Природа / 2026 / 08
DOI: 10.7868/S0032874X26080025

Природные феномены в жизни макроводорослей Баренцева моря

К 90-летию альгологических исследований в Дальних Зеленцах (Восточный Мурман, Русская Арктика)

Г.М. Воскобойников[1], М.В. Макаров[1], О.В. Степаньян[2]

[1] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Мурманск, Россия)
[2] Южный научный центр Российской академии наук (Ростов-на-Дону, Россия)

Поступила в редакцию: 06.07.2026
Принята к публикации: 20.07.2026

Ключевые слова: Русская Арктика, Баренцево море, морские макроводоросли, факторы среды, нефтяное загрязнение



Григорий Михайлович Воскобойников, доктор биологических наук, заведующий лабораторией альгологии Мурманского морского биологического института РАН. Область научных интересов – морская ботаника, физиология, цитология и биохимия макроводорослей российской Арктики. e-mail: grvosk@mail.ru



Михаил Владимирович Макаров, доктор биологических наук, директор Мурманского морского биологического института РАН. Область научных интересов – биоокеанология, физиология макроводорослей российской Арктики. e-mail: Zelentsy@yandex.ru



Олег Владимирович Степаньян, доктор биологических наук, заведующий лабораторией прикладной океанографии Южного научного центра РАН. Область научных интересов – океанология, исследование донной растительности южных морей России. e-mail: step@ssc-ras.ru

Морские макроводоросли (макрофиты) – это интересный подводный мир, особая экосистема, которая образует уникальный биотоп, где живут рыбы, беспозвоночные, микроводоросли. Морские водоросли поглощают углекислый газ и выделяют кислород, играют особую роль в углеродном цикле морей. Сообщества морских макроводорослей –красивые оазисы в темной бездне океана. Именно эти сообщества дают основу жизни для сотен биологических видов – от многотонных морских млекопитающих до микроскопических бактерий. Водоросли российской Арктики особенно красивы и изящны. Каждое новое исследование морских водорослей приближает ученых к пониманию феномена их существования в арктической зоне в условиях уникального природного эксперимента: со сменой полярного дня и полярной ночи, необходимостью существования на арктической приливной литорали, где соленость морской воды может изменяться от 35‰ до 1–2‰, где водоросли выдерживают на литорали при отливах осушение летом и промерзание в зимний период. При этом температуры воздуха изменяются от –30 °С зимой и до +20 °С летом, некоторые водоросли могут выживать и в экстремальных условиях нефтяных разливов, находясь в слое нефтепродуктов. Исследованию

© Воскобойников Г.М., Макаров М.В., Степаньян О.В., 2026

некоторых природных феноменов и реакций водорослей посвящена статья.

Феномен 1. Влияние освещения («Мы все – дети солнца» – К.А. Тимирязев)

Ведущим фактором внешней среды, оказывающим влияние на водоросли как на представителей фотоавтотрофных организмов, является освещение: интенсивность, фотопериод, спектральный состав. И возможность обитания водорослей в высокоширотных районах, со сменой светового режима от полярного дня до полярной ночи, в первую очередь зависит от адаптационных возможностей их фотосинтетического аппарата: способности к изменению площади фотосинтетических мембран, содержания и соотношения фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), размеров светособирающего комплекса (ССК).

Эксперименты показали, что высокая интенсивность освещения (100 Вт/м^2) в течение 24 часов не оказывает влияния на скорость оседания зооспор ламинарии и на их дальнейшее прорастание. При длительном воздействии (3 суток) высокая интенсивность освещения вызывает гибель прорастающих спор. Ранние спорофиты (10–40 клеток) показали большую устойчивость: через 5 суток в их клетках еще содержались структурные элементы, но после 10 суток внутреннее содержимое клеток разрушалось. Это может быть связано с тем, что фотосинтетический аппарат спор находится в неактивном состоянии и слабо подвержен воздействию. Окончательно он формируется у прорастающей споры, и для этой стадии высокие уровни освещения наиболее губительны.

Например, для развития ранних стадий ламинарии оптимальны низкие уровни освещения [1]. А гаметофиты многих видов ламинариевых водорослей способны длительное время (более 18 месяцев) находиться в условиях отсутствия освещения, причем при низких температурах их способность к выживанию увеличивается.

Наши исследования, проведенные в течение всех сезонов на протяжении нескольких лет на взрослых талломах водорослей, показали, что общее содержание фотосинтетических пигментов значительно снижается в летние месяцы, в период полярного дня (рис. 1).

У всех видов водорослей максимальное содержание фотосинтетических пигментов наблюдается в апреле и ноябре-декабре, минимальное – в июле-августе. Увеличение, наблюдаемое с января по апрель, может быть связано с активным ростом водорослей в этот период, который требует значительных энергетических затрат, а также запасов углерода для синтеза структурных элементов, что может

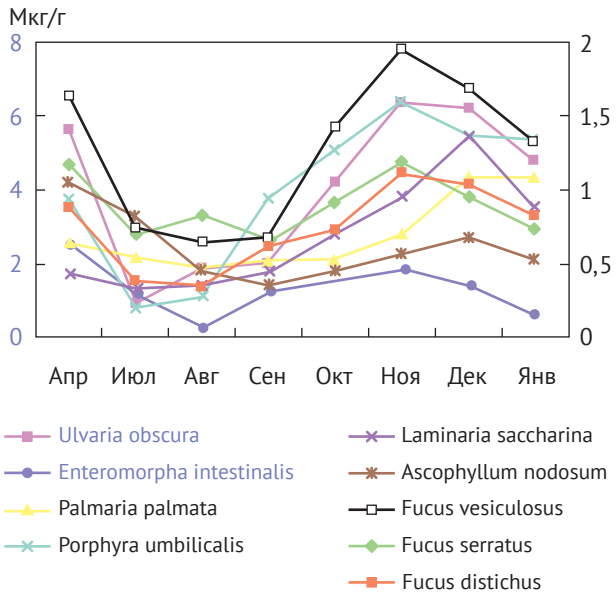


Рис. 1. Содержание фотосинтетических пигментов водорослей (сумма хлорофиллов и каротиноидов) в течение года, мкг/г сырой массы

вызывать дополнительное развитие фотосинтетического аппарата. В пользу этого предположения свидетельствует также и увеличение размеров ССК в весенний период.

Исследование ультраструктуры хлоропластов показало, что в зимний период, по сравнению с летом, более чем в 6 раз увеличивается парциальный объем мембран тилакоидов на единицу площади стромы хлоропласта (рис. 2).

Большой интерес вызывают механизмы существования водорослей в полярную ночь, которая на Мурманском побережье Баренцева моря длится около одного месяца, и средняя интенсивность ФАР в середине декабря в полдень составляет около 2 Вт/м^2, на широте Шпицбергена полярная ночь длится около четырех месяцев (28 октября – 14 февраля). Из них два месяца (декабрь–январь) освещение отсутствует. До недавнего времени считалось, что в течение полярной ночи водоросли впадают в состояние «спячки», или мезабиоза [2]. Наши исследования показали наличие физиологической активности водорослей, а также установили, что на Мурманском побережье в период полярной ночи интенсивность естественного освещения в дневные часы достаточна для протекания реакций фотосинтеза у большинства видов водорослей. Причем интенсивность фотосинтеза в дневное время в несколько (6–8) раз превышает интенсивность дыхания, хотя в течение полных суток суммарное дыхание превалирует.

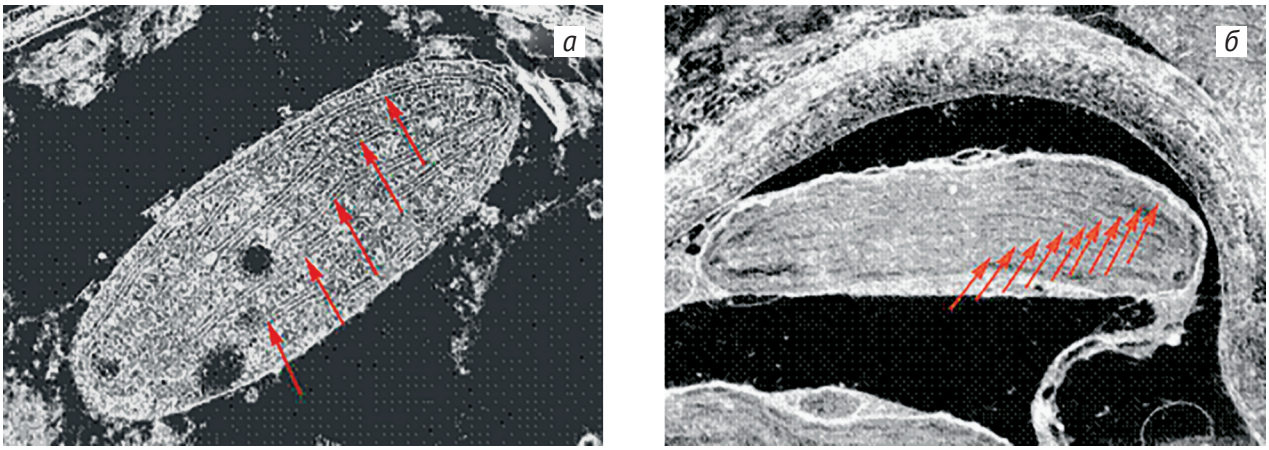


Рис. 2. Хлоропласты Fucus vesiculosus в летний (*а*) и зимний (*б*) периоды. Стрелками показаны мембраны тилакоидов

Для моделирования условий полярной ночи для многолетних водорослей в зимний период их помещали в море в специальный светонепроницаемый контейнер. В процессе экспериментов были выявлены различные механизмы существования водорослей, и показано, что продолжительность их жизни при отсутствии освещения зависит от структуры таллома и расположения меристематической зоны. Красные и зеленые макроводоросли, имеющие тонкопластинчатую организацию таллома и диффузный рост (отсутствие дифференцированной зоны роста), оказались наиболее чувствительны к отсутствию освещения. Продолжительность их жизни в темноте ограничивалась количеством запасных веществ и составляла около 30 суток. После этого наблюдалось постепенное разрушение фотосинтетического аппарата, таллом распадался на отдельные фрагменты. У более высокоорганизованных бурых водорослей, кроме потребления запасных веществ, имеются дополнительные механизмы, обеспечивающие их существование при отсутствии освещения, обусловленные физиологической дифференциацией различных участков таллома. Эти механизмы направлены на поддержание меристематической зоны в интактном состоянии. У фукусовых водорослей эта зона находится в апикальной части таллома, у ламинариевых расположена на границе стволика и пластины. Псевдопаренхиматозная структура таллома бурых водорослей предполагает наличие гетеротрофного питания внутренних слоев клеток, лишенных возможности фотосинтетической ассимиляции углерода. Их питание обеспечивается ближним транспортом ассимилятов от внешнего фототрофного слоя клеток. При этом во внутренних слоях происходит накопление запасных веществ. При неблагоприятных световых условиях наблюдается обратный транспорт ассимилятов к клеткам внешнего слоя. У ламинариевых существует и дальний транспорт ассимилятов, который активизируется в конце летнего периода: отток от разрушающихся клеток волана и дистальной части пластины к зоне роста. В темноте на 30% снижается толщина центральной части таллома, а также содержание сухих веществ. В волане наблюдается деградация фотосинтетического аппарата. В зоне роста никаких перестроек не происходит. У ламинариевых при недостатке освещения сохранение зоны роста происходит за счет транспорта веществ из остальных частей пластины. И сохранение их жизнеспособности при отсутствии освещения достигается путем потребления запасных веществ и органических веществ, образующихся в процессе автолиза таллома. Продолжительность их существования в темноте составляет около 60 суток и зависит от возраста таллома и длины пластины. У фукусовых водорослей зона роста апикальная, они не могут подобно ламинариевым активно использовать органические вещества, образующиеся при автолизе таллома. Однако нами было показано, что *F. vesiculosus* способен до девяти месяцев находиться в условиях отсутствия освещения. Через три месяца морфологических изменений таллома не наблюдалось, более того, происходило образование органов размножения – рецептакулов, что свидетельствует об относительно высокой метаболической активности в зимний период и эндогенной регуляции в развитии репродуктивной ткани. Через шесть месяцев нахождения в темноте фотосинтетический аппарат водорослей сохранялся в интактном состоянии, количество и соотношение фотосинтетических пигментов оставалось практически неизменным, при этом сохранялась способность к восстановлению фотосинтеза. Интенсивность фотосинтеза и дыхания менялась незначительно, уровень фотосинтеза был в 6–8 раз выше, чем дыхания. Восстановление

фотосинтетической активности растений, находившихся в темноте и перенесенных на свет, зависело от уровня освещения. Относительно слабое освещение (1,5 Вт/м^2) не активировало работу фотосинтетического аппарата, увеличение освещенности до 4 Вт/м^2 приводило к возрастанию интенсивности фотосинтеза. Зависимость процессов восстановления от уровня (или дозы) освещения предполагает наличие связи с энергетическим обменом клетки. При этом наблюдалось временное снижение фотосинтетической активности, что могло быть связано с перестройкой энергетического обмена с эндогенного и органогетеротрофного на фототрофный. По всей вероятности, органические вещества используются макрофитами для поддержания энергетического обмена, поскольку нами было показано поглощение карбонат-ионов при отсутствии световой фиксации CO_2 [3]. Данный процесс был также отмечен и у других видов водорослей [4].

Таким образом, проведенное исследование физиологического состояния, морфологии и ультраструктуры клеток водорослей различных систематических групп показало, что возможность их существования в высоких широтах обеспечивается адаптацией фотосинтетического аппарата. Максимальная продолжительность существования водорослей при отсутствии освещения зависит от структуры таллома. Красные и зеленые водоросли, имеющие простую организацию, являются наименее устойчивыми. Время их существования в темноте ограничено количеством запасных веществ. У ламинарии сахаристой функциональная специализация различных участков таллома и наличие дальнего транспорта веществ обеспечивают сохранение жизнеспособности в течение 60 суток отсутствия освещения (в зависимости от возраста и длины пластины). Фукоиды при отсутствии освещения способны переходить с фотоавтотрофного на гетеротрофный способ питания, что может являться важным условием их распространения в высоких широтах.

Феномен 2. Гидростатическое давление как фактор, способный лимитировать глубину произрастания водорослей

Выявление закономерностей вертикального распределения морских организмов является одной из важнейших проблем гидробиологии. В современном представлении вертикальная зональность произрастания водорослей зависит от комплекса факторов: верхнюю границу зоны определяют абиотические факторы (освещенность, температура, осушение, количество питательных веществ), а нижнюю – биотические (межвидовая конкуренция) [5]. Однако данная закономерность распространяется, как правило, на литоральные виды. Для сублиторальных видов долгое время считалось, что нижняя граница их произрастания определяется недостатком фотосинтетически активной радиации (ФАР), однако позднее было показано, что недостаток синего света ингибирует гаметогенез у ламинариевых и также может лимитировать глубину их произрастания [6–8].

Всем известная ламинария или морская капуста (*Saccharina latissima*) в естественных условиях образует пояс зарослей, расположенный на глубинах от 0 м (граница литорали и сублиторали) до 10–15 м. Нижняя граница пояса достаточно четко очерчена, и на большей глубине (до 20 м), даже при наличии подходящего субстрата и отсутствии конкуренции, встречаются лишь единичные растения. Вместе с тем отдельные растения находятся и на значительных глубинах (свыше 40 м), которые явно были снесены штормами с мелководья, о чем свидетельствовало их закрепление на мелких камнях, не характерных для таких глубин. Признаки деградации талломов отсутствовали, однако наблюдались морфологические изменения: удлинение стволика и уменьшение размеров пластины, что характерно для особей, произрастающих в густых зарослях при недостатке освещенности, и свидетельствует о длительном нахождении растений на глубине.

При увеличении глубины происходит не только снижение освещенности и изменение спектрального состава света, но и линейно возрастает гидростатическое давление. Поскольку многочисленными исследованиями было показано, что наиболее чувствительными к воздействию внешних факторов являются ранние стадии развития организмов, нами было проведено исследование влияния гидростатического давления на ранние стадии онтогенеза ламинарии. Для этого была создана экспериментальная установка (камера) объемом 1000 см^3, в которую помещали объекты исследования и создавали повышенное давление. Камера была полностью заполнена водой, давление создавалось сжатым воздухом через мембрану, благодаря которой контакт водной и воздушной сред отсутствовал, и парциальное давление газов в воде, где находился экспериментальный материал, не изменялось. Освещенность в камере составляла 10 Вт/м^2. Экспериментальные исследования проводили в лабораторных условиях (T = +8 °C, фотопериод 12:12).

В опытах использовали суспензию зооспор, полученных от фертильных растений, эмбриоспоры и прорастающие споры ламинарии. Контролем являлись споры, помещенные в такую же камеру, но при отсутствии давления. Смена воды в камерах при длительных экспериментах производилась каждые 10 дней, перемешивание отсутствовало. После

окончания воздействия экспериментальный и контрольный материал переносили в емкости с проточной морской водой при той же температуре и освещении для наблюдения за дальнейшим развитием.

Использованные в экспериментах уровни гидростатического давления были выбраны исходя из вертикального распределения естественной популяции ламинарии на побережье Восточного Мурмана, где нижняя граница пояса ламинарии (густые заросли с проективным покрытием до 100%) располагается на глубине 10–12 м, где гидростатическое давление составляет 1–1,2 атм. Отдельные растения, не образующие зарослей, но произрастающие группами, встречаются до глубины 20 м. Учитывая высоту прилива, составляющую в месте исследования порядка 4 м, действующее на них давление может доходить до 2,4 атм. Поэтому уровень давления в 3 атм был выбран как нижняя граница произрастания вида в естественных условиях. Давление в 5 атм было выбрано как явно избыточное (оно соответствует давлению на глубине 50 м, где не встречались даже снесенные с мелководья взрослые растения), что позволяет нам предположить, что данный уровень гидростатического давления превышает возможный предел существования взрослой ламинарии сахаристой.

Наиболее интересные результаты показал эксперимент по длительному воздействию гидростатического давления в 3 атм. Содержимое эмбриоспор, находившихся под давлением, перетекало в трубку только частично, оставаясь наполовину в оболочке эмбриоспоры. Булавовидная форма трубки была слабо развита. Формирование фотосинтетического аппарата происходило гораздо медленнее.

Гидростатическое давление 3 атм хотя и ингибировало развитие спор, но не вызывало их гибели. Исследование прорастающих спор под флуоресцентным микроскопом показало наличие у них фотосинтетического аппарата: у большинства из них хлоропласты распределялись по всему содержимому клеток. В таком состоянии споры оставались продолжительное время. Впоследствии из них развились гаметофиты, которые по форме и структуре отличались от типичных для ламинарии. Данные гаметофиты являлись стерильными, или процесс их развития был сильно заторможен, поскольку даже после 64 суток опыта спорофиты отсутствовали. При этом в контрольном варианте за 40 суток развивались многоклеточные спорофиты.

Таким образом, проведенные нами эксперименты показали, что гидростатическое давление не оказывает влияния на движущиеся зооспоры и стадию образования трубки у эмбриоспоры, а наиболее подвержены воздействию давления споры в процессе развития до стадии гаметофита. Причем давление не приводит к гибели, по крайней мере те уровни, которые были заданы в экспериментах, но значительно тормозит или останавливает их развитие. Об этом свидетельствует отсутствие отклонений у спор, непродолжительное время находившихся под воздействием давления.

Поскольку макроводоросли являются фототрофными организмами, несомненно, что интенсивность освещения является основным фактором, определяющим вертикальную зональность их произрастания. Однако, как показало настоящее исследование, давление свыше 3 атм может оказывать существенное влияние на развитие макроводорослей. И нижняя граница произрастания сублиторальных макроводорослей будет зависеть от толерантности самых чувствительных стадий жизненного цикла к трем факторам: освещению, температуре и уровню гидростатического давления. При этом в мутных водах нижняя граница произрастания будет определяться недостатком освещения, а в прозрачных водах, где освещение проникает на значительную глубину и, вследствие хорошего перемешивания, отсутствует термоклин, нижнюю границу произрастания макрофитов может определять гидростатическое давление.

Феномен 3. Роль морских макроводорослей в очистке прибрежных акваторий от нефтепродуктов: от теории к практике

Происходящий рост добычи нефти на арктическом шельфе, ее транспортировка и размещение на морском побережье предприятий по перегрузке и переработке углеводородного сырья неизбежно влекут за собой опасность загрязнения прибрежных акваторий, в частности зоны литорали и сублиторали. Эти зоны заняты в большинстве морей зарослями водорослей-макрофитов, которые являются основным первичным продуцентом, важнейшим средообразующим компонентом, местом размножения, развития и постоянного обитания многих гидробионтов. Таким образом, устойчивость к нефтяному загрязнению у макроводорослей во многом определяет состояние прибрежных экосистем под воздействием данного фактора [9]. Впервые для большой группы водорослей-макрофитов (14 видов), обитателей литорали и сублиторали Мурманского побережья Баренцева моря, различающихся по морфологии и систематической принадлежности, определен диапазон толерантности к воздействию дизельного топлива (ДТ) и сырой нефти. Данный показатель приобретает значимость при прогнозировании наносимого ущерба прибрежной экосистеме при различной степени загрязнения. Установлено, что наиболее устойчивыми к нефтепродуктам (НП) являются фукусовые, а наименее – ламинариевые,

которые, как и фукусы, относятся к бурым водорослям. Результаты экспериментов находят подтверждение в натурных наблюдениях. Фукусовые водоросли, особенно фукус пузырчатый (*Fucus vesiculosus*), демонстрируют способность переживать длительное время в условиях постоянного загрязнения НП, даже в слое мазута на камнях, сохраняя при этом минимальную функциональную активность (рис. 3). ДТ в малых концентрациях (до 20 ПДК = 1 мг/л) не оказывает повреждающего действия на большинство представителей макрофитобентоса, а при небольшой продолжительности воздействия (трое суток) может даже стимулировать увеличение интенсивности фотосинтеза. По-видимому, причиной сохранения жизнеспособности у водорослей при малых концентрациях ДТ является их длительное обитание в морской среде при среднем фоновом содержании НП – 2–4 ПДК. Именно такое содержание НП показал проведенный анализ морской воды в губах Восточного и Западного Мурмана. Эксперименты продемонстрировали различную способность выдерживать воздействие токсикантов даже у представителей близких систематических групп. Так, у зеленых водорослей она убывает в ряду *Ulva lactuca>Ulvaria obscura>Ulva intestinalis>Acrosiphonia arcta.* У всех видов водорослей наименьшей устойчивостью к ДТ обладали особи на ранних стадиях развития [10–11]. Изменения у исследованных водорослей при повышении концентрации и продолжительности влияния ДТ были однотипны и проходили в несколько этапов: 1) снижение интенсивности фотосинтеза и уменьшение содержания фотосинтетических пигментов, нарушение структуры хлоропластов, 2) плазмолиз, сопровождающийся вакуолизацией и просветлением цитоплазмы, 3) изменение окраски таллома с зеленого на бурый, разрушение клеточных структур, появление некротических пятен.



Рис. 3. Фукус пузырчатый, загрязненный нефтепродуктами, на литорали Мурманского морского порта

Здесь и далее фото Г.М. Воскобойникова

У водорослей экспериментально прослежена способность к аккумуляции и поглощению ДТ из морской воды, роль в данном процессе углеводородокисляющих бактерий. Впервые определено, что деструкция ДТ макроводорослями происходит всем талломом: начинается на поверхности водоросли за счет деятельности эпифитных углеводородокисляющих бактерий (УОБ), обеспечивающих перевод НП в доступную для растений форму (рис. 4). В дальнейшем НП поглощаются и нейтрализуются клетками водорослей). Исследована взаимосвязь содержания НП и численности микроорганизмов [12–13]. Показано, что незначительное загрязнение водной среды нефтяными углеводородами (до 5 ПДК) вызывает пятикратное увеличение числа сапротрофных бактерий в эпифитных сообществах водорослей.

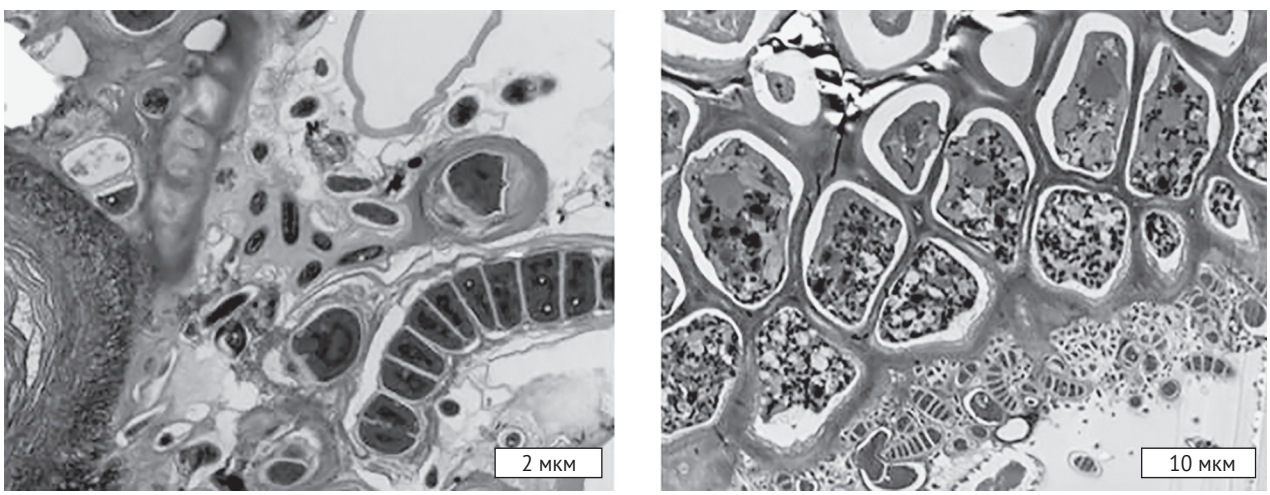


Рис. 4. Нефтеокисляющие микроорганизмы на талломах фукусовых водорослей

Лабораторные эксперименты позволили выполнить расчет удельной скорости поглощения ДТ водорослями-макрофитами, доминирующими на литорали и в сублиторали (мкг/г сух. веса/сут): *Fucus vesiculosus* – 202,0; *F. distichus* – 169,0; *Ascophyllum nodosum* – 44,0; *F. serratus* – 123,0; *Saccharina latissima* – 1752,0; *Palmaria palmata* – 146,4; *Ulvaria obscura* – 25,4.

Натурные наблюдения за запасами и распределением водорослей-макрофитов с учетом определенной скорости поглощения ДТ дают возможность рассчитать их вклад в очистку от НП ряда заливов и бухт Мурманского побережья. В частности, присутствующие в трех коленах Кольского залива водоросли ежесуточно могут нейтрализовать около 312 кг ДТ. Данный объем НП по современной классификации соответствует среднему локальному разливу нефтепродуктов в морской воде [14–16]. Аналогичные расчеты были выполнены для ряда губ Восточного Мурмана.

Сотрудниками лаборатории альгологии Мурманского морского биологического института РАН разработана технология санитарной водорослевой плантации (СВП) для очистки прибрежных акваторий от нефтепродуктов [17]. В основе биотехнологии – симбиотическая ассоциация УОБ и водорослей-макрофитов, вплетенных в канаты. Поверхностные слои морской воды очищаются с помощью фукуса (рис. 5). Глубинные слои морской воды очищаются с помощью ламинарии (рис. 6). Данная технология была успешно апробирована в прибрежье Баренцева, Белого морей. Было показано, что 1 га плантации может за 10 дней нейтрализовать более 100 кг нефтепродуктов. Впервые получены данные о возможности использования для биоремедиации морской среды от НП не только живых фукусовых водорослей, но и сухих талломов фукуса [18]. Как показали эксперименты, сухие фукусы активнее



Рис. 6. Размещение ламинарии в толще воды на плантации при очистке морской акватории от нефти

сорбируют нефтяные углеводороды (НУ) из водной среды. Единственным недостатком сухих водорослей является то, что у них полностью отсутствуют метаболические процессы, которые присущи живым водорослям и приводят к деструкции нефтяных углеводородов. Высушенные макрофиты представляют собой резервуар для накопления НУ, в котором основная работа по деструкции углеводородов, вероятно, приходится на УОБ, а также на физико-химические процессы. Это подтверждается результатами определения содержания НП в водорослях. Данное свойство сухих фукусов поглощать НУ и сорбировать их с помощью УОБ легли в основу создания биосорбента (биоматов с сухими водорослями) для очистки придонных слоев морской воды от НП.



Рис. 5. Сорбция пленки нефти на фукусе при очистке морской акватории



Рис. 7. Общий вид санитарной плантации при очистке акватории бухты Оленья (Восточный Мурман) от нефтепродуктов

Возможна экстраполяция разработанных технологий для прибрежных акваторий дальневосточных, южных морей России с учетом региональных особенностей. До последнего времени в литературе водорослям-макрофитам отводилась роль определенной «жертвы», испытывающей неблагоприятное воздействие нефти и нефтепродуктов. Полученные нами сведения об устойчивости представителей макрофитобентоса к НП, их участии в повседневной очистке прибрежья от НП, а также санитарной аквакультуре позволяют представить водоросли-макрофиты как активного участника биоремедиации прибрежных акваторий, во многом определяющего состояние прибрежных экосистем под воздействием нефтяного загрязнения.

Проведенные экспериментальные работы и наблюдения в природе, на морской литорали показали пример многокомпонентной адаптации макроводорослей к суровым арктическим условиям, в том числе и к новым «вызовам», которые создает человек в результате своей деятельности, связанной с разливами нефти. Полученные данные позволяют отметить высокую устойчивость массовых видов макрофитов, особенно бурых фукусовых водорослей к действию широкого спектра неблагоприятных факторов, а это позволяет с уверенностью прогнозировать, что даже масштабная гипотетическая катастрофа не приведет к исчезновению основного биологического каркаса, который составляют эти водоросли в российской Арктике.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 22–17–00243-П «Радиационная океанология и геоэкология прибрежного шельфа Баренцева и Белого морей. Биокосные взаимодействия в системе: донные отложения – вода – макроводоросли – микроорганизмы, их роль в ремедиации морской прибрежной экосистемы при радиационном и химическом загрязнении в условиях Арктики».

Литература / References

1. *Lüning K.* Critical levels of light and temperature regulating the gametogenesis of three *Laminaria species* (Phaeophycea). Journal of Phycology. 1980; 16: 1–5.
2. *Воскобойников Г.М., Камнев А.Н.* Морфофункциональные изменения хлоропластов в онтогенезе водорослей. СПб., 1991. [*Voskoboynikov G.M., Kamnev A.N.* Morphofunctional changes in chloroplasts during the ontogenesis of algae. St. Petersburg, 1991, (In Russ.).]
3. *Тропин И.В., Макаров М.В.* Оценка состояния фотосинтетического аппарата фукоидов Баренцева моря после завершения полярной ночи. Альгология. 2004; 4(4): 393–404. [*Tropin I.V., Makarov M.V.* Assessment of the state of the photosynthetic apparatus of Barents Sea fucoids after the polar night has ended. Algologiya. 2004; 4(4): 393–404. (In Russ.).]
4. *Maslova T.G., Popova I.A.* Adaptive properties of plant pigment systems. Photosynthetica. 1993; 29(2): 195–203.
5. *Kürikki M.* Mechanisms affecting macroalgal zonation in the northern Baltic Sea. European Journal of Phycology. 1996; 31: 225–232.
6. *Lüning K.* Critical levels of light and temperature regulating the gametogenesis of three *Laminaria species* (Phaeophycea). Journal of Phycology. 1980; 16: 1–5.
7. *Lüning K., Dring M.J.* Reproduction, growth and photosynthesis of gametophytes of *Laminaria saccharina* growth in blue and red light. Marine Biology. 1975; 29: 195–200.
8. *Lüning K., Neushul M.* Light and temperature demands for growth and reproduction of Laminarian gametophyte in southern and central California. Marine Biology. 1978; 45: 297–309.
9. *Степаньян О.В., Воскобойников Г.М.* Влияние нефти и нефтепродуктов на морфофункциональные особенности морских макроводорослей. Биология моря. 2006; 32(4): 241–248. [*Stepanyan O.V., Voskoboynikov G.M.* Effects of oil and oil products on morphofunctional parameters of marine macroalgae. Russian Journal of Marine Biology. 2006; 32(1): 32–40. (In Russ.).]
10. *Степаньян О.В.* Влияние сырой нефти на ранние стадии развития макроводорослей Баренцева моря. Ботанический журнал. 2013; 98(7): 903–912. [*Stepanyan O.V.* Effect of crude oil on early stages of macroalgae development in the Barents Sea. Botanical Journal. 2013; 98(7): 903–912. (In Russ.).]
11. *Салахов Д.О., Воскобойников Г.М., Рыжик И.В.* Влияние дизельного топлива на развитие проростков *Ulva lactuca* L. (Chlorophyta) Баренцева моря. Наука Юга России. 2020; 16(1): 55–59. [*Salakhov D.O., Voskoboynikov G.M., Ryzhik I.V.* Influence of diesel fuel on the development of *Ulva lactuca* L. (Chlorophyta) seedlings in the Barents Sea. Science in the South Russia. 2020; 16(1): 55–59. (In Russ.).]
12. *Семенова Е.В., Шлыкова Д.С., Семенов А.М. и др.* Бактерии-эпифиты бурых водорослей в утилизации нефти в экосистемах северных морей. Вестник Московского университета. Серия Биологическая. 2009; 16(3): 18–22. [*Semenova E.V., Shlykova D.S., Semenov A.M. et al.* Epiphytic bacteria of brown algae in the utilization of oil in the ecosystems of the Northern Seas. Bulletin of Moscow University. Ser. Biological. 2009; 16(3): 18–22. (In Russ.).]

13. *Ильинский В.В., Воскобойников Г.М., Пуговкин Д.В. и др.* Влияние нефтяного загрязнения среды на состав и численность гетеротрофных эпифитных бактерий бурой водоросли *Fucus vesiculosus*. Вестник Южного научного центра РАН. 2010; 6(2): 98–100. [*Ilyinsky V.V., Voskoboynikov G.M., Pugovkin D.V. et al.* The effect of oil pollution on the composition and abundance of heterotrophic epiphytic bacteria in the brown alga *Fucus vesiculosus*. Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010; 6(2): 98–100. (In Russ.).]
14. *Воскобойников Г.М., Матишов Г.Г., Метелькова Л.О. и др.* Об участии зеленой водоросли *Ulvaria obscura* в биоремедиации морской среды от нефтепродуктов. Доклады академии наук. 2018; 481(1): 111–113. [*Voskoboynikov G.M., Matishov G.G., Metelkova L.O. et al.* On the role of the green alga *Ulvaria obscura* in the bioremediation of the marine environment from petroleum products. Doklady Akademii Nauk. 2018; 481(1): 111–113. (In Russ.).]
15. *Воскобойников Г.М., Рыжик И.В., Салахов Д.О. и др.* Поглощение и преобразование дизельного топлива водорослью *Palmaria palmata* L. (Rhodophyta) и ее возможная роль в биоремедиации морской воды. Биология моря. 2020; 46(2): 135–141. [*Voskoboynikov G.M., Ryzhik I.V., Salakhov D.O. et al.* Absorption and conversion of diesel fuel by the alga *Palmaria palmata* L. (Rhodophyta) and its possible role in the bioremediation of seawater. Marine Biology. 2020; 46(2): 135–141. (In Russ.).]
16. *Воскобойников Г.М., Малавенда С.В., Метелькова Л.О.* Роль водорослей-макрофитов в биоремедиации от нефтепродуктов Кольского залива Баренцева моря. Морской биологический журнал. 2021; 6(3): 35–43. [*Voskoboynikov G.M., Malavenda S.V., Metelkova L.O.* The role of macroalgal species in bioremediation of oil products in the Kola Bay of the Barents Sea. Marine Biological Journal. 2021; 6(3): 35–43. (In Russ.).]
17. *Воскобойников Г.М., Ильинский В.В., Лопушанская Е.М. и др.* Санитарная водорослевая плантация для очистки прибрежных акваторий от нефтепродуктов: от теории к практике. Вопросы современной альгологии. 2017; 3(15): 1–76. [*Voskoboynikov G.M., Ilyinsky V.V., Lopushanskaya E.M. et al.* Sanitary algae plantation for the bioremediation of coastal waters from oil: from theory to practice. Issues of Modern Algology. 2017; 3(15): 1–76. (In Russ.).]
18. *Воскобойников Г.М., Пуговкин Д.В., Метелькова Л.О.* Водоросли *Fucus vesiculosus* как биосорбент для борьбы с загрязнением водной среды нефтепродуктами. Наука юга России. 2026; 22(2): 66–75. [*Voskoboynikov G.M., Pugovkin D.V., Metelkova L.O.* Algae *Fucus vesiculosus* as a biosorbent for combating water pollution with petroleum products. Science of the South of Russia. 2026; 22(2): 66–75. (In Russ.).]

Natural phenomena in the macroalgae in the Barents Sea On the 90th anniversary of algal research in Dalnie Zelentsy (Eastern Murman, Russian Arctic)

G.M. Voskoboynikov[1], M.V. Makarov[1], O.V. Stepanyan[2]

[1] Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (Murmansk, Russia)
[2] The Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Rostov-on-Don, Russia)

Marine macroalgae (macrophytes) are an interesting underwater world, a special ecosystem that forms a unique biotope where fish, invertebrates, and microalgae live. Marine algae absorb carbon dioxide and release oxygen, playing a special role in the carbon cycle of the seas. Marine macroalgae communities are beautiful oases in the dark abyss of the ocean. These communities provide the foundation for hundreds of biological species, from massive marine mammals to microscopic bacteria. The algae of the Russian Arctic are especially beautiful and elegant. Each new study of marine algae brings researchers closer to understanding the phenomenon of their existence in the Arctic zone, in the conditions of a unique natural experiment: with the alternation of polar day and polar night, the necessity of existence on the Arctic tidal littoral, where the salinity of seawater can vary from 35‰ to 1–2‰, where algae withstand drying out on the littoral during low tides in summer and freezing in winter. At the same time, negative temperatures vary from –30 °C in winter to +20 °C in summer, and some algae can survive in extreme conditions of oil spills, being in a layer of petroleum products. This article focuses on the study of certain natural phenomena and algae reactions.

Keywords: Russian Arctic, the Barents Sea, marine macroalgae, environmental factors, oil pollution