

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-68-79

УДК 535.349; 57.022

Влияние продуктов вакуумного ультрафиолетового фотолиза воды на выживаемость микроорганизмов

Галина Николаевна Зверева¹✉, Ирина Юрьевна Кирцидели²¹Санкт-Петербургский университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия²Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия¹ybr.ybr.90@inbox.ru <https://orcid.org/0000-0003-1322-1438>²microfungi@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7232-996X>

Аннотация

Предмет исследования. Исследовался непрямой механизм воздействия вакуумного ультрафиолетового излучения на выживаемость микроорганизмов. **Цель работы.** Целью настоящей работы было определение роли реактивных радикалов в инактивации спор при разложении внутриклеточной и внеклеточной воды под действием вакуумного ультрафиолетового излучения. Сравнение воздействия реактивных продуктов вакуумного ультрафиолетового ($\Delta\lambda = 166\text{--}182\text{ нм}$) фотолиза воды, действующих извне и изнутри биологической клетки, на выживаемость микроорганизмов. Определение степени изменения спектра вакуумного ультрафиолетового излучения при прохождении слоёв воды микронной толщины и нахождение концентраций образующихся продуктов фотолиза. **Метод.** В процессе исследований проводилось облучение вакуумным ультрафиолетовым излучением ксеноновых эксимерных ламп микроскопических грибов *Rhodotorula colostri* (сухих и покрытых слоем воды). Спектральный состав вакуумного ультрафиолетового излучения и его изменение при прохождении слоёв воды находился экспериментальным и расчётным путём. Концентрация продуктов фотолиза воды определялась путём численного моделирования. Выживаемость микроорганизмов оценивалась методом подсчёта колоний, влияние реактивных продуктов фотолиза внутриклеточной воды — посредством добавления в питательную среду антиоксидантов. **Основные результаты.** При облучении через слой воды вероятность выживания микроорганизмов увеличивалась в среднем на 60% у спор, не содержащих антиоксиданты, и на 40% у спор с антиоксидантами по сравнению с сухими спорами. Данное увеличение может быть объяснено снижением фотохимической активности излучения из-за поглощения коротковолновой части спектра излучения и менее эффективным воздействием реактивных продуктов фотолиза снаружи, чем изнутри. Показано, что при прохождении слоёв воды, толщиной $d > 1\text{ мкм}$, происходит практически полное поглощение коротковолновой части спектра излучения $\lambda < 170\text{ нм}$ полосы излучения эксимеров ксенона. Найдено, что основными реактивными продуктами вакуумного ультрафиолетового фотолиза воды являются H_2O_2 , $\text{HO}_2^\cdot$, $\cdot\text{OH}$ с концентрациями порядка 10^{14} см^{-3} . **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты могут найти применение в технологиях дезинфекции с использованием коротковолнового ультрафиолетового излучения и при решении задач космической биологии.

Ключевые слова: вакуумное ультрафиолетовое излучение, фотолиз воды, микроскопические грибы, реактивные формы кислорода, радикал $\cdot\text{OH}$, ДНК, астробиология

Благодарность: авторы благодарны ГОИ им. С.И. Вавилова за возможность использования спектральной аппаратуры и облучателей вакуумного ультрафиолетового диапазона. Биологическая часть работы выполнялась в рамках государственного задания согласно тематическому

плану Ботанического института им. В.Л. Комарова по теме № АААА-А19-119020890079-6. Часть работы выполнена на оборудовании ЦКП «Клеточные и молекулярные технологии изучения растений и грибов» Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН.

Ссылка для цитирования: Зверева Г.Н., Киртсидели И.Ю. Влияние продуктов вакуумного ультрафиолетового фотолиза воды на выживаемость микроорганизмов // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 68–79. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-68-79>

Коды OCIS: 260.5130; 260.7210; 170.1420.

The effect of the products of vacuum ultraviolet photolysis of water on the survival of microorganisms

GALINA N. ZVEREVA¹✉, IRINA Y. KIRTSIDELI²

¹State University of Civil Aviation, Saint-Petersburg, Russia

²Komarov Botanical institute RAS, Saint-Petersburg, Russia

¹ybr.ybr.90@inbox.ru <https://orcid.org/0000-0003-1322-1438>

²microfungi@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7232-996X>

Abstract

Subject of study. The indirect mechanism of the effect of vacuum ultraviolet radiation on the survival of microorganisms was studied. **Aim of study.** Comparison of the effectiveness of the impact of reactive products of vacuum ultraviolet ($\Delta\lambda = 166\text{--}182\text{ nm}$) photolysis of water, acting from outside and inside the biological cell. Determining the degree of change in the spectrum of vacuum ultraviolet radiation when passing micron-thick layers of water and finding the concentrations of photolysis products formed during this process. **Method.** During the research, microscopic fungi *Rhodotorula colostri* (dry and covered with a water layer) were irradiated with vacuum ultraviolet irradiation of xenon excimer lamps. The spectral composition of vacuum ultraviolet radiation and its change during the passage of water layers was found experimentally and by calculation. The concentration of water photolysis products was determined by numerical simulation. The survival of microorganisms was assessed by colony counting, influence of reactive products of photolysis of intracellular water was assessed by adding antioxidants to the nutrient medium. **Main results.** When irradiated through a layer of water, the survival probability of microorganisms increased by an average of 60% in the case of spores not containing antioxidants and by 40% in the case of spores with antioxidants compared to dry spores. This increase can be explained by a decrease in the photochemical activity of radiation due to the absorption of the short-wavelength part of spectrum and a less effect of reactive photolysis products from outside than from inside. It is shown, that when passing through a water layer with a thickness $d > 1\text{ }\mu\text{m}$, the short-wavelength wing $\lambda < 170\text{ nm}$ of the xenon excimers emission band is absorbed. It was found that the main reactive products of vacuum ultraviolet photolysis of water are H_2O_2 , $\text{HO}_2^\bullet$, $\cdot\text{OH}$ with concentrations of the order of 10^{14} cm^{-3} . **Practical significance.** The results obtained in the work can be used in disinfection technologies, using short-wave ultraviolet radiation, and in solving problems of space biology.

Keywords: vacuum ultraviolet radiation, water photolysis, microscopic fungi, reactive oxygen species (ROS), $\cdot\text{OH}$ radical, DNA, astrobiology

Acknowledgment: the authors are grateful to the S.I. Vavilov State Optical Institute for the opportunity to use spectral equipment and vacuum ultraviolet light sources, the biological part of the work was carried out within the framework of a state assignment in accordance with the thematic plan of the BIN RAS on topic № АААА-А19-119020890079-6, part of the work was performed on the equipment of the Center for Common Use “Cellular and Molecular technologies for studying plants and fungi” Botanical Institute named after. V.L. Komarova RAS.

For citation: Zvereva G.N., Kirtsideli I.Yu. The effect of the products of vacuum ultraviolet photolysis of water on the survival of microorganisms [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 10. P. 68–79. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-68-79>

OCIS codes: 260.5130; 260.7210; 170.1420.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вакуумным ультрафиолетовым (ВУФ) излучением называют электромагнитное излучение, лежащее в спектральном диапазоне $10 < \lambda < 200$ нм. Оно интенсивно поглощается содержащимися в воздухе молекулами H_2O , O_2 , что определяет название этого диапазона. Поглощение ВУФ излучения приводит к фотолизу молекул H_2O и O_2 с образованием реактивных форм кислорода (РФК): $\cdot\text{OH}$, H_2O_2 , O_3 и др. [1–4].

Основными источниками ВУФ излучения являются синхротроны, водородные лампы, лампы на основе разрядов в инертных газах и их смесей [5, 6]. ВУФ излучение присутствует в космосе и играет важную роль в астробиологии [7], его спектр формируется Солнцем, другими звёздами и межзвёздной средой [8].

Основы фотобиологии и фотохимии ВУФ диапазона были заложены в работах А.Н. Теренина [9] и продолжены его учениками — Додоновой Н.Я. с сотрудниками [10, 11]. Им удалось продвинуться от исследования фотобиологии отдельных биологических молекул (белков и нуклеиновых кислот) [10] до ВУФ облучения микроорганизмов [11]. Основанная А.Н. Терениным в ГОИ им С.И. Вавилова экспериментальная база спектроскопии и излучателей ВУФ диапазона позволила авторам статьи провести ряд работ по ВУФ облучению микроорганизмов [12–14]. Представляемая работа является продолжением данных исследований, в ней рассматриваются закономерности непрямого воздействия ВУФ излучения на микроорганизмы.

В нашей работе в качестве источников ВУФ излучения использовались ксеноновые эксимерные лампы ($\lambda = 173$ нм) [5]. Преимуществом ламп данного диапазона является то, что они могут быть изготовлены из кварца, без использования выходных окон из пропускающих в ВУФ области материалов (MgF_2 , LiF_2). Это отчасти определило широкое промышленное применение ксеноновых эксимерных ламп. Источники данного типа используются в технологиях сухой очистки и активации поверхностей [15], в нанотехнологиях [16] и процессах обеззараживания [17].

В настоящее время растёт актуальность исследований применения источников ВУФ в области микробиологии. Это обусловлено как развитием методов стерилизации плазмой,

излучающей в ВУФ диапазоне [17], методов прямой стерилизации ВУФ излучением [14], так и астробиологическими исследованиями, связанными с условиями переноса микроорганизмов в открытом космосе [7] и образованием микрофлоры на космических аппаратах [18].

Фотолиз жидкой воды играет существенную роль при облучении микроорганизмов в ВУФ диапазоне: цитоплазма клеток содержит до 90% воды [19], продукты разложения которой могут привести к их повреждению и гибели. Механизм гибели микроорганизмов при облучении, вызванный воздействием реактивных продуктов разложения среды, называется непрямым. Он может осуществляться различными путями, основными из которых являются деструкция молекул ДНК и разрушение клеточной стенки [12, 20]. Последний механизм начинает доминировать по мере уменьшения длины волны ВУФ излучения в связи с увеличением коэффициента поглощения воды и снижением глубины проникновения излучения в клетку.

Исследованию роли продуктов ВУФ фотолиза воды в инактивации микроорганизмов проводилось в ограниченном числе работ, среди которых можно указать на [12, 20]. В работе [20] было показано, что кривые вероятностей выживания влажных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, полученные при облучении источниками с различными длинами волн ВУФ диапазона, коррелируют с кривой поглощения воды. При этом химический анализ облучённых спор указывал на разрушение клеточной стенки. На основании полученных результатов был сделан вывод, что гибель дрожжей обусловлена деструкцией клеточной стенки под действием продуктов фотолиза воды. В работе [12] исследовалось влияние йодсодержащих антиоксидантов на выживаемость спор и деструкцию ДНК при ВУФ облучении на длине волны $\lambda = 173$ нм. Результаты работы показали, что реактивные радикалы вносят вклад в размере не менее 20% в инактивацию микроорганизмов и способствуют деструкции ДНК.

Исследования воздействия продуктов ВУФ фотолиза воды на микроорганизмы являются актуальным в области дезинфекции — они позволяют заменить химически активные хлорсодержащих бактерицидные вещества

на воду, совершенствовать методы дезинфекции воды [21].

Целью настоящей работы было определение роли реактивных радикалов в инактивации спор при разложении внутриклеточной и внеклеточной воды под действием вакуумного ультрафиолетового излучения, а также сравнение воздействия реактивных продуктов вакуумного ультрафиолетового ($\Delta\lambda = 166\text{--}182\text{ нм}$) фотолиза воды, действующих извне и изнутри биологической клетки, на выживаемость микроорганизмов. Кроме того, целью работы было определение степени изменения спектра вакуумного ультрафиолетового излучения при прохождении слоёв воды микронной толщины и нахождение концентраций образующихся продуктов фотолиза. Для определения вклада продуктов разложения внутриклеточной воды в инактивацию спор использовался йод, образующий антиоксидант — йодид (I^-).

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Источники ВУФ излучения

В качестве источников ВУФ излучения использовались ксеноновые эксимерные лампы на основе барьерных разрядов (ГОИ им. С.И. Вавилова, Россия) (интенсивность излучения $I = 1,8\text{ мВт/см}^2$, полоса излучения $3,1\Sigma_u^+ \rightarrow 1\Sigma_g^+$, $\Delta\lambda = 166\text{--}182\text{ нм}$, с максимумом интенсивности на $\lambda_{\text{мах}} = 173\text{ нм}$, давление $p = 300\text{ Торр}$, частота повторения импульсов напряжения $f = 1\text{ кГц}$, длительность импульсов $\tau = 1,5\text{ мкс}$, амплитуда напряжения $U = 3\text{ кВ}$, длина электродов $L = 10\text{ см}$, расстояние между электродами $h = 10\text{ мм}$, выходное окно из фтористого магния MgF_2). Мощность ВУФ излучения измерялась с помощью фотодетектора (Н8025 НАМАМАТСУ, Япония). Измерения спектра излучения используемых ламп проводилось с помощью ВУФ монохроматора (ВФС-1, ЛОМО, Россия).

Подготовка и обработка облучаемых образцов

Используемые в экспериментах культуры микроскопических грибов *Rhodotorula colostri* (коллекция Ботанического института им. В.Л. Комарова) выращивались при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 7 дней на среде Чапек, в которую в случае экспериментов с антиок-

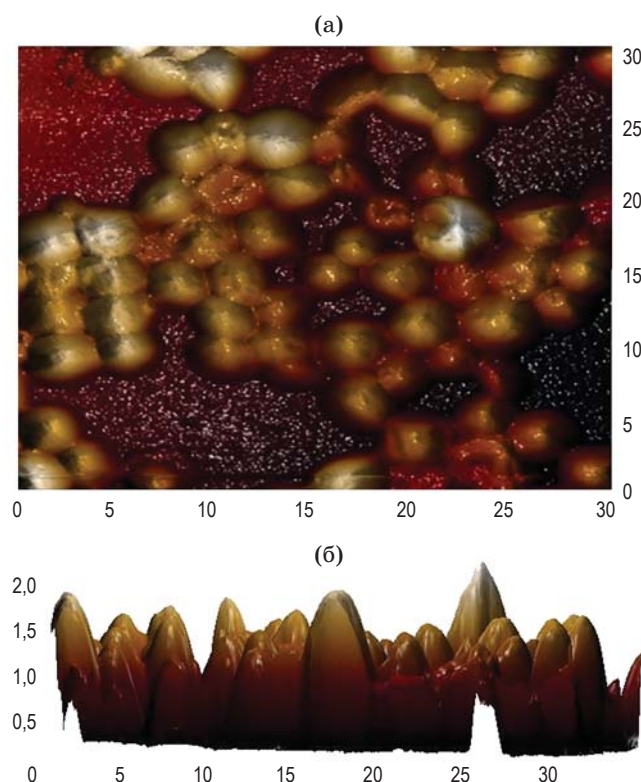


Рис. 1. Типичные виды монослоёв спор *Rhodotorula colostri*, исследовавшихся в экспериментах: а) вид сверху, б) поперечный вид (по осям OX , OY , OZ , ед. изм. — мкм)

Fig. 1. Typical views of monolayers of *Rhodotorula colostri* spores studied in experiments: а) top view, б) transverse view (along the OX , OY , OZ axes, units — μm)

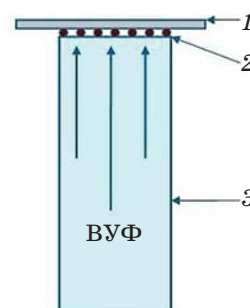


Рис. 2. Схема облучения. 1 — стекло, 2 — монослой спор, 3 — источник ВУФ излучения

Fig. 2. Irradiation scheme. 1 — glass, 2 — monolayer of spores, 3 — source of VUV radiation

сидантами добавлялся йод в концентрации $0,025\%$. Микроскопические грибы выделялись на экспоненциальной фазе роста колоний, их суспензия (10 мкл) в виде монослоя высушивалась на поверхности стекла (рис. 1). Монослой

имел непосредственный контакт с выходным окном лампы в случае облучения сухих образцов (рис. 2) или между ним и окном имелся слой воды в случае облучения влажных спор. Толщина слоя воды контролировалась интерферометрическим способом и составляла 6 мкм. Облучённые образцы смывались с поверхности стекла и культивировались в среде с агаром при температуре 14 °С в течение 10 дней. Далее определялась вероятность выживания как отношение числа колоний, образованных облучёнными спорами, к числу колоний, образованных необлучёнными спорами.

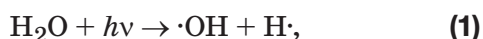
Экспериментальное оборудование и программное обеспечение

Для определения расположения спор и их поверхности использовался атомно-силовой микроскоп (NTegra Aura, NT-MDT, Россия) в полуконтактном режиме.

Статистическая обработка проводилась с помощью программы STADIA.

3. НАРАБОТКА ВЫСОКОРЕАКТИВНЫХ ПРОДУКТОВ ВУФ ФОТОЛИЗА ВОДЫ

Известно, что облучение молекул жидкой воды вакуумным ультрафиолетовым излучением приводит к их разложению и ионизации согласно реакциям [1–3]:



Квантовый выход реакций (1) при облучении на длине волны $\lambda = 172$ нм равен 0,37, реакции (2) — 0,05 [1, 3]. В процессе реакции (1) происходит возбуждение молекулы H_2O на отталкивательную поверхность состояния $^1\text{B}_1$ с её последующей диссоциацией.

Реакции первичных продуктов $\cdot\text{OH}$, $\text{H}\cdot$, H^+ , e_{aq}^- приводят к образованию вторичных продуктов, основными из которых являются H_2 , OH^- , O^- , H_2O_2 , $\text{O}_2^{\cdot-}$, $\text{HO}_2^{\cdot}$, HO_2^- , O_3^- , O_2 [23].

Оценка концентраций продуктов ВУФ фотолиза и их распределение в облучаемом слое воды проводились расчётным путём. Относительное распределение интенсивности излучения в полосе учитывалось согласно спектральным данным работы [5]. В качестве облучаемой

среды рассматривалась дистиллированная вода, содержащая кислород с концентрацией $1,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, соответствующей его растворимости при 20 °С. Расчёт проводился на основе модели работы [24], в которой учитывался ВУФ фотолиз молекул H_2O , H_2O_2 и O_2 и диффузия образующихся продуктов. Для нахождения концентраций продуктов фотолиза ($\cdot\text{OH}$, $\text{H}\cdot$, H^+ , e_{aq}^- , H_2 , OH^- , O^- , H_2O_2 , $\text{O}_2^{\cdot-}$, $\text{HO}_2^{\cdot}$, HO_2^- , O_3^- , O_2) решалась система уравнений диффузии:

$$\frac{\partial N_i(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i \frac{\partial N_i(x,t)}{\partial x} \right) = S_i(x,t), \quad i = 1, 13, \quad (3)$$

где N_i — концентрация, D_i — коэффициент диффузии, S_i — функция, описывающая скорости появления (гибели) i -го продукта. В расчётах учитывалась зависимость коэффициента поглощения от длины волны. Изменение концентрации N_i в результате фотопротекса на частоте ν учитывалось членами вида:

$$S_i = -\Phi_j(1/h\nu) dI(x, \nu)/dx, \quad (4)$$

где Φ_j — квантовый выход j -ой фотореакции, $I(x, \nu) = I(0, \nu) \times 10^{-\alpha(\nu)x}$ — интенсивность излучения на частоте ν в точке x среды, $\alpha(\nu)$ — коэффициент поглощения среды на частоте ν .

Расчёты показали, что в течение времени порядка $t = 0,01$ с с начала облучения концентрации продуктов достигают равновесных значений. Наибольшие концентрации, согласно расчётам, имеют следующие продукты: H_2 , $\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$, OH^- , H_2O_2 , H^+ , $\text{HO}_2^{\cdot}$. При этом наиболее высокими окислительными потенциалами E'_0 среди них обладают $\cdot\text{OH}$ ($E'_0 = 1,9\text{--}2,7$ В), $\text{HO}_2^{\cdot}$ ($E'_0 = 0,8\text{--}1,4$ В) и H_2O_2 ($E'_0 = 1,8$ В).

Известно, что коэффициент поглощения жидкой воды α в области полосы излучения ксеноновой эксимерной лампы испытывает резкий рост с уменьшением длины волны: его значение увеличивается на пять порядков (рис. 3) [25]. При этом суммарный квантовый выход реакций (1) и (2) Φ меняется слабо [1]: от $\Phi = 0,56$ ($\lambda = 160$ нм) до $\Phi = 0,35$ ($\lambda = 182$ нм). Резкое изменение коэффициента поглощения приводит к трансформации спектра излучения $F(\lambda)$ ксеноновой эксимерной лампы при прохождении слоёв воды различной толщины d (рис. 4). Видно, что коротковолно-

вое крыло полосы излучения почти полностью поглощается при толщине слоя $d > 1$ мкм. Коэффициент поглощения в области оставшегося длинноволнового крыла $\lambda > 170$ нм имеет на два порядка меньшую величину (рис. 3), что обуславливает низкую фотохимическую активность прошедшего излучения.

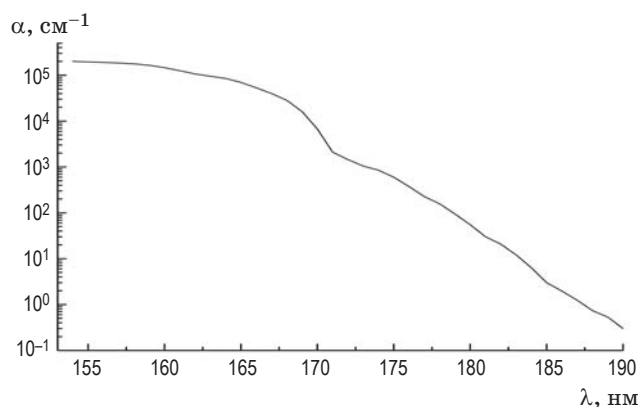


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения жидкой воды от длины волны [25]

Fig. 3. Dependence of the absorption coefficient of liquid water on wavelength [25]

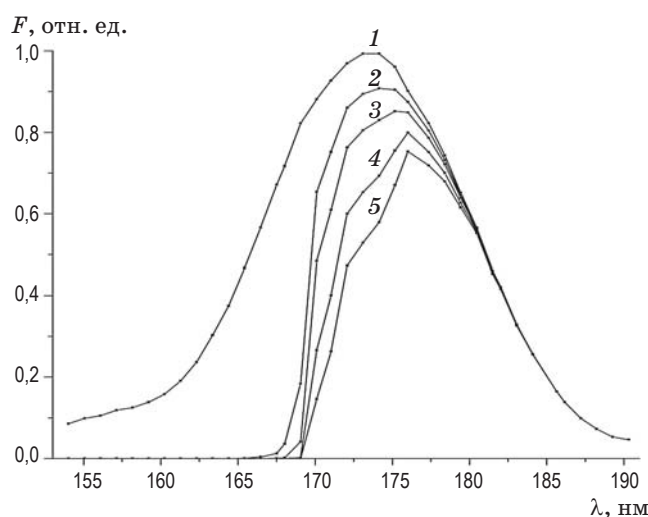


Рис. 4. Изменение спектра излучения ксеноновой эксимерной лампы при прохождении через слой воды. Эксперимент — исходное излучение (1), расчёт — излучение, прошедшее слой воды толщиной $d = 1$ мкм (2), $d = 2$ мкм (3), $d = 4$ мкм (4), $d = 6$ мкм (5)

Fig. 4. Change in the emission spectrum of a xenon excimer lamp when passing through a water layer. Initial radiation (experiment) (1), calculation — radiation that passed through a water layer thick $d = 1 \mu\text{m}$ (2), $d = 2 \mu\text{m}$ (3), $d = 4 \mu\text{m}$ (4), $d = 6 \mu\text{m}$ (5)

4. РОЛЬ РЕАКТИВНЫХ ПРОДУКТОВ ФОТОЛИЗА ВОДЫ В ИНАКТИВАЦИИ МИКРООРГАНИЗМОВ

Основными механизмами инактивации спор под действием реактивных радикалов являются разрывы цепей ДНК и деструкция клеточной стенки [12, 20, 22].

Деструкция ДНК

Величины скоростей реакций ДНК с реактивными продуктами $\cdot\text{OH}$, $\text{H}\cdot$ и e_{aq}^- — в расчёте на один нуклеотид при нейтральном pH имеют значения $k = 1,3 \times 10^{-12} \text{ см}^3 \text{с}^{-1}$, $1,2 \times 10^{-13} \text{ см}^3 \text{с}^{-1}$ и $2,2 \times 10^{-13} \text{ см}^3 \text{с}^{-1}$ соответственно [26]. Известно, что воздействие свободных радикалов на ДНК может приводить к видоизменению оснований и сахаров, сшивкам ДНК с белками, одноцепочечным и двухцепочечным разрывам [25–31]. Наиболее летальными являются двухцепочечные разрывы ДНК, но вероятность их возникновения на порядок меньше, чем одноцепочечных [32]. Образование одноцепочечных разрывов при ВУФ облучении водных растворов плазмидной ДНК Col E1 исследовалось в работе [29]. Добавление антиоксидантов, таких как этиловый спирт, йодид калия и d-маннит, показало корреляцию между одноцепочечными разрывами и наличием радикалов $\cdot\text{OH}$. В работе [27] с помощью спектроскопии электронного парамагнитного резонанса было экспериментально подтверждено образование радикалов $\text{OH}\cdot$ при ВУФ облучении водных растворов ДНК плазмиды pBR-322. Исследования с добавлением антиоксидантов фенола, трет-бутанола, метанола [32] и глутатиона [33] к водному раствору ДНК, облучённой γ -излучением, также показали, что разрывы цепей в основном происходят под влиянием радикала $\cdot\text{OH}$. В работе [32] двухцепочечный разрыв был объяснён как результат переноса радикального центра с сахарного фрагмента расщепленной цепи на комплементарную цепь молекулы ДНК. Перечисленные выше работы проводились *in vitro* — в них исследовались молекулы ДНК, выделенные из клеток. Влияние продуктов разложения воды *in vivo* на ДНК в клетке рассматривалось в ограниченном количестве работ [12, 34, 35]. В работе [12] проведено ВУФ облучение спор микроскопических грибов, выращенных на средах, содержащих антиоксиданты (I_2 , KI, аскорбиновую кислоту) и без них.

В присутствии антиоксидантов увеличивалась вероятность выживания и уменьшалась деструкция ДНК, что подтверждало наличие непрямого механизма инактивации спор. В работе [34] *in vivo* изучалась роль продуктов радиолитической внутриклеточной воды в образовании разрывов цепей ДНК при рентгеновском облучении бактерий *E. coli*. Установлено, что с увеличением концентрации антиоксидантов (трет-бутанола, трет-амиловый спирта, н-бутанола, нитрита) и их способности к нейтрализации радикалов $\cdot\text{OH}$ в клетке уменьшается количество разрывов цепей ДНК. Возможность использования водного раствора глутатиона в качестве модели ДНК в клетке была исследована в работе [35].

Деструкция клеточной стенки

Другой важной мишенью для радикалов является клеточная стенка. Она первой сталкивается с ВУФ излучением, причём степень её разрушения и вклад в инактивацию увеличивается с уменьшением длины волны из-за роста коэффициента поглощения и соответствующего уменьшения глубины проникновения излучения в клетку. Микроскопические грибы имеют клеточную стенку, основными компонентами которой являются полисахариды (хитин, глюканы) (до 80% сухого вещества), белки (до 20% сухого вещества), липиды (1–13% сухого вещества) [19, 36]. Толщина стенки колеблется от 0,15 до 0,3 мкм в зависимости от типа и возраста споры [19]. Коэффициенты поглощения на длине волны $\lambda = 170$ нм у сахаров и белков достигают величин $4,3 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$ [37] и $7 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$ [38], соответственно. Радикалы $\cdot\text{OH}$ играют важную роль в разрушении клеточной стенки. В частности, они инициируют реакции перекисного окисления её липидов, приводящие к образованию липидных радикалов $\text{L}\cdot$:



Дальнейшее взаимодействие радикалов $\text{L}\cdot$ с O_2 запускает так называемые цепные реакции перекисного окисления липидов, приводящие к разрушению последних [39, 40]. С внутренней стороны клеточной стенки расположена фосфолипидная мембрана, которая также способна подвергаться разрушению по указанному механизму. Разрушение клеточ-

ной стенки под действием продуктов фотолиза воды наблюдалось в работе [20]: зависимость вероятности выживания влажных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в ВУФ области коррелировала с кривой поглощения молекул воды, а химический анализ показал нарушение целостности мембраны.

5. ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ ВУФ ФОТОЛИЗА ВНУТРИКЛЕТОЧНОЙ ВОДЫ НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ СПОР

В данной части работы проводилось облучение сухих спор при их непосредственном контакте с выходным окном источника вакуумного ультрафиолетового излучения.

Расчётным путём были определены концентрации реактивных радикалов, образующихся внутри споры в процессе ВУФ фотолиза. В расчётах полагалось, что спора имеет диаметр 2 мкм (рис. 1), клеточную стенку толщиной 0,3 мкм, поглощающую около 75% падающего излучения [37, 38], и цитоплазму, состоящую из воды с кислородом с концентрацией $1,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Результаты расчётов равновесных концентраций основных продуктов ВУФ фотолиза воды внутри клетки представлены на рис. 5.

В исследованиях, связанных с определением вклада реактивных радикалов в инак-

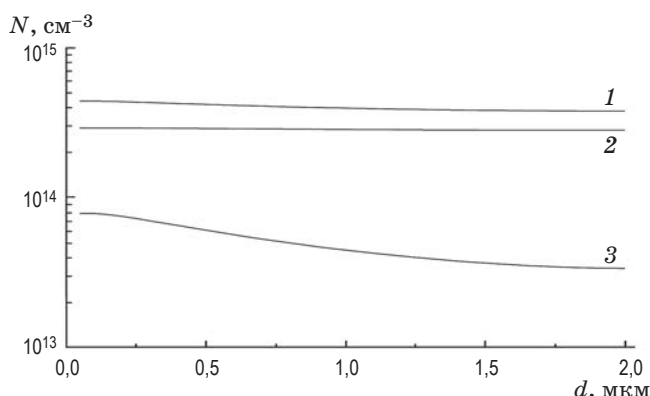


Рис. 5. Пространственное распределение концентраций продуктов ВУФ фотолиза внутриклеточной воды: 1 — $\text{HO}_2\cdot$, 2 — H_2O_2 , 3 — $\cdot\text{OH}$. Интенсивность энергии падающего излучения $I = 1,8 \text{ мВт/см}^2$, $\lambda = 166\text{--}182 \text{ нм}$

Fig. 5. Spatial distribution of VUV photolysis products concentrations of intracellular water: 1 — $\text{HO}_2\cdot$, 2 — H_2O_2 , 3 — $\cdot\text{OH}$. Intensity of incident radiation $I = 1.8 \text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 166\text{--}182 \text{ nm}$

тивацию микроорганизмов обычно используют антиоксиданты [12, 41]. Эффективность действия антиоксиданта определяется величиной его восстановительного потенциала E'_0 , его концентрацией, а при его введении в клетку извне, способностью проникать внутрь неё.

В нашей работе в качестве образующего антиоксиданты вещества использовался йод, который добавлялся в питательную среду в концентрации 0,025%. В работах [12, 41] было показано, что добавление I_2 обеспечивает большую восстановительную способность по сравнению с аскорбиновой кислотой и KI. Возможность и механизмы проникновения I_2 в микроорганизмы были представлены в [42]. Внутри клетки I_2 превращается в йодид I^- . I^- является антиоксидантом, его восстановительный потенциал достигает значения $E'_0 = -0,54$ В (для сравнения, у аскорбиновой кислоты — $E'_0 = -0,066$ В [43, 44]). I^- эффективно нейтрализует реактивные радикалы в реакциях типа:

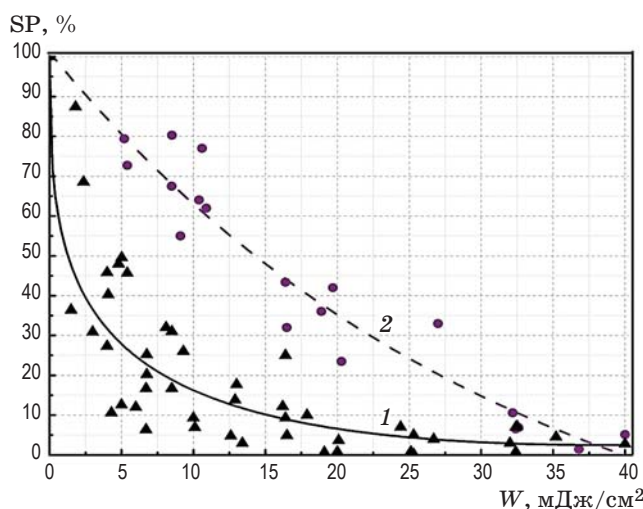
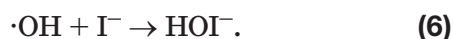
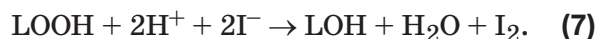


Рис. 6. Кривые вероятностей выживания сухих спор *Rhodotorula colostri*: 1 — образцы, не содержащие антиоксиданты, 2 — образцы с антиоксидантами. W — поверхностная плотность энергии падающего излучения, $\lambda = 166\text{--}182$ нм

Fig. 6. Survival probability curves of *Rhodotorula colostri* dry spores: 1 — samples without antioxidants, 2 — samples with antioxidants. W — surface energy density of incident radiation, $\lambda = 166\text{--}182$ nm

Скорость реакции (6) имеет величину $1,9 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [44]. I^- также останавливает цепную реакцию перекисного окисления липидов путём превращения гидропероксида липида LOOH в стабильный липидный спирт LOH [40]:



На рис. 6 представлены регрессионные кривые вероятностей выживания $SP(W)$ при облучении сухих спор. Стандартная погрешность значений кривой контрольных спор составляет 12%, кривой спор, содержащих йод — 9%.

Согласно данным кривым наличие в спорах антиоксидантов ведёт к росту вероятности выживания на 10–60% в зависимости от величины дозы. Форма кривой $SP(W)$ у контрольных спор аппроксимируется степенной функцией, в то время как у спор, содержащих антиоксиданты, становится практически линейной. Последнее может быть обусловлено снижением деструкции ДНК и клеточной стенки вследствие нейтрализации реактивных радикалов антиоксидантами [12]. Снижение деструкции ДНК в большей степени будет проявляться у спор, находящихся на стадии деления, наиболее чувствительной к внешним воздействиям.

6. ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ ВУФ ФОТОЛИЗА ВНЕКЛЕТОЧНОЙ ВОДЫ НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ СПОР

В данных экспериментах облучались споры, покрытые слоем дистиллированной воды толщиной $d = 6$ мкм. Концентрация реактивных продуктов ВУФ фотолиза воды у поверхности споры, согласно результатам расчётов (рис. 7), составили для $\cdot OH$ — $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, для $HO_2\cdot$ — $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и для H_2O_2 — $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Следует отметить, что в случае облучения сухих спор продукты фоторазложения внутриклеточной воды имели сравнимые концентрации: $\cdot OH$ — $(3\text{--}8) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $HO_2\cdot$ — $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и H_2O_2 — $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (рис. 5).

При облучении через слой воды предполагалось, что продукты ВУФ фотолиза будут воздействовать на клеточную стенку извне, приводя к гибели споры. При этом, из-за поглощения водой коротковолновой части полосы излучения (рис. 4) не ожидалось существенного вклада в инактивацию за счёт продуктов фотолиза внутриклеточной воды.

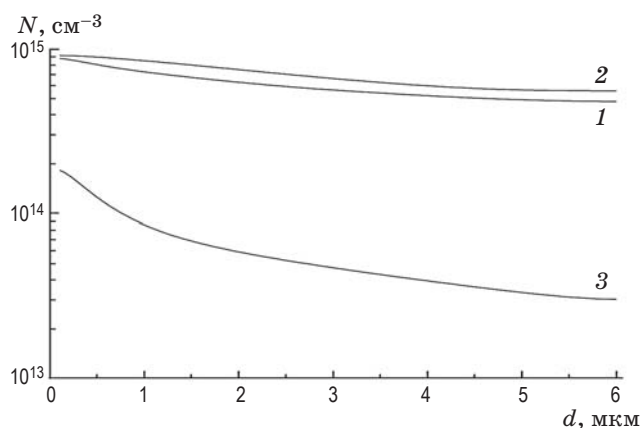


Рис. 7. Пространственное распределение концентраций продуктов ВУФ фотолиза во внешнем слое воды: 1 — $\text{HO}_2\cdot$, 2 — H_2O_2 , 3 — $\cdot\text{OH}$. Интенсивность энергии падающего излучения $I = 1,8 \text{ мВт/см}^2$, $\lambda = 166\text{--}182 \text{ нм}$

Fig. 7. Spatial distribution of VUV photolysis products concentrations in the outer layer of water: 1 — $\text{HO}_2\cdot$, 2 — H_2O_2 , 3 — $\cdot\text{OH}$. Intensity of incident radiation $I = 1.8 \text{ мВт/см}^2$, $\lambda = 166\text{--}182 \text{ нм}$

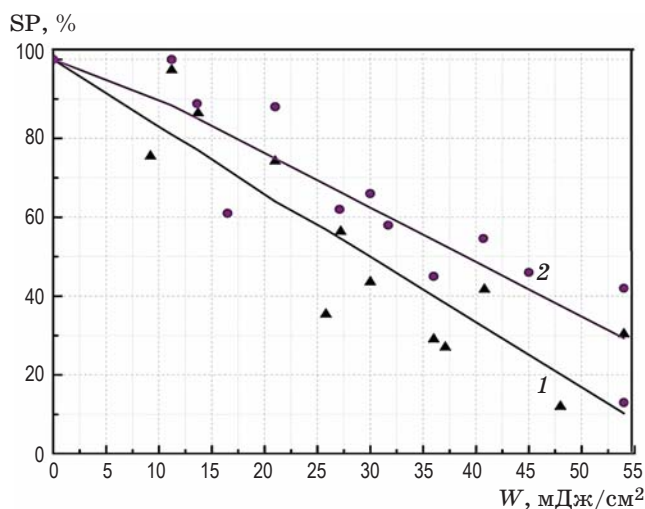


Рис. 8. Вероятности выживания контрольных и содержащих йод спор *Rhodotorula colostri* при ВУФ облучении через слой воды толщиной $d = 6 \text{ мкм}$: 1 — образцы, не содержащие антиоксиданты, 2 — образцы с антиоксидантами. W — поверхностная плотность энергии излучения, дошедшего до поверхности споры, $\lambda = 170\text{--}182 \text{ нм}$

Fig. 8. Survival probability curves of *Rhodotorula colostri* of control and iodine-containing spores under VUV irradiation through a water layer with a thickness of $d = 6 \text{ μm}$. 1 — samples without antioxidants, 2 — samples with antioxidants. W is the surface energy density of radiation reaching the surface of the spore, $\lambda = 170\text{--}182 \text{ нм}$

Полученные в экспериментах значения вероятностей выживания и соответствующие им регрессионные кривые приведены на рис. 8. Данные как для контрольных, так и для содержащих антиоксиданты спор аппроксимируются линейными зависимостями. Стандартная погрешность значений кривой 1 контрольных спор составляет 13%, кривой 2 спор, содержащих йод, — 11%. Отличительными особенностями данных кривых являются линейная зависимость от дозы и более высокие вероятности выживания спор, облучаемых в воде, по сравнению со спорами, облучаемыми в воздухе. Линейность кривой $SP(W)$ уже наблюдалась в предыдущих экспериментах (рис. 6) у содержащих антиоксиданты спор и может свидетельствовать о снижении роли реактивных радикалов в инактивации. Данное снижение наблюдается несмотря на сравнимые значения концентраций реактивных продуктов ВУФ фотолиза вне клетки (рис. 7) и внутри неё (рис. 5). Последнее может быть объяснено двумя факторами: 1) более высокими резистентными свойствами клеточной стенки по отношению к внешнему воздействию по сравнению с воздействием на неё радикалов изнутри, 2) снижением наработки радикалов внутри клетки, обусловленным поглощением коротковолновой части полосы ВУФ излучения внешним слоем воды.

ВЫВОДЫ

В работе исследовались особенности ВУФ фотолиза воды, определялись концентрации образующихся высокореактивных радикалов и их влияние на выживаемость микроскопических грибов *Rhodotorula colostri*. Облучению подвергались сухие и покрытые слоем воды (6 мкм) образцы, содержащие и не содержащие антиоксиданты. В качестве источника ВУФ излучения использовались ксеноновые эксимерные лампы ($\Delta\lambda = 166\text{--}182 \text{ нм}$).

В ходе работы было показано, что при прохождении слоёв воды, толщиной $d > 1 \text{ мкм}$, происходит поглощение коротковолнового крыла $\lambda < 170 \text{ нм}$ полосы излучения, уменьшающее его фотобиологическое воздействие. Согласно расчётам основными реактивными продуктами фоторазложения как внеклеточной, так и внутриклеточной воды являются $\cdot\text{OH}$, $\text{HO}_2\cdot$, H_2O_2 , с равновесными концентра-

циями порядка 10^{13} , 10^{14} и 10^{14} см⁻³ соответственно. Эксперименты показали, что наличие в микроорганизмах антиоксидантов ведёт к росту вероятности выживания SP на 10–40% (в случае облучения сухих спор) и на 10% (в случае облучения спор, покрытых слоем воды). Данный рост подтверждает вклад реактивных продуктов в инактивацию микроорганизмов. При этом больший рост SP в случае облучения сухих спор свидетельствует о более эффективном летальном воздействии продуктов ВУФ фотолиза изнутри, чем снаружи, в случае облучения через слой воды.

Следует отметить, что наличие в микроорганизмах антиоксидантов приводит к линеаризации зависимости вероятности выживания от дозы облучения SP(W), что свидетельствует об уменьшении каналов летального воздействия.

Наличие между спорами и ВУФ источником слоя воды, равного 6 мкм, приводило к росту вероятности выживания в среднем на 60% спор без антиоксидантов и на 40% с антиоксидантами по сравнению с сухими спорами. Более высокая вероятность выживания при облучении через слой воды по сравнению с облучением сухих спор может быть объяснена снижением фотохимической активности излучения из-за поглощения коротковолнового крыла полосы излучения эксимеров ксенона в ВУФ области и менее эффективным воздействием реактивных продуктов ВУФ фотолиза воды снаружи, чем изнутри.

Полученные в работе результаты могут найти применение в технологиях дезинфекции с использованием коротковолнового ультрафиолетового излучения и при решении задач космической биологии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Heit G., Neuner A., Saugy P.-Y., Braun A.M. Vacuum-UV (172 nm) actinometry. The quantum yield of the photolysis of water // *J. Chem. Phys. A*. 1998. V. 102. P. 5551–5561. <https://doi.org/10.1021/jp980130i>
2. Gonzalez M.G., Oliveros E., Worner M., Braun A.M. Vacuum-ultraviolet photolysis of aqueous reaction systems // *J. Photochemistry and Photobiology*. 2004. V. 5. № 3. P. 225–246. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2004.10.002>
3. Gettoff N. Purification of drinking water by irradiation. A review // *Proc. Indian Acad. Sci. (Chem/Sci)*. 1993. V. 105. № 6. P. 373–391.
4. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R.A., Crowley J.N., Hampson R.H., Hynes R.G., Jenkin M.E., Rossi M.J., Troe J. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Volume I — gas phase reactions of O_x, HO_x, NO_x and SO_x species // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4. P. 1461–1738. <https://doi.org/10.5194/acp-4-1461-2004>
5. Zvereva G.N., Letova E.Yu. Features of the formation of barrier discharge in xenon excimer lamps // *Proc. SPIE*. 2019. 1132222. <https://doi.org/10.1117/12.2548856>
6. Герасимов Г.Н., Зверева Г.Н. Численное моделирование процессов в плазме разряда в криптоне // *Оптический журнал*. 1997. Т. 64. № 1. С. 20–24. Gerasimov G.N., Zvereva G.N. Numerical modeling of processes in discharge plasma in krypton [in Russian] // *Journal of Optical Technology*. 1997. T. 64. № 1. P. 20–24.
7. Horneck G., Klaus D.M., Mancinelli R.L. Space microbiology // *Microb. and Molec. Biol. Res.* 2010. V. 74. P. 121–156. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00016-09>
8. Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф. Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве. С-Петербург: Гидрометеоиздат, 1994. 501 с. Avakyan S.V., Vdovin A.I., Pustarnakov V.F. Ionizing and penetrating radiation in near-Earth space [in Russian]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1994. 501 p.
9. Теренин А.Н. Избранные труды. Элементарные процессы в сложных органических молекулах. Ленинград: Издательство «Наука», 1974. 474 с. Terenin A.N. Selected works. Elementary processes in complex organic molecules [in Russian]. Leningrad: Publishing house "Nauka", 1974. 474 p.
10. Додонова Н.Я., Виноградов И.П., Киселева М.Н. Исследование фотопроцессов в белках и нуклеиновых кислотах в вакуумной ультрафиолетовой области спектра // *Спектроскопия фотопревращений (Сб.)*. 1977. С. 202–212. Dodonova N.Ya., Vinogradov I.P., Kiseleva M.N. Study of photoprocesses in proteins and nucleic acids in the vacuum ultraviolet region of the spectrum // *Spectroscopy of phototransformations* [in Russian]. 1977. P. 202–212.
11. Наконечный Ю.В., Пахатова О.В., Додонова Н.Я. Действие вакуумного ультрафиолетового излучения (120–130 нм) на одноклеточные зеленые водоросли *Chlamydomonas Reinhardtii* // *Биофизика*. 1996. Т. 41. В. 2. С. 421–427. Nakonechny Yu.V., Pakhatova O.V., Dodonova N.Ya. Effect of vacuum ultraviolet radiation (120–130 nm) on unicellular green algae *Chlamydomonas Reinhardtii* [in Russian] // *Biophysics*. 1996. V. 41. № 2. P. 421–427.
12. Letova E.Yu., Kirtsideli I., Zvereva G.N., Machs E.M. Indirect action of VUV radiation on micro-organisms // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 11322. 113222M. <https://doi.org/10.1117/12.2548657>
13. Zvereva G., Kirtsideli I., Machs E., Vangonen A. Mechanisms of the effect of VUV radiation on the microfungi // *Proceedings of SPIE*. 2018. V. 10614. P. 106141S. <https://doi.org/10.1117/12.2303532>
14. Зверева Г.Н., Кирцидели И.Ю. Инактивация микроорганизмов под действием вакуумного ультрафиолетового излучения // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 8. С. 67–74. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-08-67-74>

- Zvereva G.N., Kirtsedeli I.Yu. Inactivation of microorganisms by vacuum ultraviolet radiation // *Journal of Optical Technology*. 2021. V. 88(8). P. 454–459. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000454>
15. Morimoto Y., Sumitomo T., Yoshioka M., Takemura T. Recent progress on UV lamps for industries // *Proc. of IAS (IEEE Industry application society)*. 2004. P. 24–31.
 16. Лихоманова С.В., Зверева Г.Н., Каманина Н.В. Влияние УФ излучения на рельеф и свойства поверхности 2-циклооктиламин-5-нитропиридин-фуллереновой пленки для ориентирования жидких кристаллов // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2022. Т. 22. № 1. С. 39–46. <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2022.1.39>
Likhomanova S.V., Zvereva G.N., Kamanina N.V. The influence of UV radiation on the relief and properties of the surface of 2-cyclooctylamine-5-nitropyridine-fullerene film for the orientation of liquid crystals [in Russian] // *Liquid crystals and their practical use*. 2022. V. 22. № 1. P. 39–46. <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2022.1.39>
 17. Weltmann K.D., Kindel E., Woedtke T., Hähnle M., Stieber M., Brandenburg R. Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine // *Pure Appl. Chem.* 2010. V. 82. P. 1223–1237. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-09-10-35>
 18. Blachowicz A., Mayer T., Bashir M., Pieber T.R., De León P., Venkateswaran K. Human presence impacts fungal diversity of inflated lunar/Mars analog habitat // *Microbiome*. 2017. V. 5. № 62. P. 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40168-017-0280-8>
 19. Бирюзова В.И. Ультраструктурная организация дрожжевой клетки. М: Наука, 1993. 224 с.
Biryuzova V.I. Ultrastructural organization of the yeast cell [in Russian]. M: Nauka, 1993. 224 p.
 20. Ito T., Ito A., Hieda K., Kobayashi K. Wavelength dependence of inactivation and membrane damage to *Saccharomyces cerevisiae* cells by monochromatic synchrotron Vacuum-uv radiation (145–190 nm) // *Rad. Res.* 1983. V. 96. P. 532–548. <https://doi.org/10.2307/3576120>
 21. Zoschke K., Börnick H., Worch E. Vacuum-UV radiation at 185 nm in water treatment — a review // *Water Research*. 2014. Apr 1:52:131–45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.12.034>
 22. Sarantopoulou E., Stefi A., Kollia Z., Palles D., Petrou P.S., Bourkoulou A., Koukouvinos G., Velentzas D., Kakabakos S., Cefalas A.C. Viability of *Cladosporium herbarum* spores under 157 nm laser and vacuum ultraviolet irradiation, low temperature (10 K) and vacuum // *J. Appl. Phys.* 2014. V. 116. P. 104701. <https://doi.org/10.1063/1.4894621>
 23. Бугаенко В.Л., Бяков В.М. Количественная модель радиолиза жидкой воды и разбавленных растворов водорода, кислорода и перекиси водорода. I. Формулировка модели // *Химия высоких энергий*. 1998. Т. 32. № 6. С. 407–414.
Bugaenko V.L., Byakov V.M. Quantitative model of radiolysis of liquid water and dilute solutions of hydrogen, oxygen and hydrogen peroxide. I. Formulation of the model [in Russian] // *High Energy Chemistry*. 1998. V. 32. № 6. P. 407–414.
 24. Зверева Г.Н. Исследование разложения воды вакуумным ультрафиолетовым излучением // *Оптика и спектроскопия*. 2010. Т. 108. № 6. С. 963–970.
Zvereva G.N. Investigation of water decomposition by vacuum ultraviolet radiation // *Optics and spectroscopy*. 2010. V. 108. № 6. P. 915–922. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2010OptSp.108..915Z/doi:10.1134/S0030400X10060135
 25. Crapulli F., Santoro D., Sasges M.R., Ray A.K. Mechanistic modeling of vacuum UV advanced oxidation process in an annular photoreactor // *Water Research*. 2014. V. 64. P. 209–225. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.048>
 26. Bensasson R.V., Land E.J., Truscott T.G. Flash photolysis and pulse radiolysis. Pergamon Press, 1983. 236 p.
 27. Kuwabara M., Minegishi A., Takakura K., Hieda K., Ito T. Photolysis of water by VUV radiation and reactions with DNA and related compounds in aqueous systems, in *Photobiology* / Ed. E. Riklis. NY: Plenum Press, 1991. P. 355–363.
 28. Folkard M., Prise K.M., Brocklehurst B., Michael B.D. DNA damage induction in dry and hydrated DNA by synchrotron radiation // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 1999. V. 32. P. 2753–2761.
 29. Takakura K., Ishikawa M., Ito T. Action spectrum for the induction of single-strand breaks in DNA in buffered aqueous solution in the wavelength range from 150 to 272 nm: Dual mechanism // *Int. J. Radiat. Biol.* 1987. V. 52. P. 667–675. <https://doi.org/10.1080/09553008714552181>
 30. Michael B.D., Prise K.M., Folkard M., Vojnovic B., Brocklehurst B., Munro I.H., Hopkirk A. Action spectra for single- and double-strand break induction in plasmid DNA: studies using synchrotron radiation // *Int. J. Radiat. Biol.* 1994. V. 66. № 5. P. 569–572. <https://doi.org/10.1080/09553009414551641>
 31. Dizdargogly M., Jaruga P. Mechanisms of free radical-induced damage to DNA // *Free Radical Research*. 2012. V. 46. № 4. P. 382–419. <https://doi.org/10.3109/10715762.2011.653969>
 32. Aslam Siddiqi M., Bothe E. Single- and double-strand break formation in DNA irradiated in aqueous solution: Dependence on dose and OH radical scavenger concentration // *Radiation Research*. 1987. V. 112. P. 449–463. <https://doi.org/10.2307/3577098>
 33. Liphard M., Bothe E., Sculte-Frohlinde D. The influence of glutathione on single-strand breakage in single-stranded DNA irradiated in aqueous solution in the absence and presence of oxygen // *Int. J. Radiat. Biol.* 1990. V. 58. P. 589–602. <https://doi.org/10.1080/09553009014551951>
 34. Billen D. The role of hydroxyl radical scavengers in preventing DNA strand breaks induced by X irradiation of toluene-treated *Escherichia coli* // *Rad. Res.* 1984. V. 97. P. 626–629.
 35. Schulte-Frohlinde D., Bothe E. Determination of the constants of the alper formula for single-strand breaks from kinetic measurements on DNA in aqueous solution and comparison with data from cells // *International Journal of Radiation Biology*. 1990. V. 58. № 4. P. 603–611. <https://doi.org/10.1080/09553009014551961>
 36. Феофилова Е.П. Клеточная стенка. М.: Наука, 1983. 248 с.
Feofilova E.P. Cell wall [in Russian]. M.: Nauka, 1983. 248 p.
 37. Dickinson H.R., Johnson W.C. Optical properties of sugars. II. Vacuum-ultraviolet absorption of model compounds // *J. Am. Chem. Soc.* 1974. V. 96. P. 5050–5054. <https://doi.org/10.1021/ja00823a006>
 38. Inagaki T., Hamm R.N., Arakawa E.T., Birkhoff R.D. Optical property of bovine plasma albumin between 2 and 82 eV // *Biopolymers*. 1975. V. 14. P. 839–847.

39. Porter N.A. Mechanisms for the autoxidation of polyunsaturated lipids // *Accounts of Chemical Research*. 1986. V. 19. № 3. P. 262–268.
40. Porter N.A., Caldwell S.E., Mills K.A. Mechanisms of free radical oxidation on unsaturated lipids // *Lipids*. 1995. V. 30. № 4. P. 277–290. <https://doi.org/10.1007/bf02536034>
41. Aceves C., Anguiano, Delgado G. The extrathyronine actions of iodine as antioxidant, apoptotic, and differentiation factor in various tissues // *THYROID*. 2013. V. 23. № 8. P. 938–946. <https://doi.org/10.1089/thy.2012.0579>
42. Amachi S. Microbial contribution to global iodine cycling: Volatilization, accumulation, reduction, oxidation, and sorption of iodine // *Microbes Environ*. 2008. V. 3. № 4. P. 269–276. <https://doi.org/10.1264/jsme2.me08548>
43. Borsook H., Keighley G. Oxidation-reduction potential of ascorbic acid (vitamin C) // *Physiology*. 1933. V. 19. P. 875–878.
44. Motohashi N., Saito Y. Competitive measurement of rate constants for hydroxyl radical reactions using radiolytic hydroxylation of benzoate // *Chem. Pharm. Bull*. 1993. V. 41. P. 1842–1845.
45. Winkler R. Iodine — a potential antioxidant and the role of iodine/iodide in health and disease // *Natural Science*. 2015. V. 7. P. 548–557. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2015.712055>

АВТОРЫ

Галина Николаевна Зверева — доктор физ.-мат. наук, доцент Санкт-Петербургского университета гражданской авиации, 196210, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 7005211311, <https://orcid.org/0000-0003-1322-1438>, ybr.ybr.90@inbox.ru

Ирина Юрьевна Кирцидели — доктор биол. наук, старший научный сотрудник Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН, 197022, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 18836134100, <https://orcid.org/0000-0002-7232-996X>, microfungi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.02.2023

Одобрена после рецензирования 22.05.2024

Принята к печати 30.08.2024

AUTHORS

Galina N. Zvereva — D.Sci. in Physics and Mathematics, Associate Professor of St. Petersburg University of Civil Aviation, 196210, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 7005211311, <https://orcid.org/0000-0003-1322-1438>, ybr.ybr.90@inbox.ru

Irina Yu. Kirtsideli — D.Sci. in Biology, Senior Researcher, Komarov Botanical Institute RAS, 197022, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 18836134100, <https://orcid.org/0000-0002-7232-996X>, microfungi@mail.ru

The article was submitted to the editorial office 17.02.2023

Approved after review 22.05.2024

Accepted for publication 30.08.2024