

УДК: 574.625

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УФ ОБЛУЧЕНИЯ ОДНОКЛЕТОЧНЫХ ОРГАНИЗМОВ, ПЕРЕНОСИМЫХ С БАЛЛАСТНЫМИ ВОДАМИ СУДОВ

© 2017 Фоканов В.П.^{a*}, Гаврилова О.В.^{b**}, Шалларь А.В.^a

^a ООО «НПО ЭНТ», г. Санкт-Петербург, 199106;

^b Биологический факультет СПбГУ, г. Санкт-Петербург, 199177;

e-mail: * fokanov@mail.ru; ** avanti1958@inbox.ru

Поступила в редакцию 01.02.17

Для предотвращения внесения чужеродных организмов в местные водные экосистемы с балластными водами (БВ) судов исследовали технологию обезвреживания морской воды от одноклеточных организмов с помощью ультрафиолетового излучения (УФ). Проведены эксперименты по воздействию излучений ртутных дуговых ламп низкого давления (ЛНД) и среднего давления (ЛСД) на одноклеточные зелёные водоросли: галофильную водоросль *Dunaliella terricola* и эвригалинную водоросль *Asteromonas gracilis*, а также на солеустойчивую бактерию *Nocardia* sp. Определены дозы УФ облучения для десятикратного снижения количества подвижных клеток водорослей и колониеобразующих единиц бактерии. На примере изученных представителей фитопланктона впервые обнаружены различия в характере поражений облучением ЛНД и ЛСД. Установлено, что при облучении ЛСД, в отличие от ЛНД, в инактивации микроорганизмов участвуют, кроме поперечных сшивок азотистых оснований ДНК, и другие механизмы.

Ключевые слова: обезвреживание балластной воды, УФ облучение, ртутные дуговые лампы низкого и среднего давления, *Dunaliella terricola*, *Asteromonas gracilis*, *Nocardia* sp.

Введение

Слив балластных вод (БВ) судов, не обезвреженных от морских организмов, представляет экологическую угрозу внесения чужеродных видов, которые могут серьёзно нарушить местные экосистемы [Звягинцев, Селифонова; 2008, Звягинцев, 2009; Хорошев и др., 2016]. Основным документом, регламентирующим сброс водяного балласта, является Международная конвенция (МК) по контролю и управлению судовыми БВ и осадками, принятая Международной морской организацией в 2004 г. [Международная конвенция..., 2005]. Россия присоединилась к МК, что предполагает обязательное внедрение на судах систем обезвреживания БВ. Согласно требованиям МК, препятствовать распространению чужеродных микроорганизмов с судовыми БВ методом замены балласта вдали от берега.

Российский морской регистр судоходства предъявляет определённые требования к обеззараживанию балластных вод и к испытательным установкам. Обеззараживание воды УФ излучением в настоящее время – одна из наиболее распространённых технологий, получившая широкое промышленное внедрение во всём мире. Под воздействием УФ облучения происходит прекращение деления клеток вследствие блокирования считывания информации в результате образования поперечных сшивок азотистых оснований ДНК.

При применении технологии обезвреживания БВ УФ излучением (оборудование Hyde Marine Inc., Optimarin As, Ecoballast) заполнение балластных танков судов производится через фильтры с размером пор не более 50 мкм, которые задерживают многоклеточные морские организмы, обезвреживание БВ от одноклеточных организмов, бактерий, вирусов,

микроводорослей – УФ излучением. При де-балластировке – только УФ излучением.

Для УФ обезвреживания БВ применяется излучение бактерицидных ультрафиолетовых (УФ) дуговых ламп низкого давления (ЛНД) и среднего давления (ЛСД) [Конев, Волоотовский, 1979; Kalisvaart, 2001; Schalk et al., 2006; Кармазинов и др., 2012].

В работах [Kalisvaart, 2001; Guo et al., 2009] обсуждаются достоинства и недостатки применения ЛНД и ЛСД для дезинфекции воды различного назначения: сточной, плавательных бассейнов и др., на примере санитарно-показательных бактерий, таких как кишечная палочка *Escherichia coli*. На рисунке 1 представлены в относительных единицах спектры излучения этих ламп. Бактерицидный спектр ЛНД представлен резонансной линией ртути 253.8 нм. Представляет интерес возможность выяснить, как влияют различия в спектрах излучения ЛНД и ЛСД на эффективность обезвреживания БВ от некоторых морских одноклеточных организмов.

Цель настоящей работы – изучить эффективность обезвреживания БВ от морских одноклеточных организмов методом УФ облучения.

Материалы и методы

Определение величины D_{90} , дозы УФ облучения для 90% эффективной элиминации организмов, проводилось по стандартной модели [Конев, Волоотовский, 1979]:

$$N = N_0 \cdot 10^{-k \cdot D}; \lg\left(\frac{N_0}{N}\right) = k \cdot D;$$

где: N_0 – начальная концентрация живых клеток, N – концентрация живых клеток после облучения, k – постоянная для данного микроорганизма, D – доза бактерицидного облучения, мДж/см².

При $k = \frac{1}{D_{90}}$ получаем формулу для определения дозы по результатам эксперимента:

$$D_{90} = \frac{D}{\lg\left(\frac{N_0}{N}\right)}.$$

Эксперимент состоял в облучении излучением ЛНД или ЛСД чашек Петри с суспензией, содержащей тест-объекты – живые клетки микроорганизмов, и оценке уменьшения числа живых клеток в зависимости от дозы УФ облучения D .

Доза УФ облучения D – это произведение облучённости в единицах мВт/см² и времени облучения в секундах. При одинаковой облу-

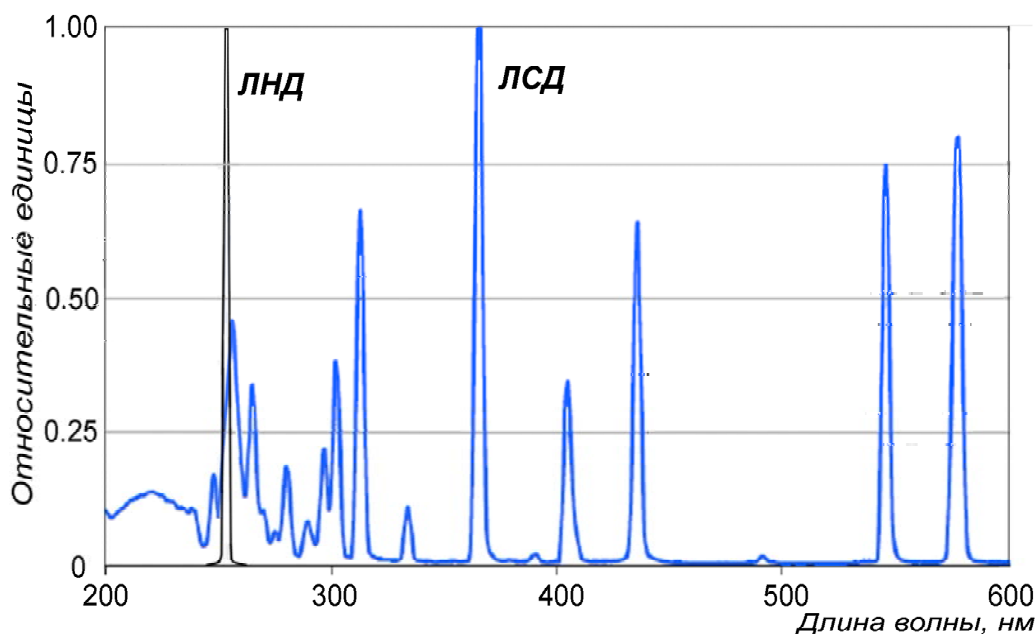


Рис. 1. Спектры излучения ЛНД (чёрная линия) и ЛСД (синяя линия).

ченности доза УФ облучения пропорциональна времени облучения.

В эксперименте участвовали пластиковые чашки Петри диаметром 50 мм и 90 мм с суспензией тест-объектов в искусственной морской воде: «контроль» (без облучения) и чашки с суспензией, облучаемые в течение разного интервала времени, то есть получившие различную дозу УФ облучения D.

УФ мощность ламп измерялась радиометром ТКА (далее, радиометр), в спектральном диапазоне УФ-С радиометра, с последующим расчётом по формуле Кейтца [Bolton, Linden, 2003].

В ЛНД эксперименте лампой LTC 55W/2G11 (LightTech, Венгрия) облучали пять чашек Петри с суспензией тест-объектов, в ЛСД эксперименте лампа DQ3024 (Heraeus, Германия) облучала две чашки Петри с суспензией тест-объектов, облучённость которых также измерялась и контролировалась радиометром в режиме УФ-С.

Для определения значения величины D использовалось среднее значение УФ облучённости чашек Петри. Расчёт значения УФ облучённости чашек Петри на диаметре чашки, параллельном оси лампы, в соответствии с

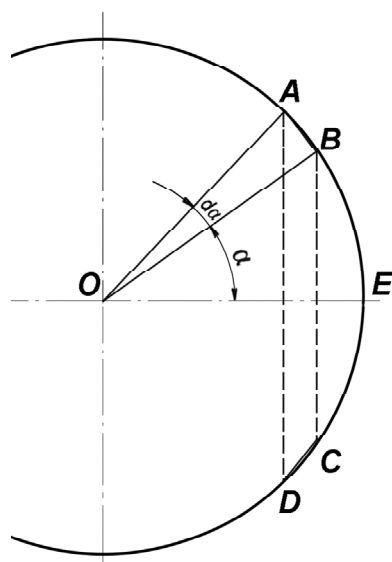


Рис. 2. Фрагмент чашки Петри для пояснения формулы весовой функции.

рекомендациями [Bolton, Linden, 2003], проводился с учётом четырёх поправок: на коэффициент поглощения воды, на отражение излучения от границы воздуха с суспензией, на расходимость падающего на суспензию излучения. Четвёртая поправка, «коэффициент Петри» – отношение средней по площади чашки Петри облучённости к облучённости в центре чашки. Результат расчёта УФ облучённости вдоль диаметра чашки Петри, параллельного оси лампы (рис. 5Б), представляет собой функцию.

Среднее по площади чашки Петри значение УФ облучённости рассчитано с применением весовой функции, учитывающей относительный вклад УФ облучённости элементов чашки Петри.

На рисунке 2 представлен фрагмент поверхности чашки Петри, отрезок диаметра OE – параллелен оси лампы. Для вывода формулы весовой функции площадь чашки Петри поделена на элементы dS, имеющие форму трапеции ABCD, основания которой AD, BC ориентированы перпендикулярно оси лампы.

Весовая функция определяется формулой:

$$\frac{dS}{\pi \cdot r^2} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \sin^2 \alpha d\alpha,$$

где r – диаметр чашки Петри, α – половина центрального угла чашки Петри, опирающегося на хорду BC.

В качестве тест-объектов использовались солеустойчивые микроорганизмы: эукариотическая галофильная водоросль *Dunaliella terricola* Massyuk 1973 (Chlorophyceae; Chlamydomonadales) штамм CALU1006 (рис. 3А); эукариотическая эвригалинная водоросль *Asteromonas gracilis* Artari 1913 (Chlorophyceae; Chlamydomonadales) штамм CALU1373 (рис. 3Б); солеустойчивая коринеформная бактерия *Nocardia* sp. (Actinobacteria; Actinomycetales) (рис. 3В).

Тест-объекты выращивали в течение двух недель в колбах объёмом 250 мл в искусственно приготовленной морской воде. Для эксперимента содержимое колб десятикратно разводили в морской воде и разливали в стерильные чашки Петри с толщиной слоя, равной 1 мм.

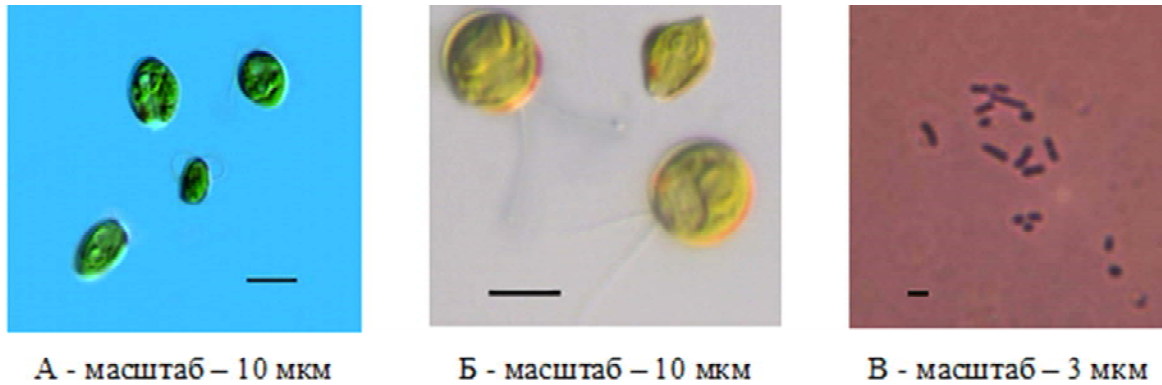


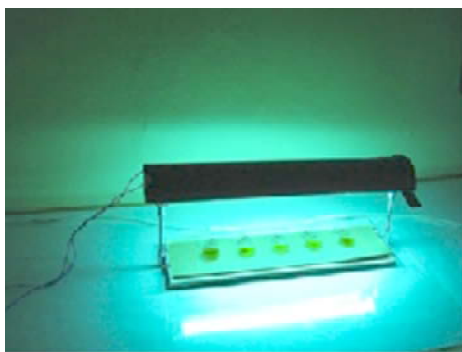
Рис. 3. Тест-объекты: А – *Dunaliella terricola* CALU1006, прижизненный препарат, дифференциционно-интерференционный контраст, масштабная линейка 10 мкм; Б – *Asteromonas gracilis* CALU1373, прижизненный препарат, дифференциционно-интерференционный контраст, масштабная линейка 10 мкм; В – *Nocardia* sp., окраска генциан-виолетом, масштабная линейка 3 мкм.

Результат для каждого времени УФ облучения получали по пяти чашкам Петри. После УФ облучения содержимое пяти чашек Петри помещали в одну ёмкость, которую инкубировали в темноте при комнатной температуре двое суток. Оценка состояния фитопланктона проводилась прямым подсчётом клеток, подвижных и неподвижных, в камерах Горяева – надёжным методом определения степени воздействия внешних факторов на представителей фитопланктона [Балаян, Стом, 1988; Масюк и др., 2007]. Для *Nocardia* sp. было сделано по три эксперимента для каждого времени облучения с пятью чашками. Оценку состояния бактерий проводили после высева суспензии на поверхность плотной (1.5% агара) среды подсчётом числа колониеобразующих единиц (КОЕ). Число КОЕ определялось на пятые сутки инкубации чашек в темноте, при 36 °С.

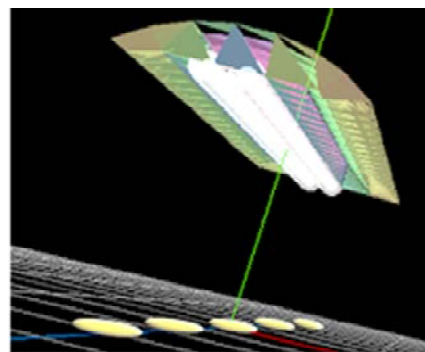
Результаты и обсуждение

ЛНД эксперимент. Экспериментальная установка показана на рисунке 4А. Однородность облучения обеспечивалась U-образной формой лампы с цилиндрическим отражателем. Пять чашек Петри диаметром 5 см с суспензией тест-объекта (рис. 4А), сначала были закрыты пластиной. Облучение начинали после выхода лампы на стационарный режим работы. Начало облучения – удаление экрана вручную, конец облучения – выключение лампы. Время облучения измеряли секундомером.

Были проведены измерения радиометром облучённости в месте расположения центра каждой чашки Петри. Среднее значение УФ облучённости чашек Петри от ЛНД было рассчитано с помощью 3D модели (рис. 4Б). Для учёта отражённой от поверхности отражателя составляющей, его поверхность была раз-



А



Б

Рис. 4. ЛНД эксперимент: А – установка; Б – 3D модель для расчёта средней облучённости на чашках Петри.

Таблица 1. Значения УФ облученности чашек Петри в ЛНД эксперименте

| Положение чашки Петри | УФ облученность, Вт/м ² | | |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| | результат измерения радиометром | результат расчёта в центре чашки | результат усреднения по площади чашки |
| Центральная | 55.0 | 65.7 | 65.6 |
| Средняя (две) | 51.5 | 62.8 | 61.3 |
| Крайняя (две) | 48.0 | 54.2 | 48.9 |
| Среднее значение | 50.7 | 59.9 | 57.2 |

бита на 100 000 треугольников и значение УФ облучённости от центра каждого треугольника рассчитывалась с использованием MSSS (multiple segment source summation) приближения [Liu D., 2004]. Результаты измерений и расчётов приведены в таблице 1.

С учётом малой величины угла поля зрения радиометра (20°), для определения дозы D₉₀ были выбраны расчётные значение УФ-С облучённости чашек Петри. Среднее значение облучённости чашек Петри от ЛНД, с учётом четырёх поправок, равно $5.72 \times 0.97 \times 0.975 \times 0.955 = 5.06$ мВт/см².

Отношения концентрации живых (подвижных) клеток после ЛНД облучения к концентрации клеток «без облучения» *A. gracilis* и *D. terricola*, полученные в эксперименте, приведены в таблице 2. Результаты эксперимента с

ЛНД облучением бактерии приведены в таблице 3.

Представленное в таблице 3 значение дозы D₉₀=(15±4) мДж/см² совпало со значением (15÷20) мДж/см² [Masschelein, Rice, 2002], измеренным для той же бактерии в соответствии с рекомендациями [Bolton, Linden, 2003].

ЛСД эксперимент

Экспериментальная установка показана на рисунке 5А. Две чашки Петри диаметром 9 см с суспензией тест-объекта, сначала были закрыты пластиной. Облучение начинали после выхода лампы на стационарный режим работы. Начало облучения – удаление пластины вручную, конец облучения – выключение лампы. Время облучения измеряли секундомером.

Таблица 2. Результаты ЛНД эксперимента для микроводорослей

| Фито-планктон | Параметр | Время УФ облучения, с / доза D, мДж/см ² | | | |
|---|--|---|--------|--------|---------|
| | | 20/100 | 40/200 | 80/400 | 160/800 |
| <i>Dunaliella terricola</i> CALU1006 | N/N ₀ | 0.133 | 0.005 | 0.0016 | – |
| | D ₉₀ , мДж/см ² | 114 | 87 | 143 | – |
| | D ₉₀ среднее, мДж/см ² | 115 ± 28 | | | |
| <i>Asteromonas gracilis</i> CALU1373 | N/N ₀ | – | 0.218 | 0.025 | 0.012 |
| | D ₉₀ , мДж/см ² | – | 303 | 250 | 416 |
| | D ₉₀ среднее, мДж/см ² | 323 ± 68 | | | |

Таблица 3. Результаты ЛНД эксперимента для бактерии *Nocardia* sp.

| <i>Nocardia</i> sp. | Время УФ облучения, с / доза D, мДж/см ² | | | | |
|--|---|--------|--------|--------|--------|
| | 0/0 безУФ | 10/50 | 20/100 | 40/200 | 80/400 |
| Среднее, КОЕ×10 ³ /мл | 199 ± 47 | 10 ± 7 | 3 ± 3 | 0 | 0 |
| D ₉₀ , мДж/см ² | – | 11.6 | 17.2 | – | – |
| D ₉₀ среднее, мДж/см ² | 15 ± 4 | | | | |

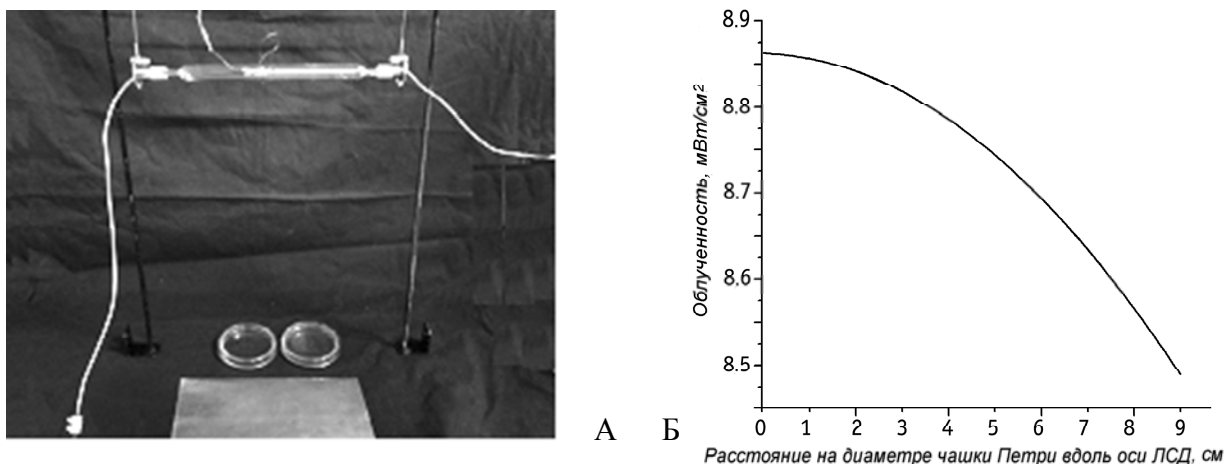


Рис. 5. ЛСД эксперимент: А – установка; Б – результат расчёта распределения облучённости на чашках Петри вдоль оси ЛСД.

Мощность излучения ЛСД DQ3024 измерена радиометром с последующим расчётом по формуле Кейтца [Bolton, Linden, 2003].

По результатам наших измерений радиометром в спектральном диапазоне (230–280) нм мощность излучения лампы ЛСД равна 247 Вт, а измеренное фирмой Heraeus значение мощности ЛСД в диапазоне (200–280) нм равнялось 370 Вт.

Для согласования результатов этих измерений, спектр ЛСД (Strahler DQ302) был оцифрован и проинтегрирован в спектральном диапазоне (200–280) нм, в шкале см^{-1} . Отношение измеренных мощностей $370/247 = 1.50$ сопоставимо с отношением площадей соответствующих участков спектра ЛСД, равным 1.52. Следовательно, измерение мощности ЛСД в спектральном диапазоне (230–280) нм радиометром нами выполнено корректно и его можно использовать для расчёта облучённости чашек Петри.

Расчёты облучённости чашек Петри [Ke, Bolton, 2011] показали, что значение облучён-

ности в центре чашек Петри равно 8.8 мВт/см^2 . Поле облучения чашек Петри диаметром 9 см неоднородно (рис. 5Б). Поправки на поглощение излучения суспензией и на отражение от её поверхности равны 0.97 и 0.975, соответственно. Поправка, учитывающая расходимость падающего излучения ЛСД, как и для ЛНД, составляет 0.98. Рассчитанное среднее значение облучённости в области спектра (230–280) нм от ЛСД на поверхности каждой из двух чашек Петри равно 8.9 мВт/см^2 . Следовательно, «коэффициент Петри» для эксперимента ЛСД составляет 0.99. Среднее значение облучённости чашек Петри от ЛСД в области спектра (230–280) нм, с учётом поправок, равно $8.9 \times 0.97 \times 0.98 \times 0.975 \times 0.99 = 8.17 \text{ мВт/см}^2$.

Доза D_{90} для микроводорослей в эксперименте с ЛСД является произведением 8.17 мВт/см^2 и времени облучения в секундах. Результаты эксперимента по облучению ЛСД тест-объектов представлены в таблице 4. В таблице 5 представлены результаты определения дозы D_{90} в ЛНД и ЛСД экспериментах.

Таблица 4. Результаты ЛСД эксперимента

| Фитопланктон | Параметр | Время УФ облучения, с / доза D, мДж/см ² | | | |
|---|--|---|-------|--------|--------|
| | | 5/41 | 10/82 | 20/164 | 40/328 |
| <i>Dunaliella terricola</i> CALU1006 | N/N ₀ | 0.47 | 0.28 | 0 | 0 |
| | D ₉₀ , мДж/см ² | 125 | 148 | – | – |
| | D ₉₀ среднее, мДж/см ² | 135 ± 12 | | | |
| <i>Asteromonas gracilis</i> CALU1373 | N/N ₀ | 0.78 | 0.55 | 0 | 0 |
| | D ₉₀ , мДж/см ² | 379 | 315 | – | – |
| | D ₉₀ среднее, мДж/см ² | 347 ± 32 | | | |

Таблица 5. Результаты определения дозы бактерицидного излучения D_{90}

| Тест-объекты | D_{90} , мДж/см ² | |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| | при облучении ЛНД | при облучении ЛСД |
| <i>Dunaliella terricola</i> CALU1006 | 115 ± 28 | 135 ± 12 |
| <i>Asteromonas gracilis</i> CALU1373 | 323 ± 68 | 347 ± 32 |
| <i>Nocardia</i> sp. | 15±4 | – |

Полученные результаты (табл. 5) показывают одинаковую, в пределах погрешности измерений, эффективность D_{90} поражения одноклеточных водорослей *A. gracilis* и *D. terricola* излучением ламп ЛНД и ЛСД, несмотря на различие их спектральных характеристик (рис. 1). Такой же результат опубликован [Masschelein, Rice, 2002] и для других видов микроорганизмов.

Напрашивается вывод, что оба типа облучателей обеспечивают одинаковый механизм поражения [Конев, Волотовский, 1979], а именно – блокировку считывания информации в результате поперечных сшивок спиралей ДНК.

Рассмотрим зависимость эффекта повреждения ДНК от спектра облучения. На рисунке 6 показаны спектр поглощения ДНК (1) [McCarty et al., 2003] и спектр излучения ЛСД (2) в спектральной области (230–280) нм. Излучение ЛНД в спектральном интервале (230–280) нм полностью (100%) поглощается ДНК,

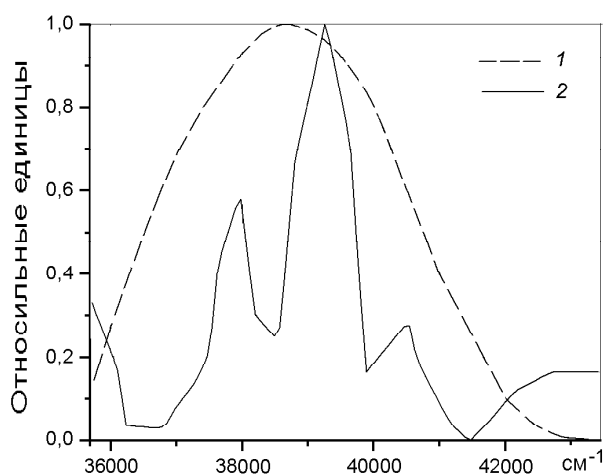


Рис. 6. Нормализованные спектры ДНК и ЛСД в спектральной области (230–280) нм: 1 – спектр поглощения ДНК, 2 – спектр излучения ЛСД.

поскольку спектр её излучения представляет собой линию 253.7 нм. Доля поглощённого ДНК излучения ЛСД составляет 70% (отношение интеграла от произведения функций на рисунке 6 к интегралу от спектра ЛСД).

Только часть спектра ЛСД в области спектра поглощения ДНК ответственна за D_{90} , вызывающую десятикратное снижение подвижности живых клеток. Поэтому равенство, в пределах погрешности измерений, значений D_{90} при облучении ЛСД и ЛНД для фитопланктона можно связать с гибелью клеток из-за деструкции белков при длинах волн больше 280 нм и с повреждениями клеточных мембран при длинах волн меньше 220 нм, то есть излучением ЛСД вне спектра поглощения ДНК [Конев, Волотовский, 1979].

Выводы

Впервые показано влияние спектрального состава излучений ЛНД и ЛСД на эффективность элиминации морских одноклеточных организмов – микроводорослей *Dunaliella terricola* и *Asteromonas gracilis*.

Представленные результаты измерения доз D_{90} при облучении ЛНД и ЛСД для эффективности поражения организмов равной 90% (для снижения концентрации указанных тест-объектов в 10 раз) находятся в пределах диапазона опубликованных данных для фитопланктона [Chevrefils, Caron, 2006]. Величина дозы $D_{90} = (15 \pm 4)$ мДж/см² для солеустойчивой бактерии *Nocardia* sp. при облучении ЛНД близка к значениям $(15 \div 20)$ мДж/см² [Masschelein, Rice, 2002], измеренным для той же бактерии в соответствии с рекомендациями [Bolton, Linden, 2003]. Эта бактерия относится к наиболее устойчивым к УФ облучению представителям бактерий. По данным [Chevrefils,

Caron, 2006] ещё только два вида *Halobacterium salinarum* и *Klebsiella pneumonia* имеют сравнимую устойчивость к облучению ЛНД, $D_{90} = 12$ мДж/см².

Эксперимент показал, что эффективность элиминации организмов морского фитопланктона излучением ЛНД и ЛСД примерно одинакова. При обработке излучением ЛСД около 70% излучения ЛСД в диапазоне (230–280) нм ответственно за поперечные сшивки оснований ДНК. Оставшиеся 30% излучения, вероятно, определяют белковые механизмы поражения, которые не подвержены механизму фоторепарации поперечных сшивок ДНК.

Понятие «доза» облучения ЛСД, с учётом всего спектра излучения (200–600) нм, вызывающего тот или иной эффект для разных микроорганизмов, не годится как критерий для сравнения эффективности дезактивации облучением ЛСД и ЛНД. Для этой цели, как вариант, можно использовать количество затрачиваемой электрической энергии для одинаковой бактерицидной эффективности.

Благодарности

Авторы благодарят А.В. Фоканова и Л.В. Зябрикову за помощь в выполнении эксперимента и оформлении результатов, М.В. Фоканова за модельные расчёты. Тест-объекты получены из коллекции живых культур микроорганизмов ресурсного центра «Культивирование микроорганизмов» научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Литература

- Балаян А.Э., Стом Д.И. Метод биотестирования по бездвижению клеток водоросли дюналиеллы // Методы биотестирования вод. Черноголовка, 1988. С. 21–23.
- Звягинцев А.Ю. Организация мониторинга балластных вод и морских биоинвазий в дальневосточных морях России // Вестник ДВО РАН. 2009. № 3. С. 32–39.
- Звягинцев А.Ю., Селифонова Ж.П. Исследования балластных вод коммерческих судов в морских портах России // Российский журнал биологических инвазий. 2008. № 2. С. 22–33.
- Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В. и др. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: Коллективная монография / Под ред. Ф.В. Кармазинова, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцева, С.В. Храменкова. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. 392 с.
- Конев С.В., Волотовский И.Д. Фотобиология. 2-е изд. Минск: Издательство БГУ, 1979. 385 с.
- Масюк Н.П., Посудин Ю.И., Лилицкая Г.Г. Фотодвижение клеток *Dunaliella* Teod. (Dunaliellales, Chlorophyceae, Viridiplantae). Киев; Пушино: Электронное изд-во «Аналитическая микроскопия», 2007. 264 с.
- Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года. СПб.: ЦНИИМФ, 2005. 120 с.
- Хорошев В.Г., Герасимов А.В. и др. Создание опытного образца системы управления балластными водами // Научно-технический сборник РМРС. 2016. № 44/45. С. 8–13.
- Bolton J.R., Linden K.G. Standardization of Methods for Fluency UV Dose Determination in Bench-Scale UV Experiments // J. Environmental Engineering. 2003. 129(3). P. 209–216.
- Chevrefils G., Caron É. UV Dose Required to Achieve Incremental Log Inactivation of Bacteria, Protozoa and Viruses // IUVA News. 2006. 8(1). P. 38–45.
- Guo M., Hu H., Bolton J.R., Gamal El-Din M. Comparison of low- and medium pressure ultraviolet lamps: Photoreactivation of *Escherichia coli* and total coliforms in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants // Water Res. M., 2009. 43(3). P. 815–821.
- Kalisvaart B.F. Photobiological effects of polychromatic medium pressure UV lamps // Water Science & Technology. 2001. 43(4). P. 191–197.
- Ke Q.S., Bolton J.R. Ultraviolet Lamp Efficiencies: Modern Derivation of the Keitz Formula and Other Efficiency Issues // 2-nd North American Conference on Ozone, Ultraviolet and Advanced Oxidation Technologies. 2011. Session 12. P. 624–627
- Liu D. Numerical simulation of UV disinfection reactors: impact of fluency rate distribution and turbulence modeling // Master's Thesis. North Carolina State University, 2004.
- Masschelein W.J., Rice R.G. Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation. CRC Press Company Boca Raton London New York Washington: LEWIS PUBLISHERS, D.C., ISBN 1-56670-603-3. 2002.
- McCratyR., and others. Modulation of DNA conformation by heart-focused intention. HeartMath Research Center, Institute of HeartMath, 2003, Publication No. 03-008. Boulder Creek, CA.
- Schalk S., Volker A., Erich A., Brieden K., Voronov A., Witzke H. UV-Lamps for Disinfection and Advanced Oxidation – Lamp Types Technologies and Applications // IUVA News. 2006. Vol. 8(1). P. 32–37.

STUDY OF EFFECTIVENESS OF UV IRRADIATION OF SINGLE-CELLULAR ORGANISMS TRANSPORTED WITH BALLAST WATERS OF SHIPS

© 2017 Fokanov V.P.^a*, Gavrilova O.V.^b***, Shallar A.V.^a

^aООО “NPO ENT”, Saint-Petersburg, 199106;

^bBiological Faculty, Saint- Petersburg State University, Saint-Petersburg

e-mail: * fokanov@mail.ru; *** avanti1958@inbox.ru

To prevent the introduction of alien organisms into local ecosystems with ships' ballast water, the technology of decontamination sea water from unicellular organisms with the help of ultraviolet radiation (UV) was investigated. Experiments were carried out on the effects of irradiation of low-pressure (LP) and medium pressure (MP) mercury arc lamps on green unicellular algae: the halophytic alga *Dunaliella terricola*, the euryhaline alga *Asteromonas gracilis* and the salt tolerant bacterium *Nocardia* sp. Doses of UV irradiation have been determined for a tenfold decrease in the number of mobile algal cells and colonies of the forming units of the bacterium. By the example of the phytoplankton studied, differences in the character of lesions with irradiation of LP and MP were found for the first time. It was established that in MP irradiation, in contrast to LP, besides cross-linking of DNA bases, other effects are involved in the inactivation of microorganisms.

Keywords: decontamination of ballast water, mercury arc lamps of low and medium pressure, phytoplankton, UV dosage, CFU, *Dunaliella terricola*, *Asteromonas gracilis*, *Nocardia* sp.