миронов О. Г. Биологические ресурсы моря и нефтяное загрязнение. – Москва : Пищ. пром-сть, 1972. – 105 с. – <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/12962>
6. Миронов О. Г. Взаимодействие морских организмов с нефтяными углеводородами. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 128 с. – <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/8320>

7. Патин С. А. Нефть и экология континентального шельфа. В 2 т. Т. 2. Экологические последствия, мониторинг и регулирование при освоении углеводородных ресурсов шельфа. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ВНИРО, 2017. – 284 с.
8. ПНД Ф 14.1:2:4.128-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» : дата введ. 07.08.2012 / разраб. ООО «Люмэкс – маркетинг». – Москва : [б. и., 2017]. – 25 с.
9. Пуговкин Д. В., Воскобойников Г. М., Метелькова Л. О., Олейник А. А., Салахов Д. О. Влияние дизельного топлива на количественные показатели диатомовых водорослей, динофлагеллят и инфузорий губы Зеленецкой Баренцева моря в условиях эксперимента // Наука юга России. – 2022. – Т. 18, вып. 3. – С. 68–74. – <https://doi.org/10.7868/S25000640220308>
10. Р 52.24.690-2006. Оценка токсического загрязнения вод водотоков и водоемов различной солености и зон смешения речных и морских вод методами биотестирования : утв. и введ. в действие 21.01.2007 / разраб. ГУ «Гидрохим. ин-т» Росгидромета. – Ростов-на-Дону : [б. и.], 2006. – 35 с. – URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/4c5/4293834029.pdf> (дата обращения: 07.11.2025).
11. Третьякова Т. В. Презентация «Экологические последствия крушения танкеров в Керченском проливе 15 декабря 2024 года» // Мультиурок. Готовые материалы для учителей на каждый урок для работы в классе и удалённо / ООО «Мультиурок». – URL: <https://multiurok.ru/files/ekologicheskie-posledstviia-krusheniia-tankerov-v.html>. – Дата публ.: 05.01.2025.
12. Финенко З. З., Стельмах Л. В., Галатюнова О. А., Бабич И. И. Культивирование водорослей в лабораторных условиях // Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования / Нац. акад. наук Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского ; под ред. Ю. Н. Токарева [и др.]. – Севастополь : ЭКОСИ – Гидрофизика, 2008. – Гл. 6. – С. 186–200.
13. Gordon D. C. Jr., Prouse N. J. The effects of three oils on marine phytoplankton photosynthesis // Marine Biology. – 1973. – Vol. 22, iss. 4. – P. 329–333. <https://doi.org/10.1007/BF00391389>
14. Prouse N. J., Gordon D. C. Jr., Keizer P. D. Effects of low concentrations of oil accommodated in sea water on the growth of unialgal marine phytoplankton cultures // Journal of the Fisheries Board of Canada. – 1976. – Vol. 33, iss. 4. – P. 810–818. – <https://doi.org/10.1139/f76-098>
15. Salakhov D., Pugovkin D., Ryzhik I., Voskoboinikov G. The changes in the morpho-functional state of the green alga *Ulva intestinalis* L. in the Barents Sea under the influence of diesel fuel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 937, iss. 2. – Art. 022059. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022059>
16. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T. Response of marine microalgae *Phaeodactylum tricorutum*, *Prorocentrum cordatum* and *Gyrodinium fissum* to complex pollution of Sevastopol bays (Black Sea) // Ecologica Montenegrina. – 2021. – Vol. 48. – P. 109–116. – <https://doi.org/10.37828/em.2021.48.13>
17. Wrabel M. L., Peckol P. Effects of bioremediation on toxicity and chemical composition of № 2 fuel oil: Growth responses of the brown alga *Fucus vesiculosus* // Marine Pollution Bulletin. – 2000. – Vol. 40, iss. 2. – P. 135–139. – <https://elibrary.ru/aeprej>

**BIOASSAY OF COASTAL SEA WATERS AFFECTED BY OIL PRODUCT SPILLAGE
NEAR ANAPA USING PLANKTONIC MICROALGAE
*PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM***

**Gorbunova T. L.¹, Zaharikhina L. V.¹, Lesnikova P. S.¹, Rogogina E. V.¹, Kerimzade V. V.¹,
Chernenko S. P.¹, Byhalova O. N.²**

¹*Federal Research Center «Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»,
Sochi, Russian Federation,*

²*Utrish State Nature Reserve, Anapa, Russian Federation,
e-mail: tatianashaw@mail.ru*

Abstract: The article is devoted to the analysis of toxic effects of sea water within the Anapa area polluted with petroleum hydrocarbons following the M100 fuel oil spill in the Kerch Channel. Seawater sampling was carried out in two stages in order to determine the dynamics of changes in the toxic properties of water. The analysis was carried out by bioassay using a culture of the diatom planktonic algae *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. It was established that the undertaken beach cleaning operations, mainly by mechanical processes, resulted in a positive effect on the sanitary and toxicological properties of seawater. During the first phase of the study, conducted shortly after the fuel oil spill, the water at all stations studied had toxic effects on the test specimen. A second phase, undertaken approximately two months after the catastrophe, revealed a reduction in toxicity, both acute and chronic. At the same time, seawater from the aquatic area near the village of Blagoveshchenskaya demonstrated the high level of toxicity, and the seawater collected from the aquatic area of Vityazevo village proved the maximum reduction of toxic properties in comparison with the first stage. It is recommended to continue studying the dynamics of the toxicity of marine coastal waters polluted as a consequence of the fuel oil spill, taking into account the qualitative and quantitative composition of macrophytes biocenosis in order to study their effect on the changes of the petroleum hydrocarbon toxic properties in the natural environment and the coastal biocenosis remediation.

Keywords: petroleum hydrocarbons, toxicity, bioassay, planktonic marine algae, inhibition, biotransformation

Сведения об авторах

Горбунова Татьяна Львовна	научный сотрудник, лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ ШЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация, e-mail: tatianashaw@mail.ru
Захарихина Лалита Валентиновна	доктор биологических наук, главный научный сотрудник (руководитель темы), лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ ШЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
Лесникова Полина Сергеевна	младший научный сотрудник, лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ ШЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
Рогожина Елена Вячеславовна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геоэколо- гии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ ШЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация

Керимзаде Вадим Вагифович	младший научный сотрудник, лаборатория агрохимии и почвоведения ФБГНУ ФИЦ СЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
Черненко Сергей Петрович	младший научный сотрудник, лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ СЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
Быхалова Ольга Николаевна	заместитель директора по научной работе, ФГБУ «Государственный заповедник «Утриш», ул. Северная, 41В, г. Анапа, 353445, Российская Федерация

Поступила в редакцию 21.04.2025
Принята к публикации 25.12.2025