

Экспериментальное изучение воздействия ультразвука на микроперифитон искусственных субстратов с целью защиты от биопомех систем технического водоснабжения атомных электростанций

Е. Л. Неврова^{1*}, А. Н. Петров¹, Н. А. Мороз², А. Б. Касьянов²

¹ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

² АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», Москва, Россия

* e-mail: el_nevrova@mail.ru

Аннотация

При эксплуатации атомных электростанций в элементах системы технического водоснабжения формируются биопомехи, приводящие к нарушению эксплуатации оборудования, недовыработке электроэнергии и экономическим потерям. Одним из методов предотвращения биообрастания на погружных поверхностях является воздействие ультразвука. С целью изучения особенностей развития биообрастания в водоводах атомной электростанции оценено воздействие ультразвукового устройства на формирование таксоценоза бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) – первичного звена сукцессии сообщества микрообрастания. Микроперифитон, состоящий из диатомовых, бактерий и простейших, образует биопленку на поверхностях и способствует активному развитию сообщества макрообрастания, приводя к дальнейшему снижению эффективности атомных электростанций. В условиях лаборатории и морской акватории проведены длительные эксперименты по исследованию влияния работы ультразвукового устройства при разной мощности и продолжительности излучения на развитие перифитона на образцах субстрата из стали и бетона. Выявлено, что повышение интенсивности работы ультразвукового устройства оказывает выраженное влияние на микрообрастание субстратов, снижая плотность поселения и видовое богатство диатомовых. По итогам исследования рекомендовано расширение экспериментов с использованием полнофункционального ультразвукового устройства более высокой мощности при эксплуатации атомной электростанции.

Ключевые слова: биообрастание, ультразвуковые методы защиты, технологическое оборудование АЭС, бентосные диатомовые, Bacillariophyta

Благодарности: исследование проведено в отделе экологии бентоса ФИЦ ИнБЮМ РАН по госзаданию № 121030100028-0 (тема: «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана»), а также в рамках инициативных

© Неврова Е. Л., Петров А. Н., Мороз Н. А., Касьянов А. Б., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

работ АО «ВНИИАЭС». Авторы благодарны вед. инж. ИнБЮМ С. А. Трофимову, Ю. И. Литвину, инж. 1 кат. АО «ВНИИАЭС» С. Л. Тарасюку за помощь при проведении экспериментов, а также начальнику лаборатории микроскопии ИнБЮМ В. Н. Лишаеву – за помощь при фотографировании на СЭМ.

Для цитирования: Экспериментальное изучение воздействия ультразвука на микроперифитон искусственных субстратов с целью защиты от биопомех систем технического водоснабжения атомных электростанций / Е. Л. Неврова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 98–113. EDN JCUYKV.

Experimental Study of Ultrasound Effect on Microperiphyton of Artificial Substrates for Fouling Protection of Technical Water Supply Circuit of Nuclear Power Plants

E. L. Nevrova^{1*}, A. N. Petrov¹, N. A. Moroz², A. B. Kasyanov²

¹ *A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
Sevastopol, Russia*

² *All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation JSC,
Moscow, Russia*

* e-mail: el_nevrova@mail.ru

Abstract

During exploitation of nuclear power plants, biofouling forms in the elements of the technical water supply circuit, which results in equipment malfunction, underproduction of electricity, and economic losses. One of the methods to prevent biofouling on immersed surfaces is ultrasound exposure. To study the peculiarities of biofouling development in water pipelines of a nuclear power plant, the impact of an ultrasonic device on the formation of benthic diatom algae (Bacillariophyta) – the primary stage in the succession of the microfouling community – was assessed. Microperiphyton consisting of diatoms, bacteria, and protozoa, forms biofilm on surfaces and promotes active development of macrofouling community leading to further reduction of efficiency of nuclear power plants. Long-term experiments were carried out in the laboratory and nearshore marine area to study the influence of ultrasonic device at different power and duration of exposure on periphyton development on steel and concrete samples. It was found that increasing the intensity of the ultrasonic device has a pronounced effect on microfouling of substrates reducing the abundance and species richness of diatoms. Based on the results, it was recommended to extend the experiments using a full-function ultrasonic device of higher power during exploitation of a nuclear power plant.

Keywords: biofouling, ultrasonic protection methods, nuclear power plant process equipment, benthic diatom, Bacillariophyta

Acknowledgments: The work was carried out in the Benthic Ecology Department of the Federal Research Center of IBSS under state assignment no. 121030100028-0 (“Regularities of formation and anthropogenic transformation of biodiversity and bioresources of the Azov-Black Sea basin and other regions of the World Ocean”) and under initiative works of VNIIAES JSC. The authors are grateful to leading engineers of IBSS S. A. Trofimov and Yu. I. Litvin and to engineer of VNIIAES JSC S. L. Tarasyuk for carrying out the experiments, as well as to head of Laboratory of Microscopy of IBSS V. N. Lishaev for SEM microphotographing.

For citation: Nevrova, E.L., Petrov, A.N., Moroz, N.A. and Kasyanov, A.B., 2023. Experimental Study of Ultrasound Effect on Microperiphyton of Artificial Substrates for Fouling Protection of Technical Water Supply Circuit of Nuclear Power Plants. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 98–113.

Введение

В последние десятилетия наблюдается тенденция к перемещению тепловых и атомных электростанций (ТЭС, АЭС) на морские побережья для забора больших объемов воды, необходимых для систем технического водоснабжения (СТВ). При этом возникают различные проблемы, связанные с развитием организмов-обрастателей в водоводах. Условно эти проблемы относятся к трем типам [1]: физическое обрастание трубопроводов и вызванные им эксплуатационные биопомехи; механическое повреждение и гибель гидробионтов (планктона и личинок различных видов бентоса, икринок и молоди рыб) после прохождения через системы водоснабжения [2]; воздействие на прибрежные водные экосистемы отработанных вод (в том числе термальных) [2, 3]. Таким образом, морское обрастание представляет собой и экологическое, и антропогенно-технологическое явление, которое необходимо учитывать при разработке концепции борьбы с биопомехами [1, 4].

Образованию и развитию сообществ обрастания (микро- и макрофиты, моллюски, усоногие раки, трубчатые полихеты, асцидии и др.) на СТВ АЭС способствует бактериально-водорослевая биопленка – начальный этап сукцессии перифитона на поверхностях оборудования, контактирующего с водой. При интенсивном развитии популяций видов-обрастателей в водоемах-охладителях и водоемах подпитки АЭС возникают комплексные нарушения эксплуатации СТВ, активизируется коррозия, уменьшается рабочее сечение трубопроводов и теплообменников, отказывают технологические системы (в том числе системы безопасности), что приводит к снижению эффективности работы энергоблоков АЭС и экономическим потерям [5–7]. В последние годы суммарный ущерб от биообрастания на АЭС и ТЭС превысил 11 млрд. руб.

Меры борьбы с биообрастанием подразделяют на физические, химические и биологические либо комплексные [1, 5, 8]. Физические методы включают очистку СТВ с помощью сжатого воздуха, повышения температуры воды в трубопроводах, катодной защиты, генерации электрополя, ультрафиолетового (УФ) либо ультразвукового (УЗ) излучения [1, 4, 8]. Методы УЗ борьбы с обрастанием включают облучение оборудования, что вызывает эффект кавитации в тканях гидробионтов, снижает их способность к оседанию на субстрат и последующему росту [1, 6]. Известно, что почти полную гибель личинок двусторчатого моллюска дрейссены вызывает непрерывное УЗ воздействие мощностью 100–800 Вт, напряжением 438 В и частотой 17–22 кГц в течение нескольких суток, при этом процент гибели резко возрастает с увеличением частоты и силы звукового давления [5, 6, 9, 10]. Недостатком данного метода является большой расход электроэнергии.

Мониторинг развития биопомех, превентивное воздействие и минимизация их влияния на работу СТВ АЭС относятся к наиболее актуальным задачам в АО «Концерн Росэнергоатом» [6]. По результатам выполнения АО «ВНИИАЭС» аванпроекта по теме «Разработка технологии борьбы с биологическим обрастанием технологического оборудования систем оборотного водо-

снабжения на АЭС (АП-19/246)» установлено, что разработанное ультразвуковое устройство (УЗУ) является эффективным инструментом по борьбе с биопомехами и его применение позволяет комплексно осуществлять превентивную защиту оборудования от обрастания и избегать остановки СТВ, вывода в ремонт и чистки [1, 6]. Испытания в лаборатории ООС Ростовской АЭС показали, что опытный образец УЗУ разрушает друзы дрейссены (*Dreissena polymorpha* L.), прочно прикрепленные к погруженным в воду элементам СТВ [6].

В 2021–2022 гг. совместно с отделом экологии бентоса ФИЦ ИнБЮМ протестировано воздействие модернизированного УЗУ на формирование обрастания на искусственных субстратах. Лабораторный этап эксперимента проведен в условиях имитации морской среды, полевой этап – в морской акватории радиобиологического корпуса (РБК) ИнБЮМ.

Выбор бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) в качестве тест-объектов обусловлен их значимостью в водных экосистемах как первичного трофического звена, массовым распространением и преобладанием в микрофитобентосе по численности, биомассе и видовому богатству [11]. Вследствие высокой чувствительности к внешним факторам диатомовые служат индикаторами при оценке качества водной среды, а также при проверке эффективности работы противообрастающих устройств и биоцидных лакокрасочных покрытий [11–13]. Микрообрастание, состоящее из бактерий, диатомовых и простейших, образует первичную биопленку на подводных поверхностях, в том числе на СТВ [7, 12], что способствует активному развитию сообщества макрообрастания и приводит к дальнейшему снижению эффективности эксплуатации АЭС [7, 14].

Цель работы – на основе изучения структуры таксоцена бентосных диатомовых в ходе долговременных лабораторных и полевых экспериментов оценить эффективность УЗУ с разными режимами излучения для защиты от микрообрастания гидротехнических сооружений. Задачи: 1) выявить различия в показателях обилия и видового богатства бентосных диатомовых при формировании микрофитоперифитона на пластинах из бетона и стали; 2) оценить динамику интенсивности обрастания диатомовыми различными субстратов в контроле и при разных режимах работы УЗУ.

Материал и методы

В ходе первого этапа в лабораторных условиях, имитирующих морскую среду, использованы опытные образцы субстрата: металлические пластины размером 5.5 × 6.5 см из нержавеющей стали марки А-3 и бетонные пластины размером 10 × 18 см из цемента марки М-500. Образцы закреплены на держателях и размещены в 40-литровых контейнерах – контрольном (КК) и экспериментальном (ЭК), по 13 шт. стальных и бетонных пластин в каждом (рис. 1, а, б). Контейнеры заполняли нефилтрованной морской водой, отобранной из б. Севастопольской. Полную смену воды в контейнерах проводили с интервалом двое суток, продолжительность каждой серии экспериментов – четыре недели. В процессе эксперимента на образцы из стали и бетона последовательно оседали компоненты перифитона: бактерии → диатомовые → личинки зообентоса. ЭК подвергали воздействию ультразвука, генерируемого кассетой из пяти высокочастотных излучателей с постоянной мощностью



Рис. 1. Длительный эксперимент в лабораторных условиях: *a* – КК с пластинами из бетона и стали; *b* – ЭК с УЗУ и такими же пластинами; *c* – приборы для регулирования временного и мощностного режима работы УЗУ (*сверху*) и устройство для охлаждения и термостатирования HAILEA (*снизу*)

Fig. 1. Long-term laboratory experiment: *a* – control container (CC) with concrete and stainless steel plates; *b* – test container (TC) with the ultrasonic device (USD) and similar plates; *c* – devices for setting the time and power modes of USD operation (*top*) and HAILEA device for water cooling and temperature control (*bottom*)

500 Вт, частотой 27.1–27.3 кГц и силой тока 3 А. Периодичность озвучивания составляла три раза в неделю по 4 ч (рис. 1, *c*). Расстояние от излучателей до поверхности воды в ЭК составляло 10 см, КК был изолирован от УЗУ листами пенопласта, оргстекла и плотной резины толщиной 1.5 см. Для исключения нагрева морской воды в ЭК при работе УЗУ использован прибор HAILEA, термостатирующий воду в обоих контейнерах до 19.0 ± 0.5 °С (рис. 1, *c*). В лаборатории поддерживали постоянные условия освещения (8/16 ч) и вентиляции, необходимые для жизнедеятельности организмов. Эксперимент продолжали четыре месяца (с сентября по декабрь 2021 г.).

Ежемесячно из каждого контейнера изымали по два образца бетонных и стальных пластин, микрофитоперифитон с их поверхности соскабливали на участке 5.5×6.5 см и смывали фильтрованной морской водой. Объем каждого смыва доводили до 100 мл, подсчет клеток осуществляли под световым микроскопом *Carl Zeiss Axiostar+* при увеличении $\times 400$. Таксономическую идентификацию проводили по микрофотографиям постоянных препаратов, изготовленных по [11] и полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) *Hitachi SU3500*.

Для оценки количественного развития микроперифитона клетки диатомовых просчитывали в камере Горяева в двух повторностях, затем результаты пересчитывали на 1 м^2 поверхности субстрата [11]:

$$N = \frac{(a \cdot V)}{(S \cdot 10^{-4} \cdot 7 \cdot 10^{-3})},$$

где a – число клеток в объеме 0.007 мм^3 ; V – определенный объем пробы, 100 мм^3 ; S – площадь поверхности пробы, в нашем эксперименте равная 35.75 см^2 .

Для второго (полевого) этапа исследований были изготовлены контрольный (КС) и экспериментальный (ЭС) стенды с закрепленными на них пластинами из стали и бетона. В течение пяти месяцев (с апреля по сентябрь 2022 г.) стенды экспонированы на глубине $0.5\text{--}0.7 \text{ м}$ на дне защищенной от волн морской акватории у РБК ИнБЮМ (рис. 2). УЗУ размещено над ЭС на плавучей

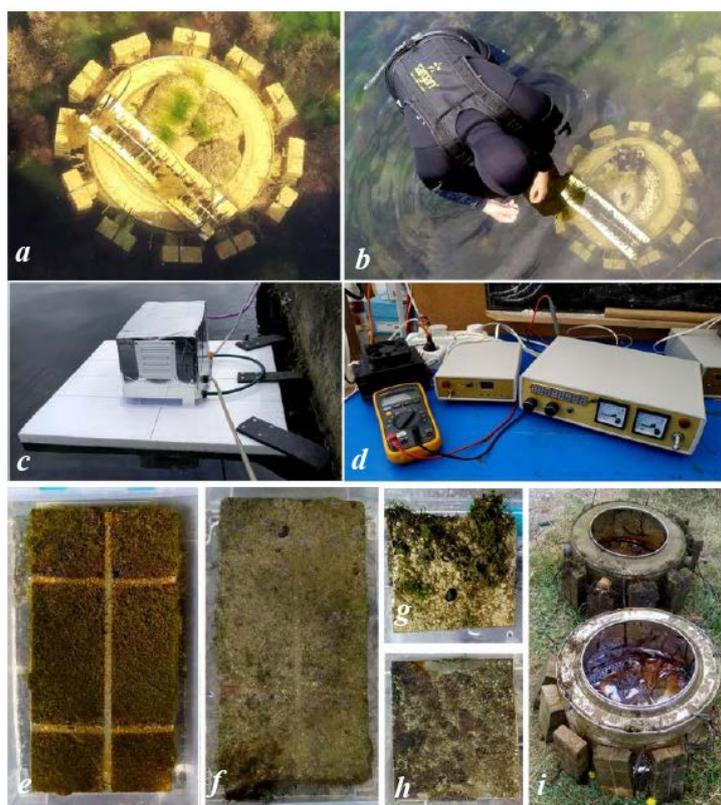


Рис. 2. Полевой эксперимент: a – общий вид КС с пластинами из бетона и стали; b – отбор образцов легководолазом; c – общий вид УЗУ, размещенного над ЭС; d – приборы для обеспечения временного и мощностного режима работы УЗУ; образцы бетона после 5-месячной экспозиции: e – контроль; f – после воздействия УЗ; образцы стали после 5-месячной экспозиции: g – контроль; h – после воздействия УЗ; i – общий вид КС (*сверху*) и ЭС (*снизу*) после 5-месячной экспозиции в море

Fig. 2. Long-term experiment in the water area: a – general view of the control stand (CS) with concrete and steel plates; b – sampling by a diver; c – USD installed above the test stand (TS); d – devices for setting and maintaining the time and power modes of USD operation; concrete plates after 5-month exposure: e – control; f – after exposure to USD; steel plates after 5-month exposure: g – control; h – after exposure to USD; i – control (*top*) and test (*bottom*) stands after 5-month exposure to sea water

платформе и защищено специальным чехлом от воздействия волн, атмосферных осадков и солнечного излучения (рис. 2, *c*). Расстояние от излучателей до поверхности воды составляло 20 см. Контрольный стенд (КС) установлен в акватории на расстоянии 30 м от ЭС за бетонным блоком, который экранировал КС от возможного воздействия УЗУ. В течение эксперимента температура воды в акватории сезонно возрастала от 10 до 25.0 ± 0.5 °С. Ежемесячно с обоих стендов снимали по две пластины каждого типа субстрата и в лаборатории определяли численность и видовое богатство диатомовых по указанной выше методике [11].

В течение первых месяцев экспозиции на ЭС воздействовало УЗУ со следующими параметрами: мощность 500 Вт, частота 27.5 ± 5 % кГц, сила тока 3 А, периодичность работы три раза в неделю по 4 ч в день. С июля 2022 г. продолжительность воздействия УЗУ на ЭС увеличена до 8 ч в день с периодичностью пять раз в неделю (рис. 2, *d*). Эксперимент закончен 21.09.2022 вследствие начала сезона осенних штормов.

Результаты и обсуждение

Лабораторный этап. По итогам первого этапа эксперимента отмечено разное состояние морской воды в контейнерах. В ЭК пластины из бетона и стали оставались визуально чистыми, вода была прозрачной в течение всего времени наблюдения. Вода в КК уже через две недели (несмотря на постоянную смену через каждые двое суток) была замутненной, вероятно, из-за метаболитов, выделяемых организмами обрастания и полисахаридов диатомовых. В течение эксперимента показатели плотности поселения и видового богатства диатомовых в КК как на бетонных, так и на стальных пластинах значительно превышали эти показатели в ЭК (рис. 3). Через четыре месяца средняя плотность поселения диатомовых на бетоне в КК составила $90.327 \cdot 10^6$ экз./м², количество видов – 14 (рис. 3, *a*), в ЭК – $0.893 \cdot 10^6$ экз./м² и 3 вида (рис. 3, *b*) соответственно. Отметим, что в первый месяц экспозиции на стальных пластинах в КК и ЭК не было отмечено клеток диатомовых, что может быть вызвано гладкостью стальной поверхности, не способствующей оседанию и первичному прикреплению диатомовых и личинок организмов микрозооперифитона. Через четыре месяца в КК средняя численность диатомовых на стальных пластинах составила $124.28 \cdot 10^6$ экз./м², количество видов – 11 (рис. 3, *c*), а в ЭК – только $7.14 \cdot 10^6$ экз./м² и 3 вида (рис. 3, *d*) соответственно.

По результатам лабораторного эксперимента сделан вывод, что даже при относительно малой мощности ультразвукового облучения, работа УЗУ обеспечивает превентивную защиту субстратов из бетона и металла от оседания на них основных компонентов фитоперифитона. Кроме того, УЗ воздействие способствует механическому очищению пластин от поверхностных загрязнений и метаболитов гидробионтов.

Полевой этап. В течение полевого этапа эксперимента в морской акватории при формировании обрастания на образцы субстрата из металла и бетона последовательно оседали фито- и зоокомпоненты перифитона: бактерии, диатомовые, проростки макрофитов (из отделов Chlorophyta, Ochrophyta, Rhodophyta), личинки моллюсков, полихет, усоногих раков. Отмечена

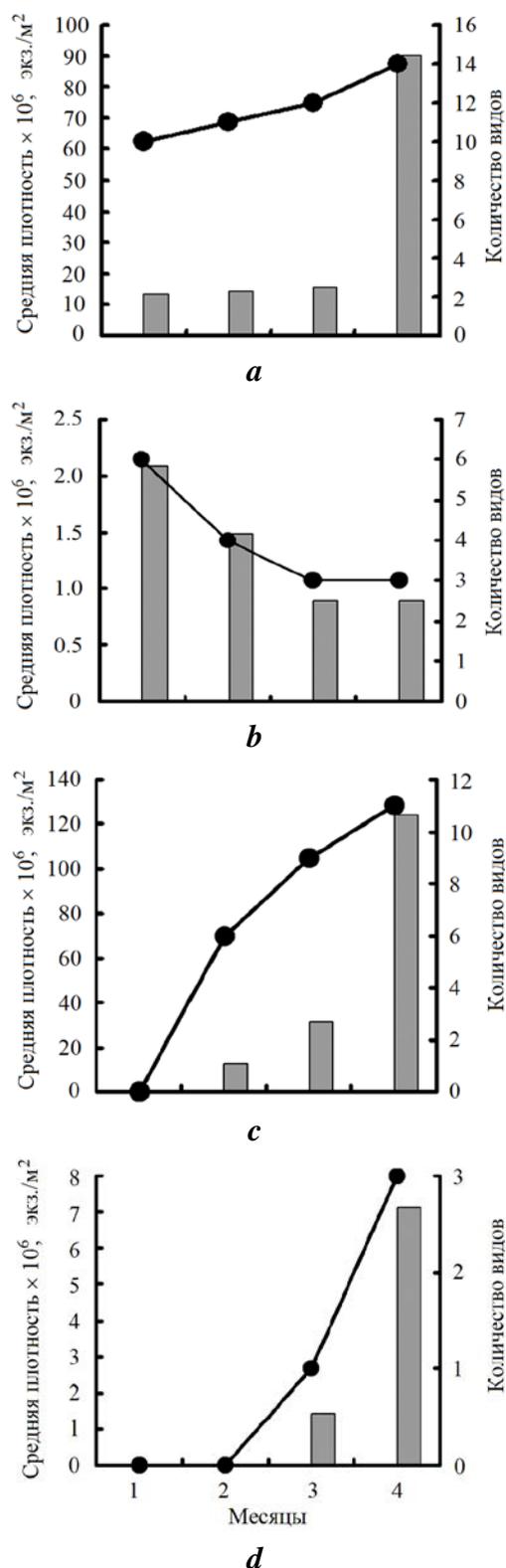


Рис. 3. Лабораторный эксперимент: показатели бентосных диатомовых в контроле и под воздействием УЗУ на бетоне (*a* – КК; *b* – ЭК) и стали (*c* – КК; *d* – ЭК). Столбики – плотность поселения, кружки – видовое богатство диатомовых

Fig. 3. Laboratory experiment: values of benthic diatoms in the control and exposed to the USD on concrete (*a* – CC; *b* – TC) and steel plates (*c* – CC; *d* – TC). The bars are abundance and the circles are species richness of diatoms

вариабельность параметров развития микрофитоперифитона на обоих типах субстратов и стендов, обусловленная рядом причин, среди которых можно назвать как изменения гидрологической обстановки в море, так и активацию развития таксоцены диатомовых – ответную стресс-реакцию на воздействие УЗУ в начальный период эксперимента.

Результаты первого месяца эксперимента в море показали, что действие УЗУ мощностью 500 Вт, частотой излучения 27.5 ± 5 % кГц и силой тока 3 А при продолжительности работы по четыре часа три раза в неделю существенно стимулировало формирование микрофитоперифитона на образцах бетона и стали на экспериментальном стенде (ЭС) (рис. 4).

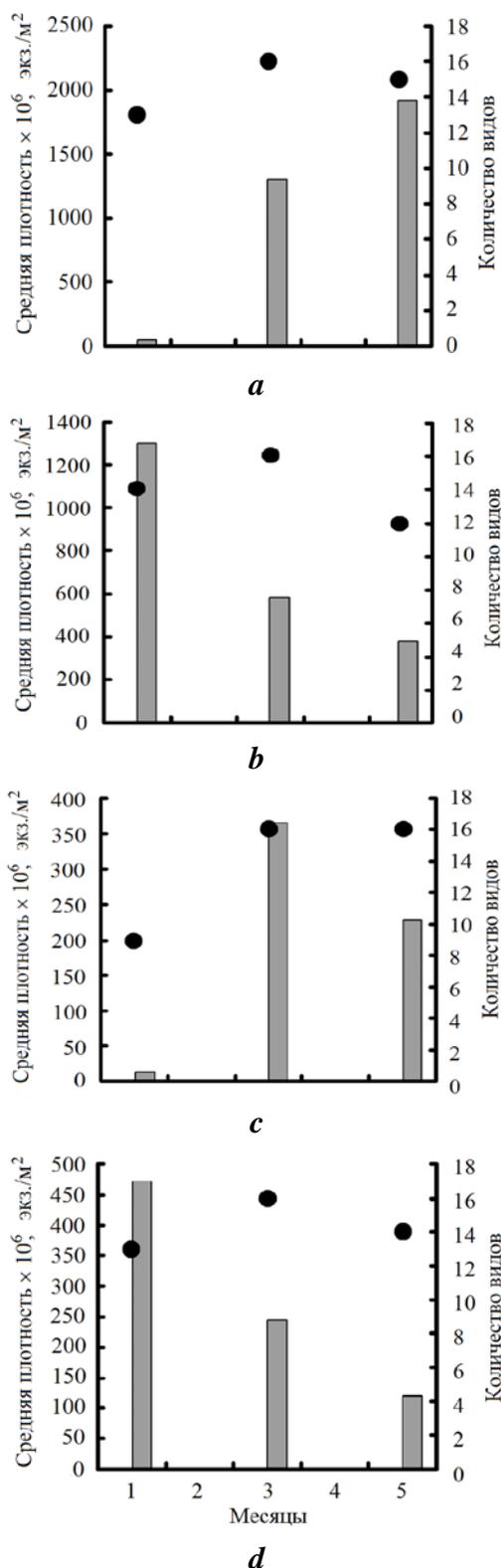
В первый месяц экспозиции в обрастании бетонных и стальных пластин КС отмечена наименьшая плотность поселения диатомовых ($45.5 \cdot 10^6$ и $14 \cdot 10^6$ экз./м² соответственно). Напротив, на ЭС показатели обилия диатомовых превышали эти показатели на КС в десятки раз: $1302 \cdot 10^6$ экз./м² – на бетонных образцах и $472 \cdot 10^6$ экз./м² – на стальных.

Рис. 4. Натурный эксперимент: показатели бентосных диатомовых в контроле и под воздействием УЗУ на бетоне (*a* – КК; *b* – ЭК) и стали (*c* – КК; *d* – ЭК). Столбики – плотность поселения, кружки – видовое богатство диатомовых

Fig. 4. Field experiment: values of benthic diatoms in the control and exposed to the USD on concrete (*a* – CS; *b* – TS) and steel (*c* – CS; *d* – TS). The bars are abundance and the circles are species richness of diatoms

На ЭС в первый месяц также отмечено наибольшее видовое богатство Bacillariophyta – 14 видов на бетоне (рис. 4, *b*) и 13 на стали (рис. 4, *d*). По-видимому, излучение УЗУ с указанными параметрами в этот период эксперимента не только не подавляет развитие микроперифитона, но и вызывает стимулирующий эффект, что ранее отмечалось в подобных исследованиях и другими авторами [1, 10]. С учетом результатов первого месяца далее интенсивность УЗУ была увеличена: с июля продолжительность излучения составила 8 ч в день, периодичность – 5 раз в неделю. Параметры мощности, частоты излучения и силы тока оставлены неизменными. После трехмесячной экспозиции на КС плотность поселения диатомовых на бетоне составила $1305 \cdot 10^6$ экз./м², в то время как на ЭС она уменьшилась более чем в два раза – до $585 \cdot 10^6$ экз./м² (рис. 4, *a, b*). На стали на КС насчитано $365.5 \cdot 10^6$ экз./м², а на ЭС – $244.5 \cdot 10^6$ экз./м² (рис. 4, *c, d*). Видовое богатство диатомовых на КС и ЭС было сходным: по 16 видов на обоих типах субстратов.

После пяти месяцев экспозиции на ЭС плотность поселения диатомовых существенно уменьшилась

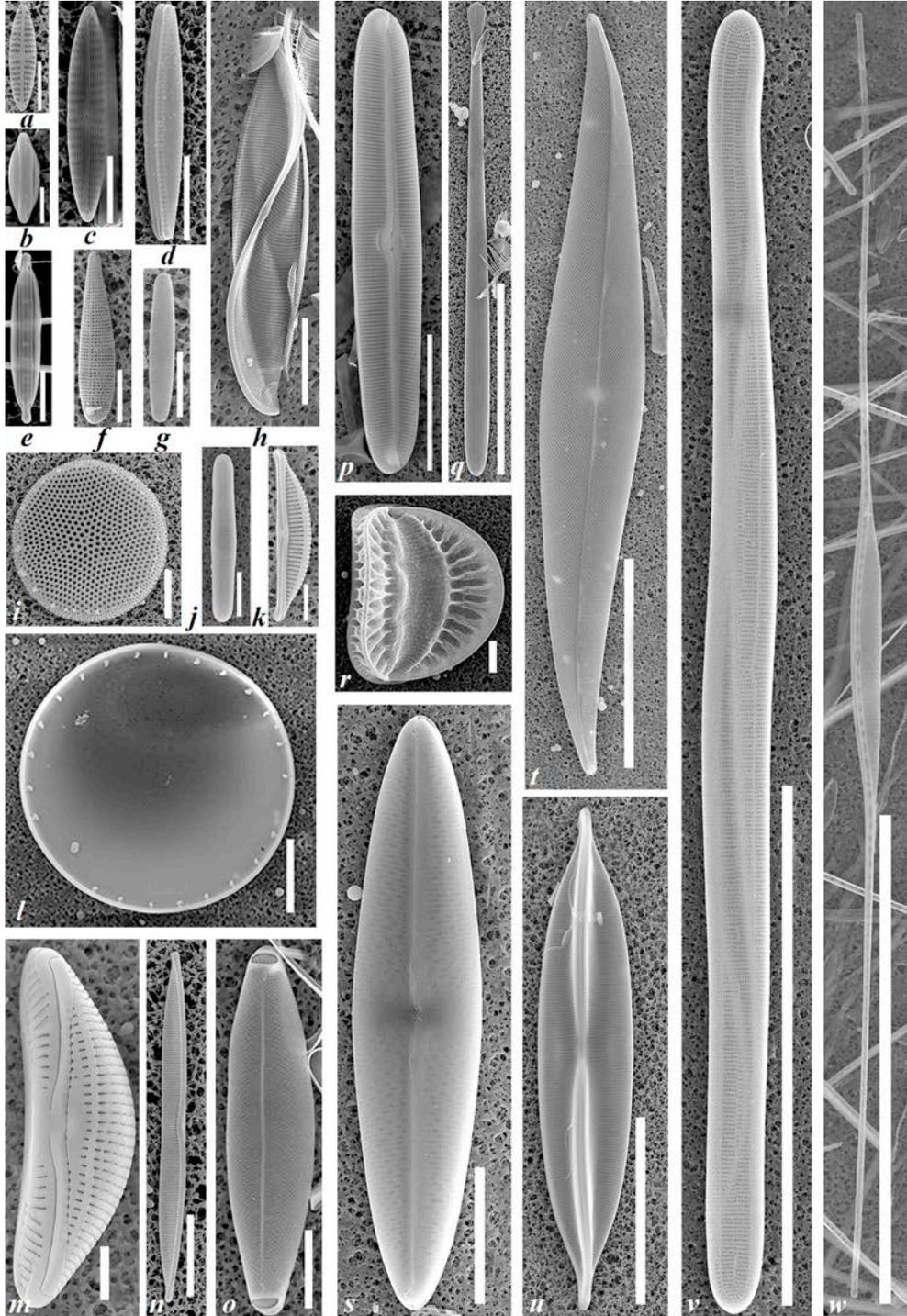


по сравнению с КС (см. рис. 2, *i*). Ту же картину наблюдали и при финальном осмотре субстрата: пластины из бетона и стали на КС значительно отличались по плотности фитоперифитона (см. рис. 2, *e, f*) от таких пластин на ЭС (см. рис. 2, *g, h*). Наименьшая плотность поселения диатомовых по окончании эксперимента отмечена в обрастании стальных пластин ЭС ($121 \cdot 10^6$ экз./м²). На стальных образцах КС зафиксировано вдвое большее количество клеток – $228 \cdot 10^6$ экз./м² (рис. 4, *c, d*). На бетонном субстрате ЭС показатель плотности Bacillariophyta был в четыре раза меньше ($385 \cdot 10^6$ экз./м²), чем на КС ($1553.5 \cdot 10^6$ экз./м²) (рис. 4, *a, b*). Очевидно, что интенсивность заселения диатомовыми гладкого стального субстрата ниже, чем бетонного с шероховатой поверхностью, обеспечивающей лучшую адгезию клеток. Важно отметить, что показатели плотности поселения диатомовых на обоих типах пластин на ЭС после пяти месяцев воздействия УЗУ с увеличенной интенсивностью значительно снизились, по сравнению с начальным периодом эксперимента.

В составе микрофитоперифитона выявлено 30 массовых видов, относящихся к 21 роду, 17 семействам, 13 порядкам и 3 классам бентосных Bacillariophyta (рис. 5). Преобладали представители класса Bacillariophyceae – 22 вида, из класса Fragilariophyceae отмечено 5 видов, из класса Coscinodiscophyceae – 3 вида. Во всех вариантах, независимо от условий эксперимента и типа субстрата, резко доминировали мелкоклеточные виды из родов *Navicula* Borg 1822 и *Nitzschia* Hassall 1845, отличающиеся наибольшей скоростью деления и устойчивостью к стрессовым факторам.

Максимальная плотность поселения *Nitzschia* sp.1 на пятый месяц эксперимента на бетоне КС составила $1178.5 \cdot 10^6$ экз./м², *Navicula perminuta* Grunow – $831 \cdot 10^6$ экз./м². К субдоминантам отнесены *Thalassiosira excentrica* (Ehrenb.) Cleve ($203.5 \cdot 10^6$ экз./м²), *Nitzschia longissima* (Bréb. ex Kütz.) Grunow ($87 \cdot 10^6$ экз./м²), *Caloneis liber* (W. Sm.) Cleve ($31.5 \cdot 10^6$ экз./м²), *Nitzschia* sp. 2 ($19 \cdot 10^6$ экз./м²), *Amphora marina* (W. Sm.) Chase ($11 \cdot 10^6$ экз./м²), *Licmophora gracilis* (Ehrenb.) Grunow ($9 \cdot 10^6$ экз./м²), *Pleurosigma elongatum* W. Sm. ($4.5 \cdot 10^6$ экз./м²), *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin ($4 \cdot 10^6$ экз./м²), *Entomoneis paludosa* (W. Sm.) Reimer ($3 \cdot 10^6$ экз./м²). Численность остальных видов изменялась от 0.5 до $2.5 \cdot 10^6$ экз./м².

Таким образом, увеличение продолжительности и частоты воздействия УЗУ после пяти месяцев экспозиции в море оказало выраженное ингибирующее влияние на формирование таксоценоза диатомовых водорослей (основного компонента микроперифитона), способствуя уменьшению его плотности поселения и видового богатства на обоих типах субстрата. Данные наших экспериментов в целом согласуются с полученными ранее результатами других исследователей и позволяют расширить накопленные сведения по оценке влияния ультразвука на резистентность и выживание разных групп перифитона. В частности, показано [10], что даже при кратковременном (до 1–2 мин.) воздействии УЗУ частотой около 17 кГц и давлением от 1700 до 5000 бар отмечена потеря способности к прикреплению и последующая почти 100%-ная элиминация личинок зооперифитона (циприсы баянусов и др.). Результаты комбинированного применения УЗУ мощностью 0.12 кВт и частотой 25 кГц и УФ лампы мощностью 30 Вт показали, что совместное УФ–УЗ облучение перифитона фильтров установки водоснабжения вызывает



Р и с . 5 . Доминирующие виды бентосных диатомовых на бетонном и стальном субстратах (СЭМ): *a* – *Navicula perminuta*; *b* – *Nitzschia* sp.1; *c* – *Navicula parapontica*; *d* – *Tabularia affinis*; *e* – *Nitzschia* sp.2; *f* – *Licmophora gracilis*; *g* – *Microtabella delicatula*; *h* – *Entomoneis paludosa*; *i* – *Thalassiosira excentrica*; *j* – *Grammatophora marina*; *k* – *Amphora* sp.; *l* – *Actinocyclus subtilis*; *m* – *Amphora marina*; *n* – *Nitzschia hybrida*; *o* – *Striatella unipunctata*; *p* – *Caloneis liber*; *q* – *Licmophora flabellata*; *r* – *Campylodiscus thuretii*; *s* – *Trachyneis aspera*; *t* – *Pleurosigma elongatum*; *u* – *Plagiotropis lepidoptera*; *v* – *Ardissonea crystallina*; *w* – *Nitzschia longissima*. Размерная шкала: *a, c, e, f, g, k, m* – 5 мкм; *b* – 3 мкм; *d, h, i, j, o, s, r* – 10 мкм; *l, p, s* – 20 мкм; *q, t* – 50 мкм; *u* – 30 мкм; *v, w* – 100 мкм

Fig. 5. Dominant species of benthic diatoms on concrete and steel substrates (SEM): *a* – *Navicula perminuta*; *b* – *Nitzschia* sp.1; *c* – *Navicula parapontica*; *d* – *Tabularia affinis*; *e* – *Nitzschia* sp.2; *f* – *Licmophora gracilis*; *g* – *Microtabella delicatula*; *h* – *Entomoneis paludosa*; *i* – *Thalassiosira excentrica*; *j* – *Grammatophora marina*; *k* – *Amphora* sp.; *l* – *Actinocyclus subtilis*; *m* – *Amphora marina*; *n* – *Nitzschia hybrida*; *o* – *Striatella unipunctata*; *p* – *Caloneis liber*; *q* – *Licmophora flabellata*; *r* – *Campylodiscus thuretii*; *s* – *Trachyneis aspera*; *t* – *Pleurosigma elongatum*; *u* – *Plagiotropis lepidoptera*; *v* – *Ardissonea crystallina*; *w* – *Nitzschia longissima*. Scale bar: *a, c, e, f, g, k, m* – 5 μm; *b* – 3 μm; *d, h, i, j, o, s, r* – 10 μm; *l, p, s* – 20 μm; *q, t* – 50 μm; *u* – 30 μm; *v, w* – 100 μm

достоверное снижение встречаемости *Ciliata* и *Oligochaeta* уже после 72 ч действия, но в то же время не оказывает заметного влияния на численность раковинных амёб, колеровок и других форм паразитических инфузорий [9].

Укажем, что отмеченный в первый месяц эксперимента *in situ* эффект стимулирования развития микроводорослей описан в работах по токсикологии и физиологии¹⁾ как первая стадия (активация) отклика тест-объекта при воздействии различных токсикантов, электромагнитных полей и иных стрессоров [13, 14]. Данное явление, по-видимому, обусловлено краткосрочной реакцией микроводорослей на воздействие УЗУ, выражающейся в мобилизации их адаптационных возможностей и интенсификации деления клеток [15]. На третий месяц воздействия УЗУ с повышенными параметрами отмечено уменьшение плотности поселения диатомовых, отражающее снижение сопротивляемости на второй стадии стресса (ингибирование). Известно, что близость к биообъекту излучателей УЗУ и их прямое воздействие способно разрушать мембраны и органеллы одноклеточных организмов, а также инактивировать ферменты [15–17].

И наконец, на пятый месяц эксперимента под воздействием УЗУ наступает третья стадия стресса (истощение адаптивных возможностей и элиминация диатомовых), что выражается в уменьшении на несколько порядков численности клеток микроводорослей на обоих типах субстратов на ЭС. В водной толще УЗ излучение хорошо распространяется на большую площадь и может препятствовать прикреплению свободноживущих форм организмов, особенно микроперифитона, уничтожать микропланктон и бактерии даже на удалении от работающего УЗУ, тем самым ухудшая кормовой ресурс хищных

¹⁾ Принципы и методы экологической токсикологии / Д. Б. Гелашвили [и др.]. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2016. 704 с.

организмов, а также подавлять жизнеспособность некоторых групп перифитона. Доказана эффективность сочетанного действия ультрафиолета и ультразвука для повышения качества воды при ее очистке и обеззараживании от условно-патогенных организмов при использовании в аквакультуре и в системах замкнутого водоснабжения [17, 18].

Отметим, что УЗ волны, в отличие от жесткого излучения, не обладают аккумулярующим действием, поэтому длительное УЗ излучение со слабой интенсивностью не вызывает заметных изменений у облучаемых организмов перифитона. Напротив, кратковременное импульсное излучение повышенной мощности может оказать более выраженный эффект на сообщество обрастания, чем слабое, но непрерывное озвучивание. Однако даже при непрерывном УЗ воздействии слабых и заведомо нелетальных доз еще невозможно установить степень ингибирования перифитона только по отсутствию ответного отклика организмов. Так, при облучении ультразвуком ниже порогового уровня признаки подавляющего воздействия у разных групп биоты могут отсутствовать, но при этом может возникать обратный эффект – стимулирование процессов развития и роста организмов-обрастателей, как это наблюдалось на ЭС в начальный период полевого эксперимента.

По итогам полевого эксперимента можно заключить, что поскольку чувствительность разных групп организмов перифитона к облучению ультразвуком различна, необходимо подбирать универсальные пороговые параметры для достижения наибольшего эффекта УЗУ (исключая жесткие дозы, опасные для биоты). Например, личинки раков-балабусов могут отмирать и осыпаться с экспериментальных пластин уже при низких уровнях УЗ воздействия, тогда как осевшая молодь усоногих раков или мелкие моллюски способны сохранять жизнеспособность и при более высоких уровнях облучения. Для повышения эффективности УЗУ следует также учитывать сезонные аспекты сукцессии перифитона на различных субстратах. Очевидно, что в период весенне-летнего пика развития организмов обрастания и наибольшей интенсивности оседания и формирования первичной пленки на поверхностях СТВ интенсивность УЗУ должна быть выше, чем в осенне-зимний период.

В целом результаты лабораторных и натуральных исследований показывают, что задачи обеспечения УЗ защиты от обрастания оборудования СТВ должны решаться не только путем повышения мощности и интенсивности воздействия УЗУ, заведомо вызывающего быстрое и полное отмирание всех эколого-таксономических групп обрастателей на облучаемых поверхностях. Необходимо также осуществить подбор таких параметров озвучивания, которые способны превентивно препятствовать формированию перифитона: оседанию и прикреплению микрофитов, макрофитов и зообентоса, последующему их росту и развитию. Представляется важным расширение лабораторных и полевых исследований по изучению УЗ воздействия различной продолжительности и периодичности на выживание и развитие отдельных групп перифитона для достижения максимального эффекта защиты СТВ ТЭС и АЭС. Следует также учитывать необходимость минимизации негативного влияния ультразвука на состояние иных компонентов водных сообществ в экосистемах водоемов-охладителей.

Заключение

На начальном этапе эксперимента по изучению ультразвукового воздействия отмечено стимулирование развития микроперифитона как на бетонном, так и на металлическом субстрате.

Увеличение продолжительности и периодичности воздействия УЗУ оказало выраженный эффект на формирование таксоценоза диатомовых водорослей – основного компонента микроперифитона бетонного и стального субстрата. По истечении пяти месяцев эксперимента с повышенной интенсивностью УЗУ выявлено значительное уменьшение плотности поселения и видового богатства диатомовых на металле и бетоне, по сравнению с предыдущими месяцами. На обоих типах субстрата, независимо от условий эксперимента, доминировали мелкоклеточные виды из родов *Navicula* и *Nitzschia*. Всего обнаружено 30 видов бентосных диатомовых, относящихся к 21 роду, 17 семействам, 13 порядкам и 3 классам Bacillariophyta.

Результаты лабораторных и натуральных испытаний позволяют рекомендовать продолжение экспериментов на полнофункциональном УЗУ более высокой мощности непосредственно при эксплуатации АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягинцев А. Ю., Полтаруха О. П., Масленников С. И. Обрастание морских систем технического водоснабжения и анализ методов защиты от обрастания в водоемах (аналитический обзор) // Вода: химия и экология. 2015. № 1. С. 30–51. EDN TWNISJ.
2. Милейковский С. А. Влияние прохождения через системы водяного охлаждения прибрежных электростанций и промышленных предприятий на воспроизводство и продуктивность морского и эстуарного планктона, бентоса и нектона // Обрастание и биокоррозия в водной среде. Москва : Наука, 1981. С. 131–137.
3. Влияние атомных и тепловых электростанций на зоопланктон водоемов-охладителей / Н. В. Карташева [и др.] // Вестник Московского университета. Биология. 2008. № 3. С. 30–35. EDN JUTZLP.
4. Biofouling / Edited by S. Dürr, J. R. Thomason. Chichester : Blackwell Publishing Ltd, 2010. 456 p.
5. Борьба с биообрастаниями – важная задача энерго- и ресурсосбережения / М. Л. Калайда [и др.] // Энергетика Татарстана. 2008. № 2. С. 51–55. EDN KWGRSL.
6. Методы борьбы с биообрастаниями на атомной электростанции / Н. А. Мороз [и др.] // Проблемы создания защитных покрытий нового поколения от коррозии, биообрастания и обледенения для морских, береговых и сухопутных объектов / Под ред. М. И. Орловой, В. А. Родионова. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭУ, 2021. С. 94–103. EDN PKOOCR.
7. Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки / Под ред. А. А. Протасова. Киев : Институт гидробиологии НАН Украины, 2011. 234 с.
8. Способы борьбы с биологическими загрязнениями прудов-охладителей ТЭС и АЭС / В. Г. Фарберов [и др.] // Теплоэнергетика. 2004. № 6. С. 45–48. EDN PIBQQN.
9. Изменение состава перифитона элементов фильтрации установок замкнутого водоснабжения при совместном воздействии УФ-излучения и ультразвука / В. А. Климов [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 4. С. 113–122. EDN CMNJQY. doi:10.24143/2073-5529-2022-4-113-122

10. Долгопольская М. А. Аксельбанд А. М. Действие ультразвуковых колебаний на организмы морских обрастаний и процесс обрастания // Труды Севастопольской биологической станции. 1964. Т. 17. С. 309–324.
11. Неврова Е. Л. Разнообразие и структура таксонов бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) Черного моря. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2022. 329 с.
12. Ковальчук Ю. Л., Неврова Е. Л., Шалаева Е. А. Диатомовые обрастания твердых субстратов. Москва : КМК, 2008. 174 с.
13. Петров А. Н., Неврова Е. Л. Экспериментальная оценка токсикорезистентности бентосной микроводоросли *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) при воздействии ионов меди // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 78–87. EDN JARXWF. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-1-78-87
14. Раилкин А. И. Колонизация твердых тел бентосными организмами. Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2008. 427 с.
15. Evaluation of microalgae cell disruption by ultrasonic treatment / J. A. Gerde [et al.] // Bioresource Technology. 2012. Iss. 125. P. 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.110>
16. Ultrasonic frequency effects on the removal of *Microcystis aeruginosa* / G. Zhang [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2006. Vol. 13, iss. 5. P. 446–450. doi:10.1016/j.ultsonch.2005.09.012
17. Blume T., Martinez I., Neis U. Wastewater disinfection using ultrasound and UV light // 2nd International Conference: Ultrasound in Environmental Engineering, Hamburg, Germany, 21–22 March 2002. Hamburg, 2002. Vol. 35. P. 117–138.
18. Efficacy of integrated ultraviolet ultrasonic technologies in the removal of erythromycin- and quinolone-resistant *Escherichia coli* from domestic wastewater through a laboratory-based experiment / O. D. R. Annisha [et al.] // Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development. 2019. Vol. 9, no. 3. P. 571–580. doi:10.2166/washdev.2019.021

Поступила 27.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.06.2023 г.; принята к публикации 28.06.2023 г.; опубликована 25.09.2023 г.

Об авторах:

Неврова Елена Леонидовна, главный научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9963-4967**, **Scopus Author ID: 35277386100**, **ResearcherID: D-8434-2016**, el_nevrova@mail.ru

Петров Алексей Николаевич, руководитель отдела экологии бентоса, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0137-486X**, **Scopus Author ID: 8973404400**, **ResearcherID: F-7084-2016**, alexpet-14@mail.ru

Мороз Наталья Анатольевна, начальник отдела биохимических технологий и технологического обеспечения, АО «ВНИИАЭС» (109507, Россия, Москва, ул. Ферганская, 25), кандидат технических наук, sv_nata@mail.ru

Касьянов Анатолий Борисович, ведущий инженер, АО «ВНИИАЭС» (109507, Россия, Москва, ул. Ферганская, 25), papa_triad@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Неврова Елена Леонидовна – постановка задач исследования, анализ и интерпретация результатов, таксономическое определение диатомовых, подготовка графических материалов, формирование статьи

Петров Алексей Николаевич – анализ и обсуждение результатов, обзор литературы по теме исследования, редактирование рукописи

Мороз Наталья Анатольевна – постановка задач, обеспечение эксперимента, анализ и обсуждение результатов

Касьянов Анатолий Борисович – планирование эксперимента, создание и техническое обеспечение приборной базы эксперимента, проведение эксперимента, анализ и обсуждение результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.