

СООБЩЕНИЯ

ВЛИЯНИЕ СЫРОЙ НЕФТИ НА РАЗВИТИЕ
ЗИГОТ И ПРОРОСТКОВ ЗЕЛЕННОЙ ВОДОРΟΣЛИ
ULVA LACTUCA (ULVACEAE) БАРЕНЦЕВА МОРЯ

© 2023 г. Д. О. Салахов^{1,*}, Д. В. Пуговкин^{1,**}, Г. М. Воскобойников^{1,***}

¹Мурманский морской биологический институт РАН
ул. Владимирская, 17, Мурманск, 183038, Россия

*e-mail: salahov04@yandex.ru

**e-mail: pugovkin2005@yandex.ru

***e-mail: grvosk@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2023 г.

После доработки 04.10.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

Определена способность к развитию зигот и проростков зеленой водоросли *Ulva lactuca* под влиянием сырой нефти в различных концентрациях. При содержании в воде 1 мг/л нефть не оказывает повреждающего действия на прорастание зигот и дальнейшее развитие из них многоклеточных проростков. Ювенильные проростки имеют более широкий диапазон толерантности, чем зиготы и могут развиваться при содержании нефти в морской воде до 3 мг/л. Реальная угроза гибели зигот, обеспечивающих пополнение молодыми талломами популяций ульвовых на литорали, наблюдается при кратковременном загрязнении нефтью более 25 мг/л, либо при постоянном загрязнении нефтью более 5 мг/л. Содержание нефти в воде 25 мг/л и выше останавливает развитие большинства проростков, необратимо разрушая структуру их клеток. Скорость и степень повреждения *Ulva lactuca* на ранних стадиях онтогенеза зависят от длительности разлива нефти (или нефтепродуктов) и концентрации ее в среде.

Ключевые слова: Баренцево море, *Ulva lactuca*, зиготы, проростки, сырая нефть, толерантность к токсиканту

DOI: 10.31857/S000681362310006X, EDN: YDMRRD

Увеличение грузопотока у Мурманского побережья Баренцева моря в последнее десятилетие, ввод в эксплуатацию на берегу Кольского залива предприятий по перегрузке, хранению и переработке углеводородного сырья, рост маломерного флота в губах Западного и Восточного Мурмана из-за расширения туризма влекут за собой постоянное поступление в прибрежную акваторию углеводородов нефти и нефтепродуктов. Нами и другими исследователями был определен диапазон толерантности к данным токсикантам у различных видов макроводорослей. Большая часть этих сведений была получена в экспериментах на взрослых талломах водорослей, где основным загрязнителем было дизельное топливо (Stepanian, 2003; Salakhov et al., 2020a, b, 2021; Voskoboinikov et al., 2020; Ryzhik et al., 2022). Целью настоящей работы было определение влияния различных концентраций сырой нефти на развитие зигот и проростков зеленой водоросли *Ulva lactuca* Linnaeus 1753, которая

в массовом количестве была обнаружена на литорали Мурманского побережья сравнительно недавно (Malavenda et al., 2018).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Влияние сырой нефти на зиготы и проростки *Ulva lactuca* изучалось в июле–августе 2022 г. на сезонной биостанции Мурманского морского биологического института РАН в пос. Дальние Зеленцы. Фертильные талломы *U. lactuca* собирались на среднем горизонте литорали губы Зеленецкой (69°7'17" с.ш., 36°3'53" в.д.). Воду для экспериментов соленостью 33‰ отбирали в месте обитания водорослей, фильтровали через ватно-марлевый фильтр, стерилизовали при +60°C в течение двух суток, охлаждали для экспериментов до +8°C. Эксперименты проводили в термостатируемой комнате при температуре +8–+10°C. Методика получения зигот и проростков ульвы на

предметных стеклах описана ранее (Salakhov et al., 2020a).

Предметные стекла с прикрепившимися зиготами размещали в чашках Петри и заливали по 40 мл подготовленной для экспериментов морской водой. Часть чашек с зиготами использовали для первого эксперимента: “Влияние нефти на развитие зигот *U. lactuca*”, другая часть зигот с проростками из 4–6 клеток — для второго опыта: “Анализ развития проростков ульвы при различных концентрациях нефти”. По окончании первого эксперимента препараты с зиготами, остановившимися в развитии, из морской воды с нефтью переносились на 10 дней в чистую морскую воду для определения восстановления способности к прорастанию. Концентрация токсиканта в опытах на зиготах превышала установленные нормы ПДК (предельно допустимая концентрация) нефти для рыбохозяйственных водоемов в 20 (1 мг/л), 100 (5 мг/л), 500 (25 мг/л) раз, а на проростках — в 20, 60, 100, 500 раз (Salakhov et al., 2020b). Контролем для обоих экспериментов служили чашки Петри с зиготами и проростками, в которые добавляли стерилизованную морскую воду с фоновым уровнем содержания нефтепродуктов в воде из места отбора проб водорослей около 0.2 мг/л (4 ПДК). Во избежание испарения воды чашки Петри обматывали герметичной пленкой — “Парафилмом”.

Воду в чашках Петри в опытах и контроле меняли с периодичностью 1 раз в 3 дня. Длительность эксперимента составляла 20 дней. Для определения морфологического состояния клеток просматривали нефиксированные препараты зигот и проростков ульвы на предметных стеклах с использованием светового микроскопа ЛОМО Микмед-6 Вариант 7 с системой фото- и видеофиксации.

На всех этапах эксперимента (способность к прорастанию/развитию и способность к восстановлению) для световой микроскопии из каждого варианта использовали по три предметных стекла с зиготами/проростками. На каждом стекле просматривали не менее ста объектов.

Для электронно-микроскопических исследований проростки снимались с предметных стекол лезвиями бритвы и помещались в пробирки Эппендорфа с фиксатором. Предфиксация проводилась 2.5% глутаровым альдегидом на какодильном буфере (к-к-б), pH 7.2–7.4, а постфиксация — 1% оксидом осмия (OsO_4) на аналогичном буфере. Осмотическое давление обоих фиксаторов доводилось до осмотического давления морской воды в среде обитания (1100 мосм) с помощью сахарозы. Фиксация проходила при температуре от 0 до +5°C по схеме: глутаровым

альдегидом 18 часов, отмывка к-к-б — 2 смены по 6 часов, постфиксация оксидом осмия — 18 час. Далее материал готовился к просмотру на электронном микроскопе JEM-100C (фирмы JEOL) по общепринятым методикам (Uikli, 1975).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В контрольном варианте первого опыта “Влияние нефти на развитие зигот” (без дополнительного введения нефти в воду) и в варианте при содержании нефти в воде 20 ПДК все зиготы проросли на 2–3 сутки от начала эксперимента. На пятые сутки проростки состояли из 2–3 клеток и достигали в длину 15–20 мкм. Зиготы, как и клетки ювенильных проростков, имели зеленую насыщенную окраску (рис. 1a). Светооптические и электронно-микроскопические наблюдения показали отсутствие в клетках проростков плазмолиза (рис. 1b–c). Хлоропласты в клетках ювенильных проростков занимали пристеночное, либо центральное положение.

На 20 сутки в контроле и при 20 ПДК нефти в воде большая часть проростков (90%) состояла из 10–12, а некоторые из 15 клеток (рис. 1b). Если в начале эксперимента клетки имели овальную форму, то к концу опыта большей частью квадратную. 50–70% объема клетки занимал хлоропласт. В большинстве клеток выявлялись гранулы крахмала, которые занимали до 40% объема (рис. 1c–2). Также необходимо отметить сформированную клеточную оболочку и ядро (рис. 1c–1, 3). Все клетки имели насыщенную зеленую окраску, хлоропласты располагались пристеночно, либо в центральной части клетки. Плазмолиза, признаков повреждения в клетках проростков не отмечалось.

При содержании нефти в воде 1–5 мг/л (от 20 до 100 ПДК) проросли все зиготы, но на 5–6 сутки, а не на 2–3, как в контроле. Основная часть проростков к концу опыта состояла из 4–5 клеток. Хлоропласты имели, как и в контроле, ярко-зеленую окраску и располагались в основном в центре клетки.

При повышении концентрации нефти в среде до 25 мг/л (500 ПДК) на 5 день эксперимента проросли лишь единичные зиготы (не более 10% от общего количества). Значительная их часть оставалась в развитии на стадии формирования “трубки”. К 20 суткам эксперимента основная масса зигот так и не начала развиваться (рис. 1d). Незначительное количество образовавшихся проростков состояло из 1–2, реже — из 3–4 клеток, имеющих признаки деградации: изменение

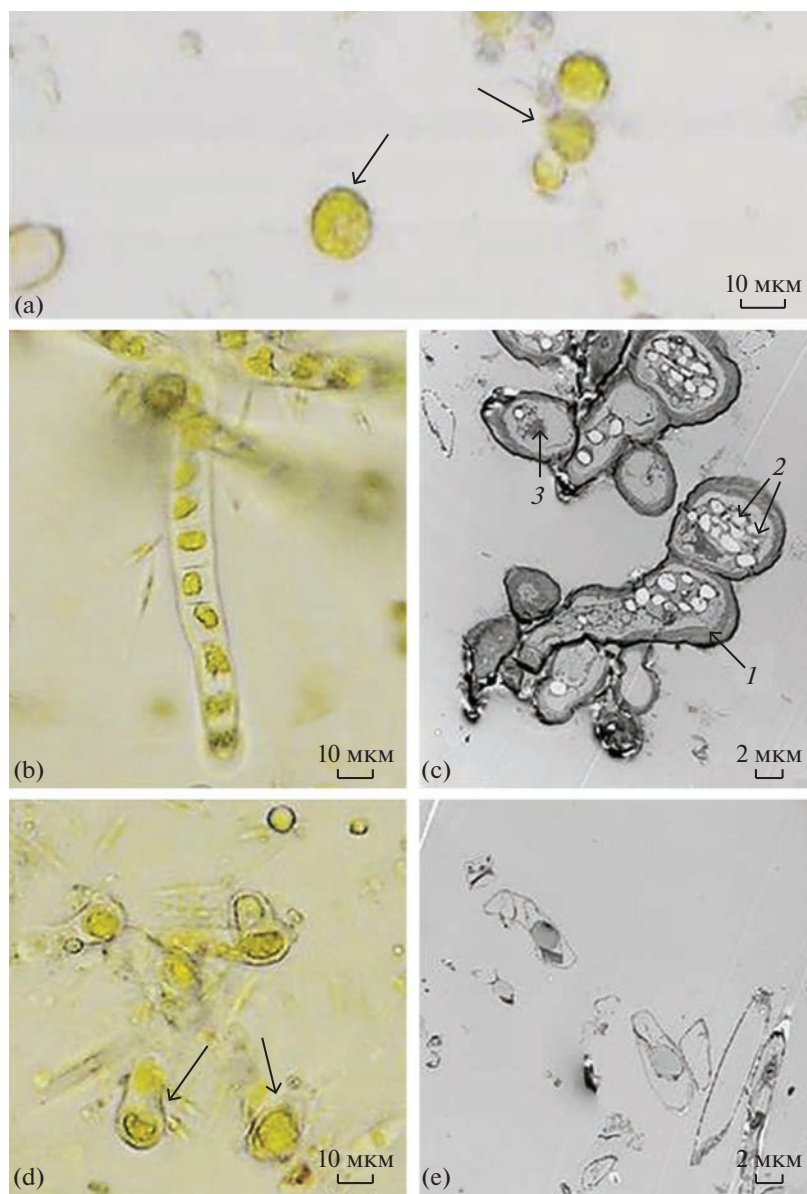


Рис. 1. Зиготы и проростки *Ulva lactuca* в первой части эксперимента: а – прикрепившиеся зиготы в первый день эксперимента (отмечены стрелками); б – клетки контрольных проростков на 20 день эксперимента (хлоропласты обозначены стрелками); в – ультраструктура контрольных проростков через 20 суток опыта: (1 – клеточная оболочка, 2 – крахмальные глобулы, 3 – ядро); д – клетки опытных образцов проростков, находившихся под влиянием сырой нефти 25 мг/л (500 ПДК) (стрелками отмечены остановившиеся в развитии проростки); е – ультраструктура клеток опытных образцов проростков, находившихся под влиянием сырой нефти 25 мг/л (500 ПДК).

Fig. 1. Zygotes and seedlings of *Ulva lactuca* in the first part of the experiment: а – attached zygotes on the first day of the experiment (marked with arrows); б – cells of control seedlings on the 20th day of the experiment (chloroplasts are indicated with arrows); в – ultrastructure of control seedlings after 20 days of the experiment: (1 – cell membrane, 2 – starch globules, 3 – nucleus); д – cells of experimental samples of seedlings that were under the influence of crude oil 25 mg/l (500 MPC) (arrows indicate seedlings that have stopped developing); е – ultrastructure of cells of experimental samples of seedlings under the influence of crude oil 25 mg/l (500 MPC).

формы клеток, плазмолиз, обесцвечивание хлоропластов (рис. 1е).

Перенос предметных стекол с зиготами, остановившимися в развитии при содержании нефти 500 ПДК, в чистую морскую воду, не простимулировал

развития зигот, как и, соответственно, не было отмечено развития ювенильных проростков.

В течение всего второго эксперимента (влияние нефти на ювенильные проростки) в контрольном варианте (без добавления нефти) проростки разви-

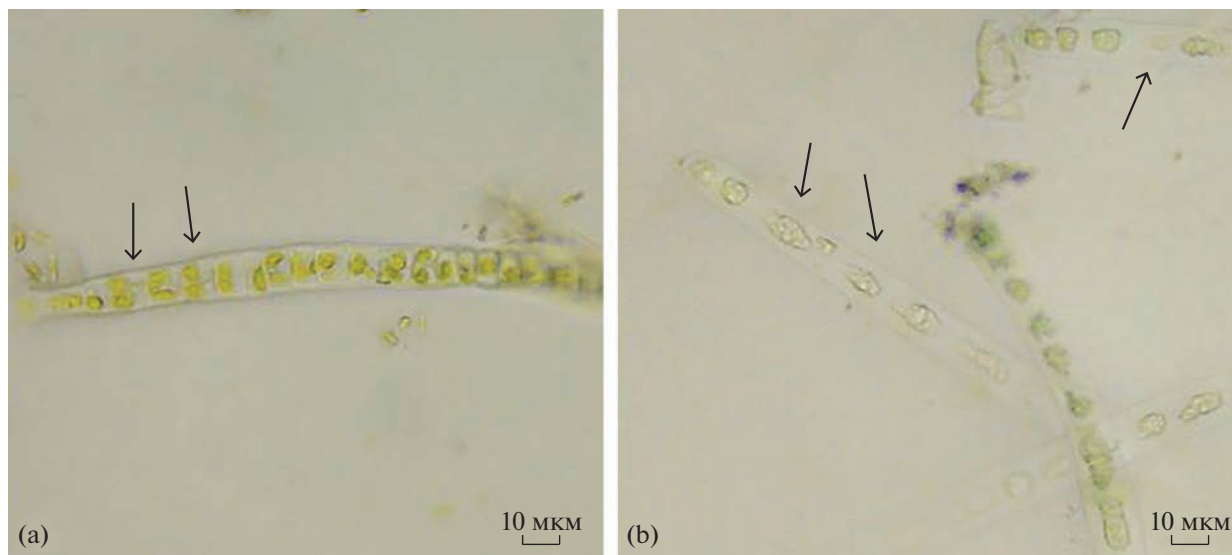


Рис. 2. Проростки *Ulva lactuca* через 20 суток эксперимента: а — контрольный образец проростков (стрелками обозначено появление второго ряда клеток); б — проростки, находящиеся под влиянием нефти 25 мг/л (500 ПДК) (стрелками обозначены практически полностью обесцвеченные клетки).

Fig. 2. *Ulva lactuca* seedlings after 20 days of the experiment: а — control sample of seedlings (arrows indicate the appearance of the second row of cells); б — seedlings under the influence of oil 25 mg/l (500 MPC) (arrows indicate almost completely discolored cells).

вались и увеличивались в размерах. Число клеток в проростках выросло с 4–6 в начале эксперимента до 36 в конце (20 суток). Длина проростков достигала к концу опыта 400 мкм. На 20 сутки было отмечено появление второго ряда клеток — признака, характерного для *U. lactuca* (рис. 2а).

При добавлении сырой нефти в концентрациях 1–3 мг/л (20–60 ПДК) развитие проростков ульвы не отличалось от контрольного варианта. Плазмолиза и деструкции хлоропластов, изменения зеленой окраски клеток не отмечалось, наблюдался активный рост клеток. На 10 сутки проростки насчитывали до 10–12 клеток, на 15 сутки некоторые экземпляры — 25–27 клеток, а к 20 суткам опыта проростки состояли из 20–35 клеток и имели длину до 350–400 мкм. Как и в контроле, в опытных вариантах с содержанием нефти в воде 20 и 60 ПДК к концу эксперимента формировался второй ряд клеток.

При концентрации нефти 5 мг/л (100 ПДК) в течение 15 дней проростки активно развивались, плазмолиза и деструктивных изменений в клетках не выявлялось. В клетках прямоугольной формы, размером 10 × 15 мкм, хлоропласты располагались пристеночно, либо по центру клетки, и занимали не более 50% объема. Основная масса проростков состояла из 10–15 клеток, но единичные экземпляры достигали 30 клеток и размера до 350 мкм. На 20 сутки опыта в клетках отмечались признаки плазмолиза и деструкции хлоропла-

стов. Некоторые клетки были полностью обесцвечены. Наряду с поврежденными проростками на стеклах присутствовали единичные проростки без признаков деградации. Некоторые из них насчитывали от 20 до 35 клеток, и достигали длины 400 мкм, большая же часть проростков состояла из 10–15 клеток и не превышала длины 100–150 мкм.

При содержании нефти в воде 25 мг/л (500 ПДК) после 10 суток эксперимента у большинства проростков (90%) не отмечалось роста числа клеток или увеличения их размеров. Однако примерно у 10% проростков регистрировалось увеличение числа клеток (с 4–6 до 10–12). Обесцвечивания или гибели клеток у проростков не отмечалось. На 20 день опыта большая часть клеток в проростках имела признаки деградации (рис. 2б): потеряла ярко-зеленую окраску, которая была присуща проросткам контрольного варианта эксперимента, а также при воздействии на них относительно невысоких концентраций (20–100 ПДК) нефти. Количество клеток у таких проростков не превышало 8–12. На данной стадии эксперимента присутствовали и полностью обесцвеченные проростки (не более 5% от общего количества). У небольшой части проростков при содержании нефти в воде 500 ПДК отмечалось увеличение числа клеток до 20–25.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных показал, что сырая нефть при содержании в воде 1 мг/л (20 ПДК) не оказывала повреждающего действия на развитие зигот *U. lactuca*. Все зиготы проросли, дав начало многоклеточным проросткам. Повышение содержания нефти в воде до 5 мг/л (100 ПДК) также не влияло на жизнеспособность зигот, но отмечалось увеличение продолжительности периода их прорастания в 2 раза. Способность к прорастанию зигот и развитию появившихся проростков резко падала при повышении концентрации токсиканта в воде до 25 мг/л (500 ПДК). При такой концентрации прорастало лишь небольшое число зигот, которое образовывало проростки из 1–2, реже из 3–4 клеток. Дальнейшего развития такие проростки не получали даже при переносе их в чистую морскую воду. Подобные изменения были выявлены в экспериментах по влиянию сырой нефти на ранние стадии развития *Fucus serratus* (Thélin, 1981). В результате экспериментов этого автора было показано, что наиболее чувствительными являлись водоросли на стадии прорастания (прорастающие зиготы) и проростки. Позднее О.В. Степаньяном (Stepanian, 2003, 2013) подтвердилась точка зрения о влиянии нефти на ранние стадии развития водорослей. В экспериментах автор наблюдал 100% прорастание зигот у близкого к нашему объекту вида *Enteromorpha intestinalis* (*Ulva intestinalis*) при концентрации сырой нефти 30 мг/л (600 ПДК), однако после прорастания, как и в нашем эксперименте, развития проростков не происходило, а, наоборот, на вторые сутки после прорастания, отмечалось отмирание 2–3-клеточных нитей. Меньшее содержание нефти в воде (10 ПДК) по данным О.В. Степаньяна (Stepanian, 2013) не вызывало гибели и нарушений в строении водоросли в течение 15 суток. Необходимо отметить, что торможение, а иногда и подавление развития зигот у ульвовых и эмбриоспор у ламинариевых выявлено под влиянием и других факторов: ультрафиолет, тяжелые металлы, температура. В ряде случаев, после устранения воздействия повреждающего фактора и лаг-фазы различной продолжительности, способность к образованию “трубки” и дальнейшему развитию у зигот или эмбриоспор восстанавливалась (Voskoboinikov, 2006). По данным наших исследований фоновое содержание нефтепродуктов в большинстве губ Восточного Мурмана составляет 4–8 ПДК (Salakhov et al., 2020a, b) и не является препятствием для прохождения ранних стадий развития данного вида ульвы в прибрежье Восточного Мурмана. Кратковременная концентрация нефти в воде от 5 до 25 мг/л (100–500 ПДК), которая может создаваться разовыми выбросами углеводородного сы-

рья во время повреждений нефтепроводов, при авариях на предприятиях по перегрузке, переработке углеводородного сырья, благодаря приливно-отливному обмену воды достаточно быстро уменьшается, и, как показали наши эксперименты, не подавляет развития зигот. Можно предположить, что реальная угроза гибели зигот и прекращения пополнения молодыми талломами популяций ульвовых на литорали происходит при разливах нефти, создающих кратковременное загрязнение более 500 ПДК, либо при наличии постоянного загрязнения нефтью, превышающего 100 ПДК. Результаты проведенных нами экспериментов показывают, что зиготы менее устойчивы к воздействию нефти, чем сформировавшиеся проростки, имеющие в своем строении 4–6 клеток. Об этом свидетельствует замедление в развитии и прорастании зигот на 20 день эксперимента уже при концентрации нефти в среде от 1 мг/л (20 ПДК). У сформировавшихся проростков таких изменений в скорости развития не отмечалось при концентрации нефти до 3 мг/л (60 ПДК). При повышении концентрации токсиканта до 25 мг/л (500 ПДК), через 20 суток основная масса зигот осталась не проросшей, либо проросла, но остановилась в развитии на стадии 2–3 клеток. У проростков отмечен иной характер ответной реакции на присутствие токсиканта: при концентрации нефти 25 мг/л (500 ПДК) разрушения клеточных структур не наблюдалось у 100% особей, однако 90% не прибавили в росте относительно первого дня опыта.

Сырая нефть — токсикант естественной природы, в состав которой входят как высокомолекулярные, так и низкомолекулярные фракции, способные по-разному влиять на растительные организмы. Наибольшую опасность для морских обитателей после разлива нефтепродуктов представляют низкомолекулярные вещества. Это обуславливается их хорошей растворимостью в воде, а также способностью быстро проникать в живые клетки и разрушать их (Patin, 2008). Тонкая клеточная стенка проростков слабо препятствует проникновению токсиканта внутрь клетки. По-видимому, еще проще осуществляется проникновение легких фракций через плазматическую мембрану, ограничивающую от внешней среды зиготу. В случае же взрослых талломов ульвы, клетки которых окружены плотной целлюлозной оболочкой, трансформация нефтепродуктов происходит на внешней поверхности оболочки таллома эпифитными углеводородокисляющими бактериями. Данные электронной микроскопии подтверждают присутствие бактерий на поверхности взрослых талломов ульвы и их отсутствие на поверхности оболочки у зигот и ювенильных

проростков. Вместе с тем при проникновении токсических веществ в клетки макроводорослей образуются активные формы кислорода, в свою очередь активирующие антиоксидантную систему клетки (АСК), ферменты которой обезвреживают токсикант. Данный механизм описан у взрослых талломов *U. lactuca* (Pilatti et al., 2016; Ryzhik, Makarov, 2019). Ранее высказывалось предположение о формировании АСК у проростков *U. lactuca*, защищающей клетки водорослей от воздействия дизельного топлива (Salakhov et al., 2020a, b). Можно также предположить, что АСК формируется уже на стадии зиготы, которая представляет собой одноклеточный организм. По-видимому, именно существование АСК является определяющим в выживании водорослей на стадиях зиготы и проростка в условиях нефтяного загрязнения.

ВЫВОДЫ

Сырая нефть при содержании в воде до 20 ПДК не оказывает повреждающего действия на прорастание зигот *Ulva lactuca* и дальнейшее развитие из них многоклеточных проростков. Реальная угроза гибели зигот и прекращения пополнения молодыми талломами литоральных популяций ульвовых происходит при разливах нефти, создающих кратковременное загрязнение более 25 мг/л (500 ПДК), либо при наличии постоянного загрязнения нефтью, превышающего 5 мг/л (100 ПДК).

Сырая нефть при содержании в воде до 3 мг/л (60 ПДК) не оказывает на 3–4-клеточные проростки повреждающего действия, которое проявляется при содержании в воде 5 мг/л 100 ПДК, и останавливает развитие большей части проростков, необратимо разрушая структуру клеток, при содержании нефти в воде 25 мг/л (500 ПДК).

Скорость и степень повреждения *Ulva lactuca* на ранних стадиях онтогенеза зависит от длительности разлива нефти (или нефтепродуктов) и концентрации ее в среде.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ 22-17-00243 “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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Malavenda S., Makarov M., Ryzhik I., Mityaev M., Malavenda S. 2018. Occurrence of *Ulva lactuca* L. 1753 (Ulvacaeae, Chlorophyta) at the Murman Coast of the Barents Sea. — *Polar Research*. 37 (1). 1503912. <https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1503912>
- [Patin] Патин С.А. 2008. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. М. 508 с.
- Pilatti F.K., Ramlov F., Schmidt E.K., Kreusch M., Pereira D.T., Costa C., Oliveira E.R., Bauer C.M., Rocha M., Bouzon Z.L., Maraschin M. 2016. In vitro exposure of *Ulva lactuca* Linnaeus (Chlorophyta) to gasoline. — *Biochemical and Morphological Alterations*. *Chemosphere*. 156: 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.126>
- Ryzhik I.V., Makarov M.V. 2019. Effect of diesel fuel film on green algae *Ulva lactuca* L. and *Ulvaria obscura* (Kützting) Gayral ex Bliding of the Barents Sea. — In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 302 (1): 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/302/1/012029>
- Ryzhik I.V., Pugovkin D.V., Salakhov D.O., Klindukh M.P., Voskoboynikov G.M. 2022. Physiological changes and rate of resistance of *Acrosiphonia arcta* (Dillwyn) Gain upon exposure to diesel fuel. — *Heliyon*. 8 (8): e10177. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10177>
- [Salakhov et al.] Салахов Д.О., Воскобойников Г.М., Рыжик И.В. 2020a. Влияние дизельного топлива на развитие проростков *Ulva lactuca* L. (Chlorophyta) Баренцева моря. — *Наука Юга России*. 16: 55–59. <https://doi.org/10.7868/S25000640200107>
- Salakhov D.O., Pugovkin D.V., Ryzhik I.V., Voskoboynikov G.M. 2020b. The influence of diesel fuel on morpho-functional state of *Ulvaria obscura* (Chlorophyta). — In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 539 (1): 012202. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/539/1/012202>
- Salakhov D.O., Pugovkin D.V., Ryzhik I.V., Voskoboynikov G.M. 2021. The changes in the morpho-functional state of the green alga *Ulva intestinalis* L. in the Barents Sea under the influence of diesel fuel. — In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 937 (2): 022059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022059>
- [Stepanian] Степаньян О.В. 2003. Морфофункциональные перестройки у водорослей-макрофитов Баренцева моря под влиянием нефти и нефтепродуктов: Автореф. ... дис. канд. биол. наук. Мурманск. 29 с.
- [Stepanian] Степаньян О.В. 2013. Влияние сырой нефти на ранние стадии развития макроводорослей Баренцева моря. — *Бот. журн.* 98 (7): 903–912.
- Thélin I. 1981. Effects, en culture, de deux pétroles bruts et d'un dispersant pétrolier sur les zygotes et les plantules de *Fucus serratus* Linnaeus (Fuciales, Phaeophyceae). — *Bot. Mar.* 24: 515–519.
- [Uikli] Уикли Б. 1975. Электронная микроскопия для начинающих. М. 324 с.

[Voskoboinikov] Воскобойников Г.М. 2006. Механизмы адаптации, регуляции роста и перспективы использования макрофитов Баренцева моря: Дис. ... докт. биол. наук. Мурманск. 465 с.

[Voskoboinikov et al.] Воскобойников Г.М., Рыжик И.В., Салахов Д.О., Метелькова Л.О., Жаковская З.А., Ло-

пушанская Е.М. 2020. 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. 46 (2): 135–141. <https://doi.org/10.31857/S0134347520020102>

INFLUENCE OF CRUDE OIL ON THE DEVELOPMENT OF ZYGOTES AND SEEDLINGS OF THE GREEN ALGA *ULVA LACTUCA* (ULVACEAE) OF THE BARENTS SEA

D. O. Salakhov^{a,#}, D. V. Pugovkin^{a,##}, and G. M. Voskoboinikov^{a,###}

^aMurmansk Marine Biological Institute RAS Vladimirskaia Str., 17, Murmansk, 183010, Russia

[#]e-mail: salahov04@yandex.ru

^{##}e-mail: pugovkin2005@yandex.ru

^{###}e-mail: grvosk@mail.ru

The ability of the zygotes and seedlings of the green alga *Ulva lactuca* to develop under the influence of crude oil in various concentrations was determined. The oil at a content of 1 mg/l in water does not have a damaging effect on the germination of zygotes and their further development into multicellular seedlings. Juvenile seedlings have a wider tolerance range than zygotes and can develop under oil content in marine water up to 3 mg/l. The real threat of the death of zygotes, which provide replenishment of ulva algae thickets in the littoral with young thalli, is observed under short-term oil pollution of more than 25 mg/l, or with constant oil pollution of more than 5 mg/l. The oil content in water of 25 mg/l and above stops the development of most seedlings by irreversibly destroying the structure of their cells.

Keywords: *Ulva lactuca*, Barents Sea, zygotes, seedlings, crude oil, tolerance to toxicant

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the grant of the Russian National Research Foundation 22-17-00243 “Radiation oceanology and geoecology of the coastal shelf of the Barents and White Seas. Biocosal interactions in the system: bottom sediments—water—macroalgae—microorganisms, their role in remediation of the marine coastal ecosystem under radiation and chemical pollution in the Arctic”.

REFERENCES

- Malavenda S., Makarov M., Ryzhik I., Mityaev M., Malavenda S. 2018. Occurrence of *Ulva lactuca* L. 1753 (Ulvaaceae, Chlorophyta) at the Murman Coast of the Barents Sea. — Polar Research. 37 (1): 1503912. <https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1503912>
- Patin S.A. 2008. Neftyanye razlivy i ikh vozdeystvie na morskuyu sredu i bioresursy [Oil spills and their impact on the marine environment and biological resources]. Moscow. 508 p. (In Russ.).
- Pilatti F.K., Ramlov F., Schmidt E.K., Kreusch M., Pereira D.T., Costa C., Oliveira E.R., Bauer C.M., Rocha M., Bouzon Z.L., Maraschin M. 2016. In vitro exposure of *Ulva lactuca* Linnaeus (Chlorophyta) to gasoline. — Biochemical and Morphological Alterations. Chemosphere. 156: 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.126>
- Ryzhik I.V., Makarov M.V. 2019. Effect of diesel fuel film on green algae *Ulva lactuca* L. and *Ulvaria obscura* (Kützting) Gayral ex Bliding of the Barents Sea. — In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 302 (1): 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/302/1/012029>
- Ryzhik I.V., Pugovkin D.V., Salakhov D.O., Klindukh M.P., Voskoboinikov G.M. 2022. Physiological changes and rate of resistance of *Acrosiphonia arcta* (Dillwyn) Gain upon exposure to diesel fuel. — Heliyon. 8 (8): e10177. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10177>
- Salakhov D.O., Voskoboinikov G.M., Ryzhik I.V. 2020a. Vliyanie dizel'nogo topliva na razvitie prorostkov *Ulva lactuca* L. (Chlorophyta) Barentseva morya [The effect of diesel fuel on the development of seedlings of *Ulva lactuca* L. (Chlorophyta) Barents Sea]. — Nauka Yuga Rossii. 16: 55–59 (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S25000640200107>
- Salakhov D.O., Pugovkin D.V., Ryzhik I.V., Voskoboinikov G.M. 2020b. The influence of diesel fuel on morpho-functional state of *Ulvaria obscura* (Chlorophyta). — In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 539 (1): 012202. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/539/1/012202>
- Salakhov D.O., Pugovkin D.V., Ryzhik I.V., Voskoboinikov G.M. 2021. The changes in the morpho-functional state of the green alga *Ulva intestinalis* L. in the Barents Sea under the influence of diesel fuel. — In:

- IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 937 (2): 022059.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022059>
- Stepaniyan O.V. 2003. Morfofunkcional'nye perestrojki u vodoroslej-makrofitov Barentseva morya pod vliyaniem nefti i nefteproduktov: Avtoref. ... dis. kand. biol. nauk [Morphofunctional rearrangements in algae macrophytes of the Barents Sea under the influence of oil and petroleum products] Murmansk. 29 p. (In Russ.).
- Stepaniyan O.V. 2013. The influence of crude oil on the early stages of macroalgae development in the Barents Sea. — Bot. Zhurn. 98 (7): 903–912 (In Russ.).
- Thélin I. 1981 Effects, en culture, de deux pétroles bruts et d'un dispersant pétrolier sur les zygotes et les plantules de *Fucus serratus* Linnaeus (Fucales, Phaeophyceae). — Bot. Mar. 24: 515–519.
- Uikli B. 1975. Elektronnaya mikroskopiya dlya nachinayushchikh [Electron microscopy for beginners]. Moscow. 324 p. (In Russ.).
- Voskoboinikov G.M. 2006. Mekhanizmy adaptatsii, regul'yatsii rosta i perspektivy ispol'zovaniya makrofitov Barentseva morya: Diss. ... dokt. biol. nauk [Mechanisms of adaptation, growth regulation and prospects for the use of macrophytes of the Barents Sea]. Murmansk. 465 p. (In Russ.).
- Voskoboinikov G.M., Ryzhik I.V., Salakhov D.O., Metelkova L.O., Zhakovskaya Z.A., Lopushanskaya E.M. 2020. 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. — Russian Journal of Marine Biology. 46 (2): 113–118.
<https://doi.org/10.31857/S0134347520020102>