

УДК [[574.635:582.26/.27]:665.7](268.45.04)

РОЛЬ ВОДОРΟΣЛЕЙ-МАКРОФИТОВ В БИОРЕМЕДИАЦИИ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ КОЛЬСКОГО ЗАЛИВА БАРЕНЦЕВА МОРЯ

© 2021 г. Г. М. Воскобойников¹, С. В. Малавенда¹, Л. О. Метелькова²¹Мурманский морской биологический институт Российской академии наук,
Мурманск, Российская Федерация²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: grvosk@mail.ruПоступила в редакцию 07.02.2021; после доработки 11.05.2021;
принята к публикации 01.09.2021; опубликована онлайн 20.09.2021.

Выполнена оценка вклада макроводорослей в очистку от дизельного топлива Кольского залива Баренцева моря. В основу расчётов положены результаты: 1) экспедиционных наблюдений последних лет о запасах, распределении и биомассе водорослей-макрофитов отделов Chlorophyta и Rhodophyta и класса Phaeophyceae из отдела Ochrophyta, обитающих в трёх частях залива; 2) лабораторных исследований по способности макроводорослей *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*, *F. distichus*, *F. serratus*, *Saccharina latissima*, *Palmaria palmata* и *Ulvaria obscura* к нейтрализации токсического действия дизельного топлива. Показано, что общий вклад у исследованных водорослей в биоремедиацию от дизельного топлива в заливе составляет 312 кг в сутки. Выявлены различия в поглощающей способности у водорослей-макрофитов. Так, наиболее эффективно процесс осуществляет *S. latissima*, минимальная эффективность участия в биоремедиации определена у *U. obscura*. Сделан вывод о том, что имеющиеся литоральные и сублиторальные заросли морских макроводорослей Кольского залива являются важным элементом в процессе профилактической, повседневной очистки вод залива от нефтепродуктов. Включение в расчёты данных о способности к нейтрализации дизельного топлива у других представителей фитобентоса залива может увеличить роль водорослей-макрофитов в очистке прибрежных морских акваторий от нефтепродуктов. Сделан вывод, что заросли бурых водорослей — важная составляющая системы репарации и гомеостаза в прибрежных экосистемах. Уничтожение даже части природных сообществ водорослей может изменить баланс, существующий в экосистеме.

Ключевые слова: макрофиты, экосистема Кольского залива, устойчивость, дизельное топливо, биоремедиация

Кольский залив Баренцева моря имеет протяжённость 57 км и занимает одно из ведущих мест в Арктике по транспортировке и перегрузке нефтепродуктов (далее — НП). На побережье залива уже построено несколько комплексов по переработке углеводородного сырья и идёт строительство новых. Кольский залив считается одним из самых загрязнённых морских водоёмов на Кольском полуострове. Проблема загрязнения усугубляется тем, что большую часть года температура воды в заливе немногим превышает 0 °С; при данной температуре естественное разложение НП

сильно замедлено. Существенная роль в очистке воды от НП принадлежит микроорганизмам, в том числе микроводорослям (Ильинский, 1995; Перетрухина и др., 2006; Семенова и др., 2009; Atlas, 1978; Wrabel & Peckol, 2000), но в полярную ночь их вклад в биоремедиацию уменьшается.

В Кольском заливе содержание НП в воде (фоновое) варьирует от $0,04 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (около 1 ПДК) до $2,3 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (46 ПДК); при этом $1 \text{ ПДК} = 0,05 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. Фоновое содержание НП в губах Мурманского побережья в летне-осенний период колеблется от 3 до 8 ПДК. Губ, совершенно чистых от НП, обнаружено не было. В зимний и весенний периоды в ряде губ содержание НП снижалось до 1–2 ПДК в связи с тем, что движение судов, преимущественно рыболовецких, усиливается весной и затухает поздней осенью (Воскобойников и др., 2017; Кольский залив и нефть, 2018). Наиболее высокая концентрация НП в заливе отмечена в южном его колене в районе нефтебазы, торгового порта, причалов «Атомфлота», а также в районе перегрузочных комплексов в среднем колене, что объясняется имеющимися источниками загрязнения: функционирующими причалами, судоходством, происходящей заправкой судов, перегрузкой топлива из стоящих на рейде танкеров. В период разливов НП их концентрация в воде достигает $25\text{--}50 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (500–1000 ПДК) и более высоких значений.

В последние годы нами предложено использовать водоросли-макрофиты в ремедиации воды Баренцева моря от НП. Показано, что многие виды макрофитов проявляют устойчивость к влиянию НП. Диапазон толерантности различается у видов, даже близких по систематике и строению, однако все исследованные нами и другими авторами в предшествующих работах микроводоросли (12 видов) демонстрировали способность к аккумуляции НП из морской воды на поверхности таллома, их деструкции с помощью эпифитных углеводородокисляющих бактерий, последующему поглощению и нейтрализации НП в тканях растений. Выявлено, что уменьшение содержания НП в воде идёт параллельно с его увеличением в талломах водорослей (Воскобойников и др., 2017, 2018).

Проведённые исследования позволили создать доказательную базу, которая подтверждает способность микроводорослей, различающихся по строению и систематической принадлежности, к сорбции и деструкции НП (Воскобойников и др., 2017, 2018, 2020; Pilatti et al., 2016; Pugovkin et al., 2016; Ryzhik et al., 2019). На основе симбиотической ассоциации микроводорослей и углеводородокисляющих бактерий созданы биотехнологии плантаций-биофильтров для очистки прибрежных акваторий от НП. Неоднократно были выдвинуты предположения о роли прибрежных фитocenozов в биоремедиации морской воды от различных токсикантов (Миронов, 1985; Патин, 2017b), однако конкретных сведений и расчётов, основанных на натуральных или лабораторных экспериментах, приведено не было.

В большой мере это можно объяснить отсутствием работ по оценке запасов и видового разнообразия микроводорослей в описываемых акваториях. Так, исследования запасов водорослей Мурманского побережья, осуществлённые в 1980–1990-х гг. (Макаров, 1998; Пельтихина, 2005), в которых внимание было уделено и фитобентосу Кольского залива, касались только ламинариевых водорослей. Представленная работа является первой, где выполнены расчёты участия макрофитобентоса в биоремедиации от НП для залива. В основу расчётов положены результаты экспедиционных наблюдений последних лет о распределении и биомассе доминантных представителей фитобентоса: *Fucus vesiculosus*, *F. distichus*, *F. serratus*, *Ascophyllum nodosum*, *Saccharina latissima*, *Palmaria palmata* и *Ulvaria obscura* — в трёх районах Кольского залива. Предварительные исследования показали, что для анализируемых видов характерны достаточно широкий диапазон толерантности к НП и относительно высокий коэффициент поглощения токсиканта (Воскобойников и др., 2017, 2018, 2020; Ryzhik et al., 2019). Параллельно натурным наблюдениям проведены лабораторные анализы способности к нейтрализации дизельного топлива (далее — ДТ) у указанных выше видов водорослей, а также выполнена оценка их суммарной роли в биоремедиации от ДТ Кольского залива.

Авторы данной статьи надеются, что работа внесёт вклад в понимание роли прибрежных фитоценозов в биоремедиации морской воды от нефтепродуктов не только в Кольском заливе Баренцева моря, но и в других прибрежных акваториях Мирового океана.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Лабораторные эксперименты по влиянию нефтепродуктов на водоросли. Объектами исследования были бурые водоросли (Phaeophyceae) (фукоиды *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*, *F. distichus* и *F. serratus*; ламинариевая водоросль *Saccharina latissima*), а также зелёная (Chlorophyta) *Ulvaria obscura* и красная (Rhodophyta) *Palmaria palmata*. Талломы, приблизительно равные по размеру и массе, отбирали в губе Зеленецкая (69°07'09"N, 36°05'35"E) Баренцева моря (рис. 1а). Образцы *S. latissima* собирали в сублиторали с глубины примерно 3 м, остальные виды — на литорали. Водоросли очищали от обрастателей и помещали в стеклянные ёмкости с морской водой объёмом 1,3 л, за исключением *S. latissima*, опыты с которой проводили в 3-литровых сосудах. Морскую воду солёностью 33 ‰ отбирали из мест обитания водорослей и фильтровали через ватно-марлевый фильтр; далее в неё добавляли летнее ДТ в количестве 6,5 мг·л⁻¹, что составляет 130 ПДК для воды по валовому содержанию НП. Морскую воду и ДТ не стерилизовали. Опыт проводили в термостатируемом боксе при температуре +7...+8 °С, освещении 16–18 Вт·м⁻² и постоянной аэрации воды.

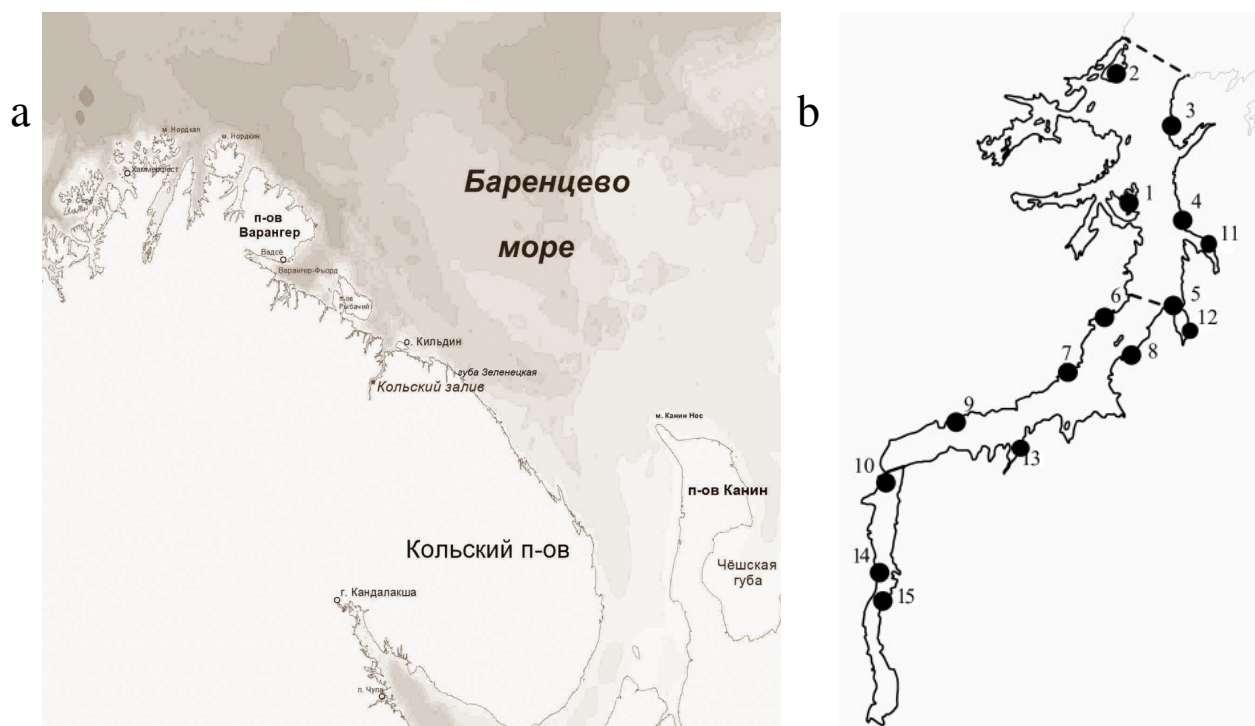


Рис. 1. Район работ: а — Кольский залив и губа Зеленецкая Баренцева моря; б — станции отбора проб (1–15) в Кольском заливе

Fig. 1. Work area: а – the Kola Bay and Zelenetskaya Bay of the Barents Sea; б – sampling stations (1–15) in the Kola Bay

Общая продолжительность опыта с определением морфофункционального состояния водорослей составила 10 суток. Валовое содержание НП в воде и водорослях определяли методом газовой хроматографии / масс-спектрометрии в начале эксперимента и через 5 суток. Пробоподготовку и инструментальный анализ выполняли по описанной ранее методике (Воскобойников и др., 2018). Для оценки фонового уровня НП анализировали пробы воды и водорослей

из губы Зеленецкая. Расчёты содержания ДТ в водорослях выполнены на сухую массу с учётом коэффициента соотношения сырой/сухой массы: у сахарины — 7/1; фукоидов — 5/1; пальмари и ульварии — 4/1. В течение опыта изменение состояния и морфологии таллома водорослей контролировали визуально и с помощью светооптических методов с использованием микроскопа Микмед-6.

Оценка биомассы и запасов водорослей в Кольском заливе. Оценку запасов макрофитов проводили по традиционной методике (Пельтихина, 2005). Материал отобран в экспедициях ММБИ РАН в 2009–2019 гг. (при частичной финансовой поддержке ВОО «Русское географическое общество»). Осмотр значительной части береговой линии залива позволил составить описание распределения макрофитобентоса и определить размеры пояса фукоидов для оценки их запасов.

Для расчёта биомассы макрофитобентоса и отдельных видов водорослей выполняли отбор количественных проб методом пробных площадей, закладываемых вдоль трансекты, перпендикулярной урезу воды. На всём протяжении залива было заложено 15 трансект, в южном и среднем коленах работы проводили раз в два года (рис. 1b). Площадь рамки при отборе проб на литорали — 0,25 м², в сублиторали — 1,0 м². На каждом разрезе выполняли станции в верхнем, среднем и нижнем горизонтах литорали (около 3,0; 1,5; 0,5 м над уровнем моря соответственно); в сублиторали — на глубинах 5, 10 и 15 м. На каждой станции отбирали по три пробы. Ширину пояса вида оценивали в среднем для участка сравнительно однородной растительности протяжённостью не менее 500 м. Доминирующие виды и проективное покрытие дна водорослями определяли визуально. Отбор проб в сублиторали осуществляли с помощью легководолазного снаряжения. Протяжённость участков литорали с определёнными типами сообществ оценивали в программе MapViewer 8.0. Топографическая основа — контур береговой линии навигационных карт для Кольского залива, оцифрованный специалистами ММБИ РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение, запасы и биомасса макрофитов в Кольском заливе. Рассматриваемые четыре вида фукоидов распределены на литорали Кольского залива неравномерно.

Fucus vesiculosus встречается повсеместно от эстуария реки Тулома до устья залива; вид использует для прикрепления разных субстрат, в том числе гидротехнические сооружения. Максимальные запасы обнаружены на литорали среднего колена. В большей части литорали биомасса *F. vesiculosus* составляет около 1 кг·м⁻², но данный вид занимает значительную площадь, поэтому его запасы очень велики (табл. 1). На ряде участков литорали среднего колена биомасса достигает (9,4 ± 0,3) кг·м⁻². Общий запас в заливе составляет 2315,0 т сырой массы, что в пересчёте на сухую массу равняется 463,0 т.

Fucus distichus произрастает в среднем и нижнем горизонтах литорали всего Кольского залива. Наибольшая биомасса отмечена на валунных пляжах в среднем и северном коленах залива — до (6,9 ± 3,4) кг·м⁻², однако запасы его сосредоточены в южном колене, где вид покрывает обширные песчаные пляжи. На отвесных скалах биомасса не превышает 1 кг·м⁻². Общий запас в заливе — 2017,5 т сырой массы, что в пересчёте на сухую массу составляет 403,5 т.

Ascophyllum nodosum обитает преимущественно на защищённых или слабо защищённых от волнового воздействия валунных пляжах, значительного развития его заросли достигают на островах с подветренной стороны. В северном колене биомасса вида составляет до (4,2 ± 0,8) кг·м⁻². Общий запас в заливе — 371,4 т сырой массы, что соответствует 74 т сухой массы.

Fucus serratus распространён главным образом в северном колене залива, высокая биомасса [(6,1 ± 1,5) кг·м⁻²] отмечена на острове Екатерининский. Общие запасы *F. serratus* — лишь 114 т сырой массы, что в пересчёте на сухую массу составляет 22,7 т.

Saccharina latissima образует заросли в сублиторали на глубине 4–6 м в северном колене залива и встречается в небольшом количестве в среднем колене. Запасы сахарины составляют 450 т сырой массы, что соответствует 64,3 т сухой массы.

Palmaria palmata приурочена к крупнокаменистому субстрату, встречается преимущественно в среднем и нижнем горизонтах литорали в среднем и южном коленах залива. Запасы — 155,3 т сырой массы, что в пересчёте на сухую массу составляет 38,8 т.

Ulvaria obscura присутствует фрагментарно на литорали в трёх коленах залива. Ульвария занимает разнообразные субстраты — от каменистых до деревянных сооружений, металлических бортов, брошенных на литорали судов. Запасы составляют 5,38 т сырой массы, что соответствует 1,35 т сухой массы.

Таблица 1. Удельная скорость поглощения дизельного топлива макрофитами и расчётные объёмы поглощения дизельного топлива водорослями в разных частях Кольского залива

Table 1. Specific rate of diesel fuel absorption by algae macrophyte and estimated volumes of diesel fuel absorption by algae in different areas of the Kola Bay

Вид	Удельная скорость поглощения ДТ, $\text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$	Объём поглощённых нефтепродуктов, $\text{кг}\cdot\text{сут}^{-1}$			
		Северное колено	Среднее колено	Южное колено	Весь залив
<i>F. vesiculosus</i>	202,0	12,4	64,2	17,2	93,8
<i>F. distichus</i>	169,0	13,8	22,8	31,6	68,2
<i>A. nodosum</i>	44,0	0,8	2,2	0,8	3,8
<i>F. serratus</i>	123,0	3,0	0	0	3,0
Фукусовые всего	538,0	30,0	89,2	49,6	168,8
<i>S. latissima</i>	1752,0	138,0			138,0
<i>P. palmata</i>	146,4		4,4		4,4
<i>U. obscura</i>	25,4		0,17		0,17
Всего		168,6	92	51,9	312,5

Потенциальный вклад макрофитов в сорбцию нефтепродуктов: результаты экспериментов. Содержание НП у макрофитов в месте обитания (при концентрации НП в воде $0,2 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, то есть 4 ПДК) было следующим: *F. vesiculosus* — $25 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$, *F. distichus* — 24, *F. serratus* — 28, *A. nodosum* — 18, *S. latissima* — 1980, *P. palmata* — 124, *U. obscura* — $1,4 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$. Визуальные и светооптические наблюдения не показали каких-либо изменений у талломов фукуса после 5 и 10 суток пребывания в морской воде с дизельным топливом в концентрации $6,5 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (130 ПДК). Не наблюдали изменения цвета таллома, а в клетках — плазмолиза, изменения цвета пластид и вакуолизации, описанных ранее при изучении влияния на водоросли других повреждающих факторов (Ryzhik et al., 2019).

Через 5 суток эксперимента содержание ДТ у четырёх видов фукусовых водорослей, а также у сахарины, пальмари и ульварии составило: у *F. vesiculosus* — $1036 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$, *F. distichus* — 870, *F. serratus* — 641, *A. nodosum* — 236, *S. latissima* — 10740, *P. palmata* — 856, *U. obscura* — $128 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$ в расчёте на сухую массу. В табл. 1 приведены усреднённые данные поглощения дизельного топлива исследованными видами водорослей за сутки и объём поглощённого ДТ в разных частях Кольского залива. Также показаны результаты расчётов суммарного суточного вклада изученных водорослей в ремедиацию залива от НП с учётом определённых их общих запасов.

ОБСУЖДЕНИЕ

В проведённых экспериментах у всех исследованных макрофитов выявлена устойчивость к дизельному топливу в концентрации $6,5 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ (130 ПДК). У водорослей не отмечены признаки повреждения после 10 суток нахождения в экспериментальных условиях.

Анализ содержания НП у макрофитов, отобранных для экспериментов (при концентрации НП в воде в месте обитания $0,2 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, то есть 4 ПДК), показал, что водоросли различаются по способности к поглощению НП. Если среди трёх видов рода *Fucus* отличия незначительны (значения от $24 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ у *F. distichus* до $28 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ у *F. serratus*), то *U. obscura* поглощала НП в 6 раз меньше ($1,4 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$), а пальмария, напротив, в 5 раз больше. Сахарина накапливала ДТ при данной концентрации в воде в 80 раз больше, чем фукусы. При более высоком содержании НП в воде уровень поглощения ДТ водорослями меняется. Максимальный уровень поглощения ($1752 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ в сутки) показывает сахарина; она поглощает в 3,3 раза больше, чем суммарно все фукусовые водоросли. Пальмария при относительно высоких концентрациях ДТ в воде уступает по уровню поглощения ДТ не только сахарине, но и двум видам фукуса (табл. 1).

Основные источники загрязнения в Кольском заливе сосредоточены в южном и среднем колене. Здесь идут перегрузочные работы углеводородного сырья, причём часть из них проводится в среднем колене с крупнотоннажных танкеров, стоящих на рейде. Также здесь работают судоремонтные предприятия, доки и нефтебазы. Нефтепродукты, попавшие в воду в результате разливов, преимущественно оказываются на литорали (Кольский залив и нефть, 2018 ; Патин, 2017b), то есть в месте произрастания фукусов и пальмарии, которые выполняют в данной ситуации роль природного биофильтра. Фукус наиболее устойчив к НП среди исследованных водорослей. Ранее нами отмечена способность у *F. vesiculosus* переживать длительное время в условиях постоянного загрязнения — на литорали на камнях в слое мазута («шоколадного мусса»), вблизи нефтяных баз и портов. Водоросли сохраняли жизненные функции, однако их показатели функциональной активности были на более низком уровне, чем показатели образцов фукуса пузырчатого из чистых мест обитания (Воскобойников и др., 2017). Остальные виды фукуса демонстрируют меньшую устойчивость к загрязнению, но тем не менее тоже выживают длительное время при покрытии поверхности плёнкой НП и участвуют в детоксикации (Степаньян и Воскобойников, 2006). Значительная способность к аккумуляции и нейтрализации НП зарегистрирована и у *P. palmata*.

Сравнивая объёмы потенциально поглощённого водорослями ДТ, отметим, что основную роль в биоремедиации играют фукусовые. *Ulvaria obscura* по запасам и способности к поглощению имеет наименьшие значения среди исследованных водорослей — $5,38 \text{ т}$ сырой массы и $25,4 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сутки}^{-1}$ соответственно.

Таким образом, исследованные водоросли-макрофиты могут нейтрализовать 312 кг дизельного топлива за одни сутки. По современной классификации, данный объём НП соответствует среднему локальному разливу нефтепродуктов в морской воде (Патин, 2017a). На эффективность участия водорослей в биоремедиации оказывают влияние такие факторы, как: 1) температура, свет, гидродинамика, солёность, обуславливающие физиологическое состояние водорослей, количественный и качественный состав, углеводородокисляющую активность микроорганизмов — эпифитов водорослей; 2) состав нефтепродуктов. В своей работе мы не смогли учесть вклад в биоремедиацию Кольского залива большой группы водорослей — обитателей залива, представителей различных систематических групп, из-за отсутствия данных об их способности к нейтрализации НП. Включение этих сведений может увеличить значимость водорослей-макрофитов для биоремедиации прибрежных акваторий, хотя она несомненна и сейчас.

Заключение. Экосистема Кольского залива выдерживает хроническое нефтяное загрязнение на протяжении более чем ста лет благодаря стечению нескольких обстоятельств. Большая часть береговой линии в заливе занята валунными пляжами, на которых сформировались

сообщества фукусовых водорослей с очень высокой биомассой. Эти сообщества обеспечивают постоянную очистку вод от нефтепродуктов, берут на себя основную нагрузку по нейтрализации не только НП, растворённых в воде, но и «плёночных» форм токсикантов. В сублиторали ламинариевые водоросли, развиваясь на отдельных валунах, очищают воду от диспергированных НП. Эффективность участия ламинариевых водорослей в биоремедиации во многом обеспечена большой площадью поверхности соприкосновения с НП и, возможно, высокой численностью на поверхности таллома эпифитных углеводородокисляющих бактерий.

В водах Кольского залива постоянно присутствуют углеводородокисляющие микроорганизмы, которые перерабатывают НП. Можно считать установленным наличие в природных прибрежных экосистемах естественного механизма утилизации нефти и НП. Несомненно, существуют летальные для макрофитов дозы НП, которые делают эту систему чувствительной к крупным разливам нефти или к воздействию продуктов её переработки. С учётом длительного периода формирования нефтяных углеводородов в земной коре можно говорить о том, что использование бактериями в качестве источника энергии такого калорийного продукта, как нефтяные углеводороды, было очень вероятным событием. Удивительной является выявленная у бурых, красных и зелёных водорослей способность поглощать углеводороды, поскольку для них, в отличие от других автотрофов, использование в метаболизме альтернативных углекислому газу источников углерода необычно. В основе этого лежит способность макрофитов и углеводородокисляющих бактерий образовывать симбиотические ассоциации.

Представленное исследование показало, что роль водорослей-макрофитов не сводится исключительно к созданию первичной продукции и к регуляции содержания углекислого газа и кислорода. Заросли бурых водорослей — важная составляющая системы репарации и гомеостаза в прибрежных экосистемах, о существовании которой ранее не подозревали. При этом необходимо понимать, что уничтожение даже части природных сообществ водорослей может изменить баланс, существующий в экосистеме. В связи с этим следует предостерегать проектировщиков и строителей новых предприятий на побережье Кольского залива от засыпки грунтом литоральной зоны для расширения береговой части. Литораль — основная зона обитания фукусовых водорослей, которые являются природным биофильтром, во многом обеспечивающим чистоту вод Кольского залива.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-80058 «Новые технологии биоремедиации и роль фитоценозов в очистке прибрежных акваторий арктических морей при чрезвычайных ситуациях, связанных с хранением и транспортировкой углеводородов», программа «Опасные явления».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Воскобойников Г. М., Ильинский В. В., Лопушанская Е. М., Макаров М. В., Пуговкин Д. В., Рыжик И. В., Ляймер А. В., Йенсен Д. Б. Санитарная водорослевая плантация для очистки прибрежных акваторий от нефтепродуктов: от теории к практике // *Вопросы современной альгологии*. 2017. № 3 (15). С. 160–186. [Voskoboinikov G. M., Il'inskiy V. V., Lopushanskaya E. M., Makarov M. V., Pugovkin D. V., Ryzhik I. V., Lyaimer A. V., Iensen D. B. Sanitary algae plantation for the bioremediation of coastal waters from oil: From theory to practice. *Voprosy sovremennoi al'gologii*, 2017, no. 3 (15), pp. 160–186. (in Russ.)]
2. Воскобойников Г. М., Матишов Г. Г., Метелькова Л. О., Жаковская З. А., Лопушанская Е. М. Об участии зелёной водоросли *Ulvaria obscura* в биоремедиации морской среды от нефтепродуктов // *Доклады РАН*. 2018. Т. 481, № 1. С. 111–113. [Voskoboinikov G. M., Matishov G. G., Metel'kova L. O., Zhakovskaya Z. A., Lopushanskaya E. M. The participating of the green algae *Ulvaria obscura* in the bioremediation of the sea water from oil product. *Doklady RAN*, 2018, vol. 481, no. 1, pp. 111–113. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S086956520000064-3>

3. 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 её возможная роль в биоремедиации морской воды // *Биология моря*. 2020. Т. 46, № 2. С. 135–141. [Voskoboinikov G. M., Ryzhik I. V., Salakhov D. O., Metelkova L. O., Zhakovskaya Z. A., Lopushanskaya E. M. Absorption and conversion of diesel fuel by the red alga *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber et D. Mohr, 1805 (Rhodophyta): The potential role of alga in bioremediation of sea water. *Biologiya morya*, 2020, vol. 46, no. 2, pp. 135–141. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0134347520020102>
4. Ильинский В. В. Бактериопланктон поверхностных вод Центральной Арктики в период календарной весны // *Микробиология*. 1995. Т. 64, № 5. С. 696–704. [Il'inskii V. V. Bakterioplankton poverkhnostnykh vod Tsentral'noi Arktiki v period kalendarnoi vesny. *Mikrobiologiya*, 1995, vol. 64, no. 5, pp. 696–704. (in Russ.)]
5. *Кольский залив и нефть: биота, карты уязвимости, загрязнение* / под ред. А. А. Шавыкина; ММБИ КНЦ РАН. Санкт-Петербург: Реноме, 2018. 520 с. [*Kola Bay and Oil: Biota, Vulnerability Maps, Pollution* / A. A. Shavykin (Ed.); ММБИ КНЦ РАН. Saint Petersburg: Renome, 2018, 520 p. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.25990/renomespb.w0pj-zq52>
6. Макаров В. Н. Сырьевые ресурсы промысловых водорослей // *Промысловые и перспективные для использования водоросли и беспозвоночные Баренцева и Белого морей*. Апатиты: Изд-во КНЦ, 1998. С. 257–272. [Makarov V. N. Seaweed resources. In: *Promyslovye i perspektivnye dlya ispol'zovaniya vodorosli i bespozvonochnye Baretseva i Belogo morei*. Apatity: Izd-vo KNTs, 1998, pp. 257–272. (in Russ.)]
7. Миронов О. Г. *Взаимодействие организмов с нефтяными углеводородами*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 127 с. [Mironov O. G. *Vzaimodeistvie organizmov s neftyanymi uglevodorodami*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 127 p. (in Russ.)]
8. Патин С. А. *Нефть и экология континентального шельфа*: в 2 т. 2-е изд., переработанное и дополненное. Т. 1: *Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия*. Москва: Изд-во ВНИРО, 2017а. 326 с. [Patin S. A. *Oil and Continental Shelf Ecology*: in 2 vols. 2nd ed., revised and extended. Vol. 1: *Offshore Oil and Gas Industry: Actual Situation, Prospects, Factors of Impact*. Moscow: VNIRO Publ., 2017a, 326 p. (in Russ.)]
9. Патин С. А. *Нефть и экология континентального шельфа*: в 2 т. 2-е изд., переработанное и дополненное. Т. 2: *Экологические последствия, мониторинг и регулирование при освоении углеводородных ресурсов шельфа*. Москва: Изд-во ВНИРО, 2017б. 284 с. [Patin S. A. *Oil and Continental Shelf Ecology*: in 2 vols. 2nd ed., revised and extended. Vol. 2: *Environmental Consequences, Monitoring and Regulation of the Offshore Oil and Gas Development*. Moscow: VNIRO Publ., 2017b, 284 p. (in Russ.)]
10. Пельтихина Т. С. *Ламинариевые водоросли Баренцева моря и их рациональное использование*. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2005. 122 с. [Peltikhina T. S. *Laminariyevye vodorosli Barentseva morya i ikh ratsional'noe ispol'zovanie*. Murmansk: Izd-vo PINRO, 2005, 122 p. (in Russ.)]
11. Перетрухина И. В., Ильинский В. В., Литвинова М. Ю. Определение скоростей биодеградации нефтяных углеводородов в воде литорали Кольского залива // *Труды Мурманского государственного технического университета «Вестник МГТУ»*. 2006. Т. 9, № 5. С. 830–835. [Peretruxhina I. V., Il'inskii V. V., Litvinova M. Yu. Opredelenie skorostei biodegradatsii neftyanykh uglevodorodov v vode litorali Kol'skogo zaliva. *Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta "Vestnik MGTU"*, 2006, vol. 9, no. 5, pp. 830–835. (in Russ.)]
12. Семенова Е. В., Шлыкова Д. С., Семенов А. М., Иванов М. Н., Шеляков О. В., Нетрусов А. И. Бактерии-эпифиты бурых водорослей в утилизации нефти в экосистемах северных морей // *Вестник Московского университета. Серия 16. Биология*. 2009. № 3. С. 18–22. [Semenova E. V., Shlykova D. S., Semenov A. M., Ivanov M. N., Shelyakov O. V., Netrusov A. I. Bacteria-epiphytes of brown macro alga in oil utilization in north sea ecosystems. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 2009, vol. 64, no. 3, pp. 107–110. (in Russ.)]

13. Степаньян О. В., Воскобойников Г. М. Влияние нефти и нефтепродуктов на морфофункциональные особенности морских макроводорослей // *Биология моря*. 2006. Т. 32, № 4. С. 241–248. [Stepanyan O. V., Voskoboinikov G. M. The effects of oil and oil products on the morphofunctional characteristics of marine macroalgae. *Biologiya morya*, 2006, vol. 32, no. 4, pp. 241–248. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2274.9607>
14. Atlas R. M. Microorganisms and petroleum pollutants. *BioScience*, 1978, vol. 28, iss. 6, pp. 387–391. <https://doi.org/10.2307/1307454>
15. Pilatti F., Ramlov F., Schmidt E., Kreuzsch M., Pereira D., Costa Ch., de Oliveira E., Bauer Cl., Rocha M., Bouzon Z., Maraschin M. *In vitro* exposure of *Ulva lactuca* Linnaeus (Chlorophyta) to gasoline – Biochemical and morphological alterations. *Chemosphere*, 2016, vol. 156, pp. 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.126>
16. Pugovkin D. V., Liaimer A., Jensen J. B. Epiphytic bacterial communities of the alga *Fucus vesiculosus* in oil-contaminated water areas of the Barents Sea. *Doklady Biological Science*, 2016, vol. 471, pp. 269–271. <https://doi.org/10.1134/S0012496616060053>
17. Ryzhik I., Pugovkin D., Makarov M., Roleda M. Y., Basova L., Voskoboinikov G. Tolerance of exposed to diesel water-accommodated fraction (WAF) and degradation of hydrocarbons by the associated bacteria. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 254 (Pt. B), art. no. 113072. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113072>
18. Wrabel M. L., Peckol P. Effects of bioremediation on toxicity and chemical composition of No. 2 fuel oil: Growth responses of the brown alga *Fucus vesiculosus*. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, vol. 40, iss. 2, pp. 135–139. [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00181-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00181-2)

THE ROLE OF ALGAE MACROPHYTE IN BIOREMEDIATION OF PETROLEUM PRODUCTS OF THE KOLA BAY OF THE BARENTS SEA

G. M. Voskoboinikov¹, S. V. Malavenda¹, and L. O. Metelkova²

¹Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation

²Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: grvosk@mail.ru

The contribution of macroalgae to the removal process of diesel fuel from the Kola Bay of the Barents Sea was estimated. The calculations were based on the results of: 1) recent expeditionary observations of the reserves, spreading, and biomass of algae macrophyte of the phyla Chlorophyta and Rhodophyta, as well as the class Phaeophyceae of the phylum Ochrophyta, inhabiting three bay areas; 2) laboratory research of the ability of macroalgae *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*, *F. distichus*, *F. serratus*, *Saccharina latissima*, *Palmaria palmata*, and *Ulvaria obscura* to neutralize the toxic effect of diesel fuel. As shown, the total contribution of the algae studied into bioremediation of diesel fuel in the bay was of 312 kg·day⁻¹. The differences in the absorption capacity of algae macrophyte were revealed. This process was most efficiently carried out by *S. latissima*; the minimum efficiency of participation in bioremediation was determined for *U. obscura*. It was concluded that the existing littoral and sublittoral thickets of marine macroalgae of the Kola Bay can be considered as the key element in the implementation of the preventive, daily cleaning of coastal water from the petroleum products. The inclusion in the calculations of data on the ability of other representatives of the bay phytobenthos to neutralize diesel fuel may increase the role of algae macrophyte in cleaning the coastal marine areas from the petroleum products. As concluded, the thickets of brown algae can be considered as the key component of repair and homeostasis in coastal ecosystems. The destruction of even a part of algae natural communities can change the ecosystem balance.

Keywords: macrophytes, ecosystem of the Kola Bay, sustainability, diesel fuel, bioremediation