
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 593.8:665.7:591.148(262.5)

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ
НЕФТЕПРОДУКТОВ НА БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ
ЧЕРНОМОРСКИХ ГРЕБНЕВИКОВ-ВСЕЛЕНЦЕВ
MNEMIOPSIS LEIDYI A.AGASSIZ, 1865 И *BEROE OVATA* MAYER, 1912***

Машукова О.В., Силаков М.И.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: olgamashukova@yandex.ru

Выяснение различных аспектов функциональных взаимоотношений гидробионтов с окружающей средой, обеспечивающих их рост, репродукцию, биоразнообразие популяций и распространение в самых разнообразных по экологическим условиям, в частности, антропогенному прессингу районах Мирового океана, является важнейшим направлением современной гидроэкологии. Одним из путей сохранения биоразнообразия служит повышение стойкости вида, что возможно только при исследовании различных аспектов его адаптации к антропогенному воздействию. Наибольший вред чистоте водоемов приносят нефть и нефтепродукты, попадающие в воду различными путями. В работе рассматривается чувствительность черноморских гребневики к воздействию сырой нефти на примере изменения параметров биолюминесценции этих видов.

Отбор проб осуществляли с поверхности воды в севастопольских бухтах Черного моря. Биолюминесцентные сигналы гребневики регистрировали при помощи приборно-лабораторного комплекса «Свет». Результаты исследований показали изменчивость амплитудно-временных характеристик биолюминесценции гребневики *Mnemiopsis leidyi* A.Agassiz, 1865 и *Beroe ovata* Mayer, 1912 в зависимости от концентрации нефтепродуктов. Интенсивность и энергия свечения гребневики снижается с увеличением концентрации действующего нефтепродукта. Стимулирующий эффект наблюдается при концентрации 0,1 ПДК сырой нефти, что выражается в повышении интенсивности свечения гребневики. Ингибирование биолюминесценции *M. leidyi* и *B. ovata* максимально при 10 ПДК нефтепродукта. Выявленная в результате экспериментов высокая чувствительность биолюминесценции гребневики к воздействию нефтепродуктов позволяет использовать их в качестве биоиндикаторов этого вида токсикантов.

Ключевые слова: характеристики светового излучения, сырая нефть, гребневики, Чёрное море.

Введение

Экологическое состояние любой акватории зависит от влияния совокупности антропогенных и природных факторов. Основными экологическими проблемами, которые возникли в Чёрном море ещё в конце XX ст., являются эвтрофикация шельфовых зон, загрязнение морской среды токсическими веществами, и, как

* Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме № АААА-А18-118020790229-7 и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-45-920015 p_a). Отработка метода проводилась в рамках темы «Комплексные исследования современного состояния экосистемы Атлантического сектора Антарктики», № гос.регистрации АААА-А19-119100290162-0.

следствие, деградация прибрежных гидробиоценозов (Воробьев и др., 2006; Доценко, 1995; Иванов и др., 2006; Tokarev, Shulman, 2007).

Большинство загрязняющих веществ, попадая в морскую воду, создают ситуации локального либо регионального загрязнения, чем нарушают нормальный ход биологических процессов. Токсические соединения активно воздействуют на метаболизм и репродукцию планктонных организмов – представителей начальных трофических звеньев в море (Лукияненко, Черкашин, 1987; Миронов, 2006). Наряду с детергентами, поверхностно-активными веществами (ПАВ) антропогенного происхождения (карбоновые кислоты, их соли, спирты, амины, сульфокислоты и др.) и естественными ПАВ, представляющими собой продукты жизнедеятельности морских организмов, нефть является основным источником загрязнения поверхности океана.

Достаточно хорошо исследованы процессы биоаккумуляции нефтепродуктов у организмов различной таксономической принадлежности, поведенческие реакции гидробионтов на присутствие в среде различных фракций нефтепродуктов (Лозовой, 2012; Миронов и др., 2018; Саксонов и др., 2001; Стом, Гиль, 1998).

Согласно современным представлениям, основанным на многолетних экспериментальных и натурных исследованиях, потенциально токсичными для морской среды являются такие микроэлементы нефти, которые содержат нафтеновые кислоты и фенольные соединения, хлороформенные битумоиды, в составе которых имеются такие экологически особо опасные соединения, как полиароматические углеводороды (Воробьев и др., 2006).

Биолюминесцентная система планктонтов, как один из ферментсубстратных модулей в комплексе внутренних биофизических циклов организма, испытывает определённые сдвиги при контакте с токсикантами (Токарев и др., 2016). В ряде случаев показаны нарушения функциональных характеристик организмов, подавление или смещение фазового периода циркадных ритмов биолюминесценции и её характеристик под воздействием некоторых химических и физических агентов (Heimann et al., 2002; Tokarev et al., 2007).

В силу вышеизложенного одной из задач нашей работы явилось исследование воздействия нефтепродуктов на изменение характеристик биолюминесценции гребневигов. Подобных исследований с ктенофорами до сих пор не проводилось.

Эта задача решалась с использованием нефтепродуктов, воздействие которых подвергает риску дестабилизации ряд локальных акваторий Чёрного моря (Доценко, 1995; Миронов, 2006). ПДК, установленные для исследуемых соединений, по порядку величин близки к среднему содержанию в морских водах (Ежегодник качества..., 2009; Перечень предельно..., 1995).

Материалы и методы

Исследования вариабельности светоизлучения *M. leidyi* и *B. ovata* в зависимости от воздействия нефтепродуктов проводили в Отделе биофизической экологии ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБИОМ) в июле-августе 2018 и сентябре-октябре 2019 гг. В качестве нефтепродуктов использовался малосернистый легкий сорт сырой нефти. Пробы гребневигов с поверхности воды отбирали сачком в 4 точках в севастопольских бухтах: Артиллерийская и Александровская. Концентрация нефтепродуктов в воде в данных точках была одинаковой.

Для опытов отбирали одноразмерную группу половозрелых особей *M. leidyi* – 35–40 мм (орально-аборальная длина) с сырой массой $9,16 \pm 0,45$ г и половозрелых *B. ovata* длиной 30–40 мм с сырой массой 3,8–7,7 г. Свежевыловленные особи помещали в ёмкости объёмом 3–5 л с профильтрованной морской водой (диаметр пор

мембранных фильтров 35 мкм) при температуре $21 \pm 2^\circ\text{C}$ и адаптировали к условиям опыта.

Гребневики разделяли на 4 группы (в каждой экспериментальной группе по 40 экземпляров): 1) особи, содержащиеся при концентрациях нефтепродуктов, в 10 раз меньше ПДК (Перечень предельно..., 1995); 2) особи, содержащиеся при ПДК нефтепродуктов; 3) особи, содержащиеся при концентрациях нефтепродуктов, в 10 раз превышающих ПДК, и 4) контроль – свежельвленные гребневики, содержащиеся в чистой морской воде. Для исследований были взяты только неповрежденные особи без содержимого в гастроваскулярной полости. Экспозиция гребневиков в темноте контрольной и экспериментальных групп составляла 1 ч.

Биолюминесцентные сигналы ктенофор регистрировались сразу после экспозиции. Параллельно проводились измерения сигналов у организмов из контрольной группы. Определение характеристик биолюминесценции гребневиков проводили в дневное время при полной темноте. Организмы каждой группы гребневиков подвергали механической и химической стимуляции при помощи приборно-лабораторного комплекса “Свет” (Токарев и др., 2016). Приборный комплекс включал в себя высоковольтный блок питания (ВС-22); люминескоп, состоящий из приёмника светового излучения (ФЭУ-71) и темновой камеры для объекта, а также цифровой интерфейс. Частота регистрации биолюминесцентного сигнала составляла 10 кГц. Данные выводились на экран в виде графика и записывались в текстовый файл с привязкой по времени. В темновую камеру люминескопа устанавливали кювету объёмом 50 см³ из прозрачного оргстекла, в которую отсаживали подопытные организмы. Биолюминесцентный анализ состоял из двух фаз.

Первая фаза биолюминесцентного анализа основана на механической стимуляции свечения, которая сводилась к созданию потока воды в сосуде с гребневиком с помощью поршневого устройства. Возникающие при перемещении воды изменения гидрофизических характеристик приводят к деформации клеточной мембраны гребневика, которая, в свою очередь, индуцирует возникновение потенциала действия и, как следствие, светоизлучения. *In situ* биолюминесцентную вспышку запускает именно механический стимул – сдвиговое напряжение жидкости, причём, при переходе тока жидкости от ламинарного к турбулентному, свечение резко возрастает по интенсивности.

Вторая фаза эксперимента, включающая химическую стимуляцию свечения, используется для получения информации о максимальном биолюминесцентном потенциале. В качестве химического раздражителя в кюветы с организмами вводили 2 см³ 96% этилового спирта (Heimann et al., 2002).

Результаты и обсуждение

Результаты исследований показали, что стимулирующее действие при 0,1 ПДК сменяется ингибированием их свечения при увеличении концентрации токсиканта до 10 ПДК.

Выявлено существенное изменение показателей амплитуды светоизлучения *M. leidyi* (рис. 1), максимальные значения которой зарегистрированы у гребневиков, содержащихся при минимальных концентрациях реагента при химической стимуляции.

Уровень интенсивности светоизлучения данной экспериментальной группы при непродолжительной экспозиции (1 ч) в 2 раза превышает контроль ($p < 0,05$). Во всех экспериментальных группах при механической стимуляции, адекватной природным стимулам, амплитуда светоизлучения гребневика снижается с увеличением концентрации нефтепродукта (рис. 1). При воздействии 10 ПДК нефти интенсивность свечения *M. leidyi* минимальна при обоих видах стимуляции. Значения интенсивности

свечения при механической стимуляции составляет $39,01 \pm 1,94 \cdot 10^{-4}$ мкВт·см⁻², что в 2 раза ниже контроля.

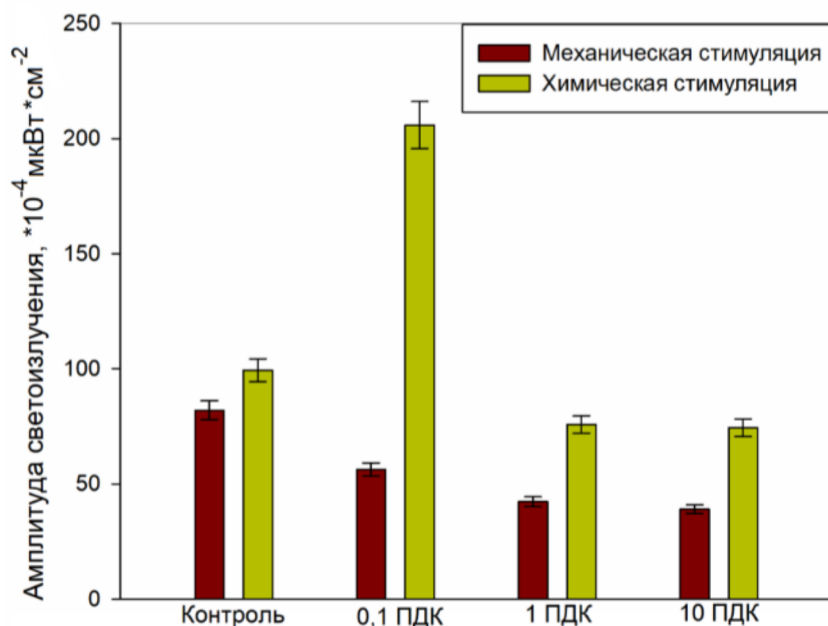


Рис. 1. Вариабельность амплитуды свечения гребневика *M. leidy* при воздействии различных концентраций нефтепродуктов

Длительность светоизлучения при механической стимуляции у экземпляров *M. leidy*, находящихся под воздействием токсиканта, возрастает, достигая значений контроля при 10 ПДК – 1,59 с. (рис. 2). При химической стимуляции продолжительность биолуминесцентного сигнала практически не изменяется и при высокой концентрации токсиканта идентична контролю – 1,37 с.

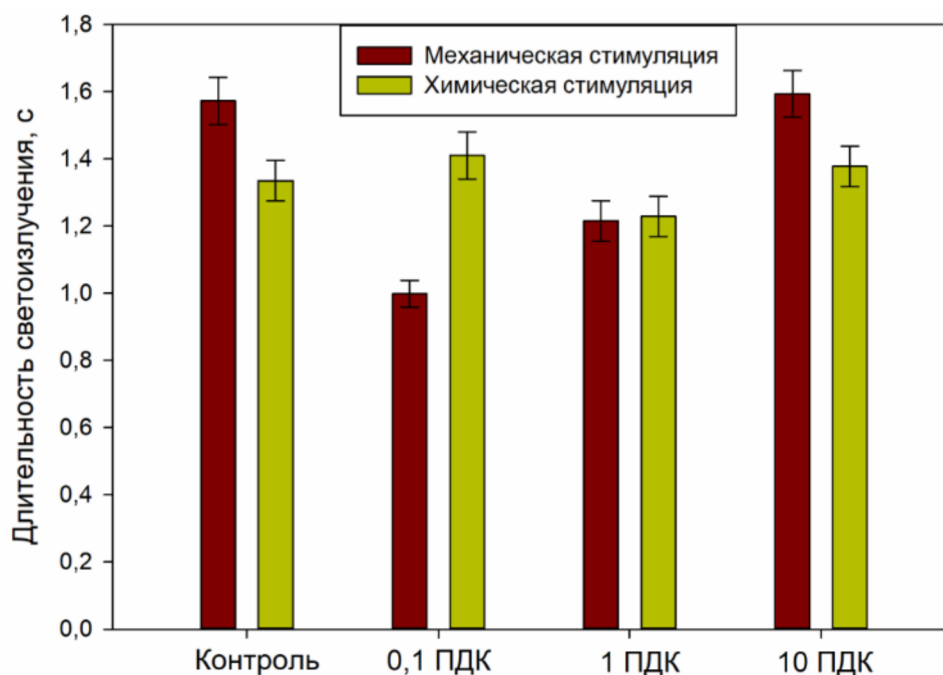


Рис. 2. Вариабельность длительности свечения гребневика *M. leidy* при воздействии различных концентраций нефтепродуктов

При воздействии малых концентраций нефтепродуктов на *B. ovata* наблюдается незначительное увеличение значений амплитуды светоизлучения (рис. 3). Однако, с увеличением концентрации, показатели амплитуды резко снижаются до $15\text{--}20 \cdot 10^{-4} \text{ мкВт см}^{-2}$, что в 2–3 раза ниже контрольных значений и достигают минимума при 10 ПДК.

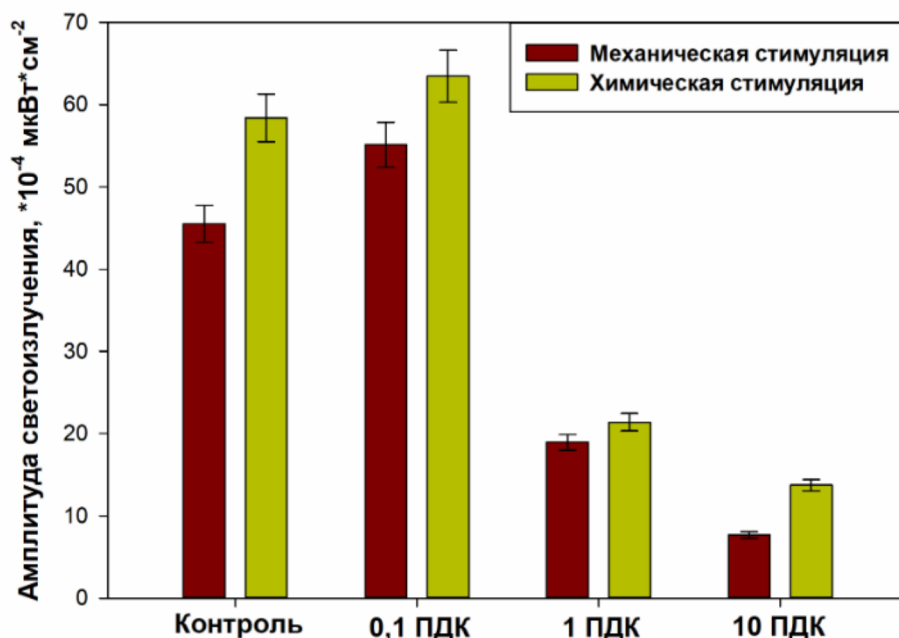


Рис. 3. Вариабельность амплитуды свечения гребневика *B. ovata* при воздействии различных концентраций нефтепродуктов

Длительность светоизлучения *B. ovata* (рис. 4) при всех исследуемых концентрациях в 2–3 раза ниже контрольных значений и практически не изменяется. Продолжительность сигналов при обоих методах стимуляции составляет 1,04–1,10 с.

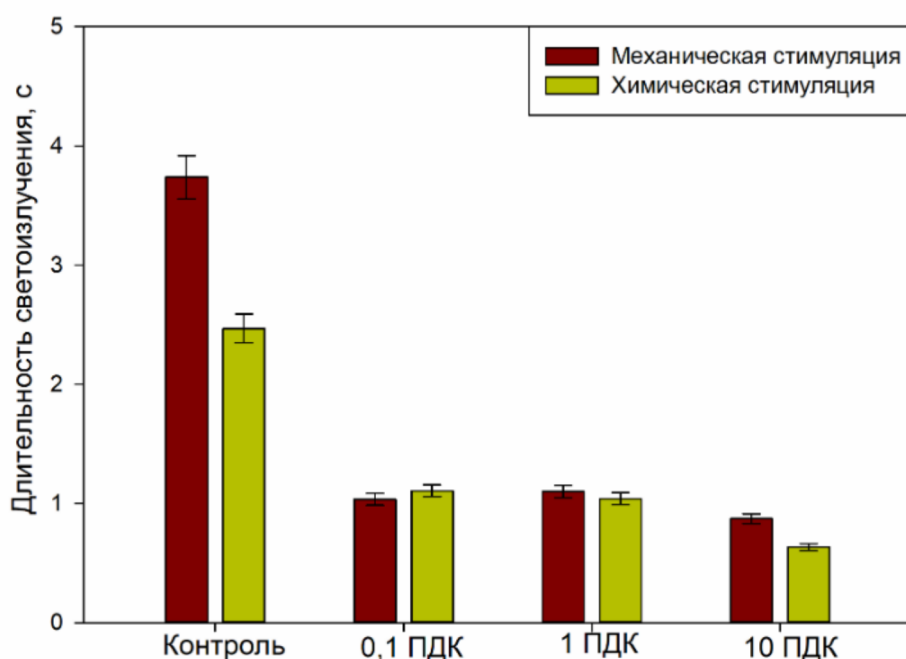


Рис. 4. Вариабельность длительности свечения гребневика *B. ovata* при воздействии различных концентраций нефтепродуктов

Экспозиция гребневиков при различных концентрациях нефтепродуктов оказала влияние и на характер биолюминесцентных сигналов гребневиков (рис. 5).

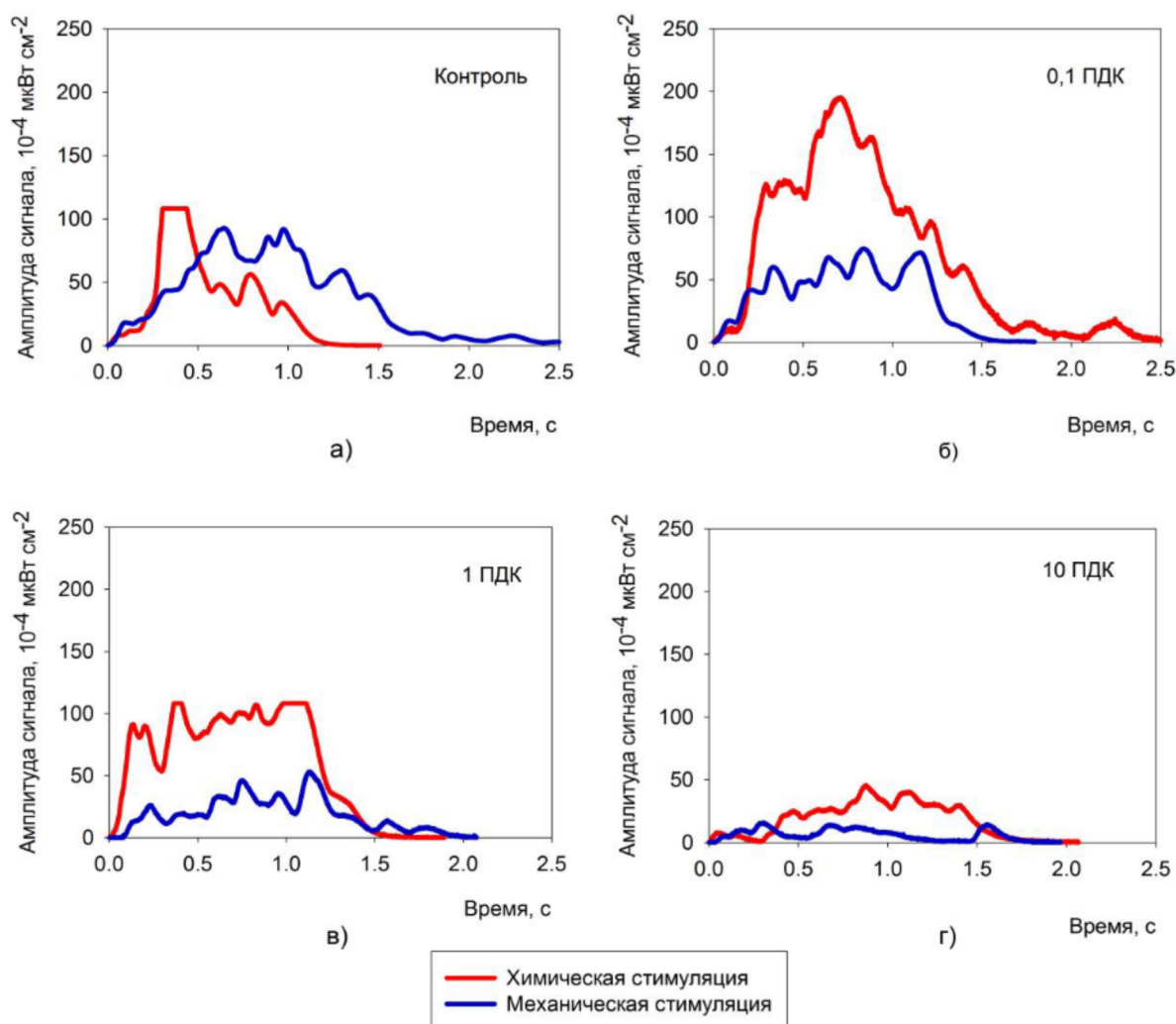


Рис. 5. Типичные сигналы гребневиков *M. leidyi* и *B. ovata* при воздействии различных концентраций нефтепродуктов при химической стимуляции

Форма биолюминесцентного сигнала у гребневиков в зависимости от концентрации нефтепродуктов существенно отличается. Так, при минимальной концентрации в 0,1 ПДК можно наблюдать ряд последовательных ярких вспышек, зачастую накладывающихся друг на друга с максимальной амплитудой и пологим фронтом нарастания и спада, при этом более резкие вспышки большей амплитуды, быстро достигающие максимума и также быстро спадающие, наблюдаются при химической стимуляции (рис. 5). При увеличении концентрации до 1 ПДК наряду с изменением амплитудно-временных показателей свечения существенно изменяется и характер сигналов. Так, сигналы представляют собой 3–4 пика с крутым фронтом нарастания, и таким же фронтом затухания. Увеличение концентрации сырой нефти до 10 ПДК приводит к наименьшим по амплитуде и наиболее сглаженным биолюминесцентным сигналам. Вероятно, это связано с особенностями строения *B. ovata* (большим % соотношением ОВ), его более низкой проницаемостью клеточных мембран.

Токсические вещества оказывают ингибирующее воздействие не только на биолюминесцентные виды, но и процессы жизнедеятельности несветящихся

организмов (Саксонов и др., 2001; Tokarev et al., 2007). Ранее упоминалось, что белок в теле гребневика составляет 80% всего ОВ (Tokarev, Shulman, 2007), поэтому ингибирование свечения *M. leidyi* и *B. ovata* при воздействии нефтепродуктов можно объяснить в первую очередь, структурно-функциональными изменениями люциферин-люциферазного комплекса, имеющего белковую природу, так и возможным снижением метаболизма. Основная масса реакций гребневиков, в том числе и определяющих биолуминесценцию, относятся к числу ферментативных, что, видимо, и находит отражение в снижении контролируемых функций.

Нами показано различие в поведенческой реакции гребневиков в разных экспериментальных группах. Гребневики, содержащиеся при 0,1 ПДК, активно передвигались в течение всего времени экспозиции, аналогично контрольным организмам. Наблюдение за поведением *M. leidyi* и *B. ovata* показало, что ктенофоры, помещенные в токсикант с концентрацией 1 ПДК нефтепродуктов, сначала увеличивали свою двигательную активность, что фиксировалось по усиленному биению гребных пластинок, затем уменьшали, периодически оседая на дно. Особи, содержащиеся при максимальной концентрации в 10 ПДК, прекращали движение гребных пластинок и оседали на дно уже через 15 минут после экспозиции. Аналогичные исследования по изучению физического и токсического воздействия на водные организмы различных токсикантов проведены в работах (Воробьев и др., 2006; Иванов и др., 2006; Картамышева, Иванченко, 2018; Лозовой, 2012; Лукьяненко, Черкашин, 1987; Миронов, 2006; Миронов и др., 2018). При этом тяжесть эффекта обычно зависит от количества и типа разлитой нефти, условий окружающей среды и чувствительности затронутых организмов и их среды обитания к нефти и нефтепродуктам (Картамышева, Иванченко, 2018; Миронов, 2006). Вариабельность свечения гребневика при воздействии нефтепродуктов можно объяснить токсичностью нефти, приводящей к нарушению функционирования клеточных функций, что было выявлено ранее на других организмах в работах (Картамышева, Иванченко, 2018; Лозовой, 2012).

Так, Картамышевой с соавторами было показано, что под действием углеводов, растворённых в воде, происходит разрушение жабр некоторых рыб (при этом наблюдается нарушение водно-солевого обмена и процессов дыхания), происходит воздействие на нервно-мышечную систему, снижается чувствительность организмов к химически опасным веществам (Картамышева, Иванченко, 2018).

Возможно, в наших исследованиях воздействие токсиканта оказывает влияние на иннервацию гребневика и затрагивает систему гребных пластинок с фотоцитами, что приводит к существенным изменениям в биолуминесцентной системе в целом. Ответная реакция гребневиков при воздействии нефтепродуктов напоминает таковую при действии ряда тяжелых металлов на *M. leidyi* и *B. ovata*, особенно цинка (Токарев и др., 2016).

Полученные в данных экспериментальных исследованиях значения параметров биолуминесцентного сигнала требуют дальнейшего сопоставления с данными полевых экспедиционных работ в Черном море по изучению пространственного распределения светящихся гребневиков в районах с различным уровнем антропогенной нагрузки и различным уровнем концентрации нефтепродуктов. Для этой цели нужно провести сбор и исследование гребневиков в бухтах и открытом взморье Севастополя.

Таким образом, выявленная в результате экспериментов высокая чувствительность биолуминесценции гребневиков позволяет оценить лимитирующие уровни накопления нефтепродуктов и их аккумуляцию в теле гребневиков и является чрезвычайно важной задачей дальнейших исследований. Универсальность связи биолуминесценции организмов с их биоэнергетикой очевидна. Это свидетельствует в пользу того, что состояние систем энергообеспечения служит индикатором определённых стадий отслеживания гидробионтами уровня антропогенной нагрузки и

позволяет использовать амплитудно-временные характеристики биолюминесценции для целей биомониторинга.

Заключение

1. Воздействие нефтепродуктов приводит к изменению амплитудно-энергетических характеристик светоизлучения гребневигов *M. leidyi* и *B. ovata*.
2. Концентрация сырой нефти в 0,1 ПДК стимулирует биолюминесценцию гребневигов *M. leidyi* и *B. ovata* на протяжении 1-часовой экспозиции, а 10 ПДК – ингибирует её.
3. Параметры биолюминесценции гребневигов могут служить экспрессивным показателем их функционального состояния, степени их резистентности к воздействию нефтепродуктов и использоваться в качестве экспресс-индикатора экологического состояния морских планктонных сообществ.

Список литературы

1. Воробьев Д.С., Рясинцева Н.И., Савин П.Т. и др. Влияние нефти и нефтепродуктов на макрозообентос // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 3. – С 42–45.
2. Доценко С.А. Специфические черты гидрологического и гидрохимического режимов и уровень загрязнения прибрежной зоны моря в районе Одессы // Исследования шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна. – Севастополь: МГИ НАНУ, 1995. – С. 31–43.
3. Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 2007 г. / Под ред. А.Н. Коршенко, И.Г. Матвейчук, Т.И. Плотникова и др. // Обнинск: Артифлекс, 2009. – 160 с.
4. Иванов В.А., Показеев К.В., Совга Е.Е. Загрязнение Мирового океана // Учебное пособие. – Москва: МАКС Пресс, 2006. – 164 с.
5. Картамышева Е.С., Иванченко Д.С. Загрязнение мирового океана нефтью и нефтепродуктами // Молодой ученый. – 2018. – № 25. – С. 20-23.
6. Лозовой Д.В. Влияние нефтяных углеводородов на байкальские организмы в естественных и лабораторных условиях // Георесурсы. – 2012. – Т. 1, № 43. – С. 43–57.
7. Лукьяненко В.И., Черкашин С.А. Экспериментальное обоснование возможности использования реакции избегания гидробионтами токсикантов для биотестирования качества водной среды // Физиология и биохимия гидробионтов. – Ярославль: Гос. ун-т, 1987. – С. 48–57.
8. Миронов О.Г. Потоки нефтяных углеводородов через морские организмы // Морской экологический журнал. – 2006. – Т. 5, № 2. – С. 5–14.
9. Миронов О.Г., Алемов С.В., Щекатурина Т.Л. и др. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века // Симферополь: ИТ “Ариал”, 2018. – 276 с.
10. Перечень предельно допустимых концентраций и ориентировочно безопасных уровней воздействия вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоёмов / Под ред. С.Н. Анисова, С.А. Соколова, Т.В. Минева и др. // Москва: Мединор, 1995. – 221 с.
11. Руднева И.И., Скуратовская Е.Н., Дорохова И.И. и др. Биоиндикация экологического состояния морских акваторий с помощью биомаркёров рыб // Вод. ресурсы. – 2011. – Т. 38, № 1. – С. 92–98.

12. Саксонов М.Н., Балаян А.Э., Стом Д.И. Метод люминесцентной микроскопии в определении накопления нефтепродуктов эпишурой и биоиндикация загрязнения, // Водные ресурсы. – 2001. – № 6. – С. 752–755.
13. Стом Д.И., Гиль Т.А. Сравнительная токсикометрия органических и неорганических загрязнителей на веслоногих и ветвистоусых рачках // Доклады А.Н. – 1998. – № 1. – С. 140–142.
14. Токарев Ю.Н., Евстигнеев П.В., Машукова О.В. Планктонные биолуминесценты Мирового Океана: биоразнообразие, характеристики биолуминесценции в норме и при антропогенном воздействии // Н. Орианда, 2016. – 340 с.
15. Черкашин С.А., Никифоров М.В., Шелехов В.А. Использование показателей смертности предличинок морских рыб для оценки токсичности цинка и свинца // Биология моря. – 2004. – Т. 30, № 3. – С. 247 – 252.
16. Anninsky B.E., Finenko G.A., Abolmasova G.I. et al. Effect of starvation on the biochemical compositions and respiration rates of ctenophores *Mnemiopsis leidyi* and *Beroe ovata* in the Black Sea // J. Mar. Biol. Assoc. U.K. – 2005. – Vol. 85, № 3. – P. 549–561.
17. Clarke A., Holmes L.J., Gore D.J. Proximate and elemental composition of gelatinous zooplankton from the Southern Ocean // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. – 1992. – Vol. 155. – P. 55 – 68.
18. Heimann K., Matuszewski J.M., Klerks L.P. Effects of metals and organic contaminants on the recovery of bioluminescence in the marine dinoflagellate *Pyrocystis lunula* (Dinophyceae) // J. Phycol. – 2002. – Vol. 38. – P. 482–492.
19. Tokarev Yu.N., Evstigneev P.V., Mashukova O.V. et al. Bioluminescence of plankton organisms as an index of the neritic aquatoria pollution // Proceedings of the Eighth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment “MEDCOAST 07” (Alexandria, 2007). – Ankara, Turkey: Middle East Technical University. – 2007. – Vol. 2. – P. 925–936.
20. Tokarev Yu., Shulman G. Biodiversity in the Black Sea: effects of climate and anthropogenic factors // Hydrobiologia. – 2007. – Vol. 580, N 1. – P. 23–33.

**COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF THE IMPACT OF OIL PRODUCTS ON
THE BIOLUMINESCENCE OF THE BLACK SEA INVASIVE CTENOPHORES
MNEMIOPSIS LEIDYI A.GASSIZ, 1865 AND BEROE OVATA MAYER, 1912
Mashukova O.V., Silakov M.I.**

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: olgamashukova@yandex.ru

Understanding various aspects of the functional relationships between aquatic organisms and the environment providing their growth, reproduction, population biodiversity and distribution in the World Ocean with the most diverse ecological conditions, in particular in terms of anthropogenic pressure, is the most important direction of modern hydro-ecology. One of the ways to preserve biodiversity is to increase the resistance of the species, which is possible only by studying various aspects of its adaptation to anthropogenic impact. Therefore, one of the important tasks of our study was to assess the possibility of implementation of the bioluminescence characteristics of the Black Sea invasive ctenophores on the example of studying the impact of oil products on their glow with the purpose of environmental monitoring.

Sampling was carried out from the water surface in the Sevastopol bays of the Black Sea. The bioluminescent signals of ctenophores were recorded by an instrumental and laboratory complex Svet. The research results showed the variability of the amplitude-time characteristics of the bioluminescence of the ctenophores *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 and *Beroe ovata* Mayer, 1912 depending on the concentration of oil products. The intensity and energy of the ctenophores luminescence decrease when the concentration of the active oil product increases. The stimulating

effect is observed at the concentration of 0.1 MPC of crude oil, which is expressed in an increase in the intensity of the ctenophores luminescence. Inhibition of bioluminescence of *M. leidyi* and *B. ovata* is maximum at 10 MPC of the oil product. The finding of the experiments revealed high sensitivity of the ctenophore bioluminescence to the effects of oil products, which allows them to be used as bioindicators of this type of toxicant.

Key words bioluminescence characteristics; crude oil; ctenophores; the Black Sea

Машукова Ольга Владимировна Кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела биофизической экологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: olgamashukova@yandex.ru

Силаков Михаил Иванович Младший научный сотрудник отдела биофизической экологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: ilmihvokalis@mail.ru

Поступила в редакцию 09.09.2020 г.