

Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование

© 2026. А. В. Кузнецов^{1,2}, д. б. н., в. н. с., Д. Н. Втюрина³, к. х. н., с. н. с.,

¹Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, 299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2,

²Севастопольский государственный университет, 299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33,

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, 119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4, e-mail: kuznet61@gmail.com

Обрастание морских конструкций приводит к экономическим потерям из-за коррозии и повышенного гидродинамического сопротивления, что делает проблему актуальной для прикладной экологии. В отличие от традиционных подходов, таких как использование токсичных красок, перспективным решением представляется акустическое воздействие, требующее всесторонней оценки его влияния на морские экосистемы, что относится к сфере теоретической экологии. Таким образом, предотвращение обрастания является важной задачей, объединяющей экономические интересы и экологические исследования. В данной работе изучалось влияние звука малой мощности на процессы адгезии морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты в летний период 2024 г. Эксперимент проводился в двух идентичных ёмкостях, одна из которых служила контрольной, а в другой использовался акустический излучатель с диапазоном частот 0–30 кГц. Оседание *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791) на стеклянных пластинах в опытной группе значительно снижалось по сравнению с контрольной ($p < 0,01$). Экспериментальные данные подчёркивают многоступенчатость процесса обрастания. Имитационное моделирование, проведённое с использованием агентно-ориентированного подхода, выявило сложные структурные отношения внутри популяции обрастателей. Результаты важны для понимания экологических аспектов процесса обрастания и могут быть использованы для разработки экологически безопасных методов борьбы с обрастанием сооружений в морях.

Ключевые слова: акустические воздействия, адгезия, микрообрастание, биозащита, агентное моделирование.

Broadband acoustic impact on the adhesion of marine fouling organisms from Sevastopol Bay: experimental study and modeling

© 2026. A. V. Kuznetsov^{1,2} ORCID: 0000-0002-0015-7994

D. N. Vtyurina³ ORCID: 0000-0002-1192-9988

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 2, Nakhimov Ave., Sevastopol, Russia, 299011,

²Sevastopol State University, 33, Universitetskaya St., Sevastopol, Russia, 299053,

³N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, 4, Kosygina St., Moscow, Russia, 119991, e-mail: kuznet61@gmail.com

This study investigates the effects of low-power broadband acoustic waves on the adhesion of marine fouling organisms from Sevastopol Bay. Designed to evaluate the potential of acoustic methods as an environmentally friendly alternative to traditional toxic coatings for preventing biofouling on artificial structures, the experiment was conducted during the summer of 2024. The experimental setup consisted of two identical containers: one serving as a control and the other equipped with an acoustic emitter operating in the frequency range of 0–30 kHz. Glass slides were placed in both containers to monitor the adhesion of marine organisms. The results indicated a statistically significant reduction ($p < 0.01$) in *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791) fouling on the glass slides within the experimental container compared to the control.

This suggests that low-power acoustic waves can effectively suppress the biofouling initial stages, potentially disrupting the settlement and growth of marine organisms on underwater surfaces. Agent-based modeling was employed to further elucidate the ecological dynamics. This computational approach enabled the simulation of complex interactions within the fouling community, revealing intricate structural relationships and changes in the composition and development of biofouling communities. The model demonstrated various community development scenarios, providing valuable insights into the ecological consequences of interventions. Overall, the results underscore the importance of considering multiple factors in the management of marine biofouling. This study not only contributes to the theoretical understanding of fouling processes but also offers practical insights for developing sustainable and environmentally sound strategies to mitigate biofouling on marine infrastructure. Future research should focus on optimizing acoustic parameters and investigating the long-term ecological consequences of such interventions across diverse marine environments.

Keywords: acoustic effects, adhesion, microfouling, bioprotection, agent-based modeling.

Существуют основания полагать, что наиболее интересные события в области физики, химии и биологии происходят на границах раздела фаз [1]. В этом контексте процессы адгезии и обрастания представляют собой не только актуальную практическую задачу [2–4], но и значимую тему для теоретических исследований [5–8]. Сообщества обрастания в разных районах Мирового океана имеют свои особенности [9, 10]. В литературе имеется множество работ, посвящённых изучению динамики обрастания, в которых активно применяются статистические методы [11]. Также много внимания уделяется вопросам управления процессом обрастания [12] и исследованию его сложности и универсальности [13, 14]. Разнообразие поверхностей, подверженных обрастанию, является удивительным и охватывает широкий спектр материалов [15, 16]. Проблема защиты от обрастания остаётся одной из актуальных и нерешённых задач в области науки и прикладных исследований [5, 17].

Морские организмы, такие как водоросли и моллюски, представляют собой серьёзную проблему для судоходства, нефтегазовой промышленности и морских сооружений. Процесс обрастания приводит к увеличению гидродинамического сопротивления, снижению скорости судов, повышенному расходу топлива и ускоренной коррозии [18]. Традиционные методы борьбы с обрастанием, в том числе использование токсичных красок, могут оказывать негативное воздействие на морскую среду [19]. В последние годы ультразвуковые волны высокой частоты стали рассматриваться как перспективный метод предотвращения обрастания, поскольку они способны нарушать жизнедеятельность морских организмов и предотвращать их прикрепление к поверхностям [20]. Современные исследования показывают, что ультразвук может быть эффективно использован для этих целей [21, 22]. Наиболее распространёнными частотами

для этих исследований являются 20 и 40 кГц, что обусловлено их хорошей проникающей способностью в водной среде и воздействием на морские организмы. Следует отметить, что диапазон частот ультразвуковых импульсов в академических и медицинских исследованиях достаточно широк и варьируется от 20 кГц до 100 мГц [23].

Процессы адгезии и обрастания морских организмов на различных поверхностях являются актуальной проблемой, как с практической, так и с теоретической точки зрения. С одной стороны, обрастание морских конструкций приводит к экономическим потерям из-за коррозии и увеличения гидродинамического сопротивления [2, 3]. С другой стороны, изучение механизмов обрастания способствует пониманию экологических взаимодействий в морской среде [5, 6]. В данной работе мы фокусируемся на изучении воздействия звука малой мощности в диапазоне 0–30 кГц на адгезию морских организмов-обрастателей с целью выявления траектории механизмов воздействия звука на экосистемные процессы.

Объекты и методы исследования

В ходе исследования проведена оценка как экспериментальных данных, так и результатов имитационного моделирования для отражения сложной динамики обрастания и его экологических последствий. В рамках эксперимента, проводимого на базе ИнБЮМ, г. Севастополь, были использованы две ёмкости из полиэтилена объёмом по 20 л, которые непрерывно освещали лампой GLF-600-8BT-FITO с полным спектром. В период с июля по сентябрь 2024 г. в них осуществляли еженедельную замену морской воды, отобранной на набережной возле института. Одна из ёмкостей служила в качестве контрольной, в то время как в другую был помещён акустический излучатель SFM-27 размером 30 × 16 мм, использующий пьезоэлемент. Для предотвра-

щения намокания, звукоизлучатель был упакован в полиэтиленовые пакеты. Управление пьезоэлементом осуществлялось с помощью микроконтроллера на плате Arduino Nano. Частота звука варьировалась дискретно, с шагом в 1 Гц, в диапазоне от 0 до 30 кГц, с использованием циклов инкремента и декремента. На каждой частоте звук воспроизводился в течение 10 мс.

В оба резервуара с морской водой были погружены предметные стёкла на поплавках, которые периодически вынимали из воды на короткое время для анализа и возвращали обратно. Стёкла осматривали визуально методом слепой пробы и подвергали экспертной оценке. Образцы просматривали под микроскопами Микромед MC-4, Nikon SMZ800 N или Nikon Eclipse Ts2R, оценивали плотность микрообращения по пикселям на фотографиях с помощью анализатора изображений, а также подсчитывали число организмов на стёклах. Статистический анализ проводили в среде R.

Для имитационного моделирования многократно запускали написанную самостоятельно программу *fouling11.py*, в которой воплощены базовые принципы агентного моделирования (Agent Based Modeling, ABM) и объектно-ориентированного программирования (Object-Oriented Programming (OOP)). Меняя начальное количество агентов и шанс на репродукцию, исследовали пространство возможных сценариев. Использовали парк из 4 компьютеров ICL SafeRAY S131.Mi со следующими характеристиками: 64bit Intel Core i5-10400 CPU, 16 Gb RAM, Ubuntu 22.04 LTS Linux. В зависимости от общего числа шагов программы и хода вычислений, физическое время расчётов составляло от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Результаты и обсуждение

Наблюдения свидетельствуют, что микрообращение стеклянных поверхностей в морской воде – это динамичный процесс, который происходит в несколько этапов и приводит к образованию сложного сообщества морских организмов. Примерно через два месяца, когда сформировалась визуально видимая биоплёнка, поверхность начали заселять двусторчатые моллюски – митилястр полосатый *Mytilaster lineatus* Gmelin, 1791 (рис. 1а–в). Они прикрепляются к стеклу, начинают расти и передвигаться по поверхности в поисках удобного места (рис. 1а, б).

Из известных факторов, влияющих на интенсивность обрастания, как температура воды (тёплая вода способствует более быстрому росту гидробионтов), наличие питательных веществ и света для некоторых организмов, действие звука в диапазоне до 30 кГц оказалось критическим для сообщества обрастателей. Толщина биоплёнки и количество микроколоний было значительно меньше в опытных пробах. Микрообращение в течение 3 месяцев с июля по сентябрь 2024 г. в нормальных условиях (рис. 1а–в) было в несколько раз интенсивнее, чем в опыте со звуком в диапазоне 0–30 кГц и мощностью 1 Вт (рис. 1г). Плотность фона изображений по числу пикселей в оттенках серого в контроле (рис. 1а–в) примерно в 20 раз превышает эксперимент (рис. 1г), видны отдельные микроколонии.

Подсчёт количества личинок *M. lineatus* на предметных стёклах привёл к следующим результатам: в контроле среднее число организмов на стёклышке составило $6,25 \pm 2,67$ с доверительным интервалом 4,47–8,03, а для экспериментальной группы, обрабатываемой звуком, – $0,50 \pm 0,67$ с доверительным интервалом 0,11–0,89. Медианное представление данных с квантилями в виде «ящичков с усами» изображено на рисунке 2. В контроле и опыте было исследовано по 6 стёкол с двумя сторонами: контроль – без звука, опыт – с воздействием звука, где значение $p = 2,44e^{-6} < 0,01$, следовательно, гипотеза о равенстве средних отвергается. На основании статистической оценки расхождения результатов можно сделать вывод, что звук в диапазоне 0–30 кГц с вероятностью более 99 % оказывает значимое влияние на организмы, заселяющие поверхность стеклянных пластин.

С целью дополнить экспериментальные данные и показать сложность нелинейных процессов обрастания, было проведено имитационное моделирование. Компьютерная симуляция для двумерного пространства с тремя типами агентов, где агенты первого уровня питаются неисчерпаемым субстратом, а другие образуют пищевую цепь, выявило сценарий, где виртуальные организмы первого уровня неограниченно размножаются, являясь пищей для остатка цепи, что создаёт условия для заполнения поверхности субстрата организмами всех уровней (рис. 3, см. цв. вкладку I). Код описывает процесс обрастания для двумерного случая, где агенты-обрастатели взаимодействуют друг с другом, движутся в пространстве (2D) или по поверхности (1D) и размножаются; начальное число

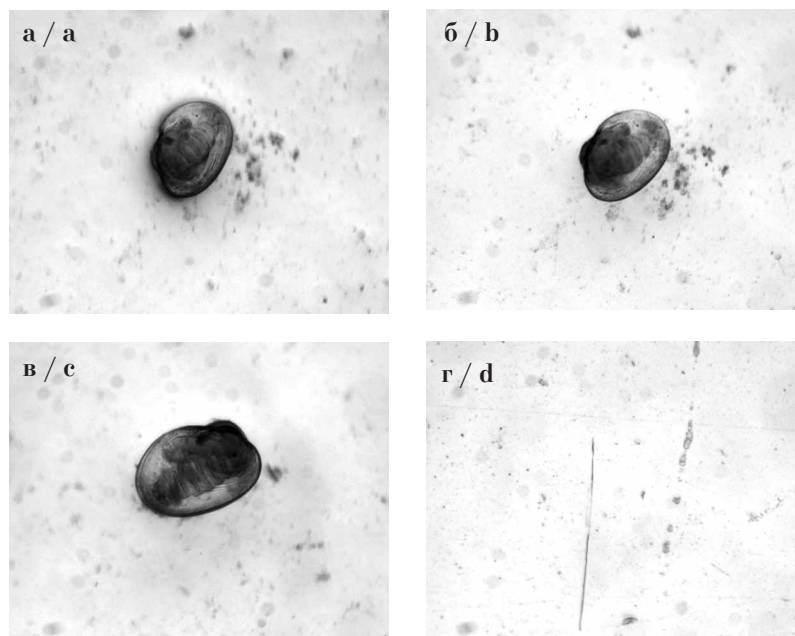


Рис. 1. Двустворчатые *Mytilaster lineatus*, осевшие и развившиеся на предметных стёклах:
 а-в – контроль, без звука; г – эксперимент, со звуком; увеличение $\times 80$
 Fig. 1. *Mytilaster lineatus* bivalves settled and developed on glass slides:
 а-с – control, without sound; d – experiment, with sound; magnification $\times 80$

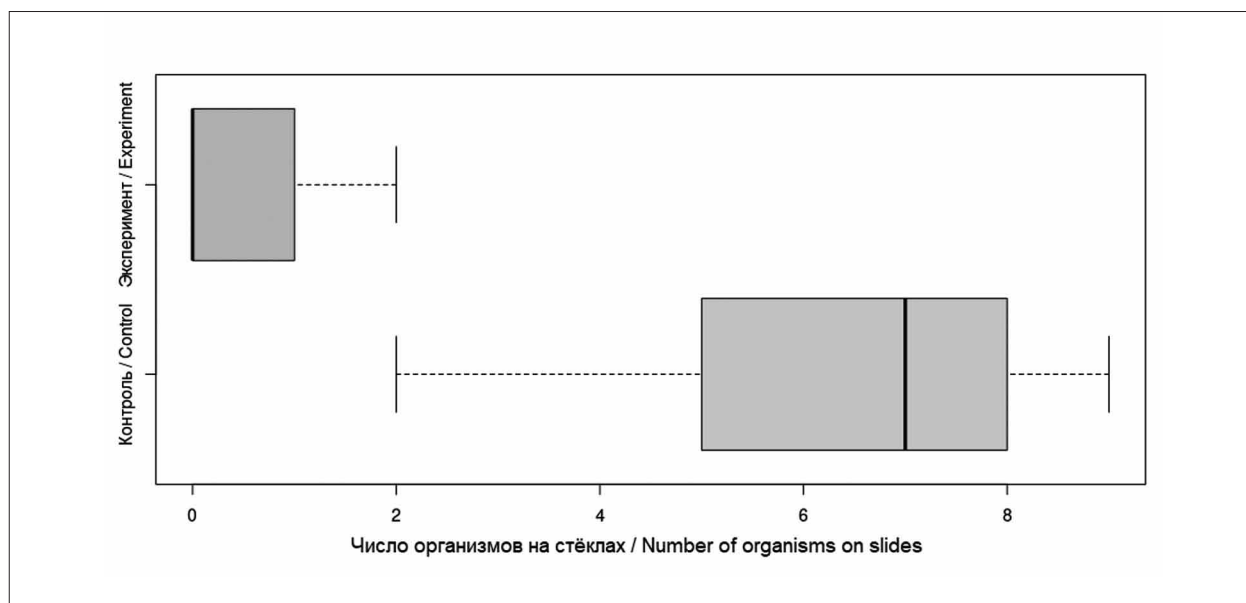


Рис. 2. Количество молоди моллюсков *Mytilaster lineatus* на поверхности предметных стёкол
 Fig. 2. Number of young *Mytilaster lineatus* on the surface of microscope slides

А. В. Кузнецов, Д. Н. Втюрина
«Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование». С. 48

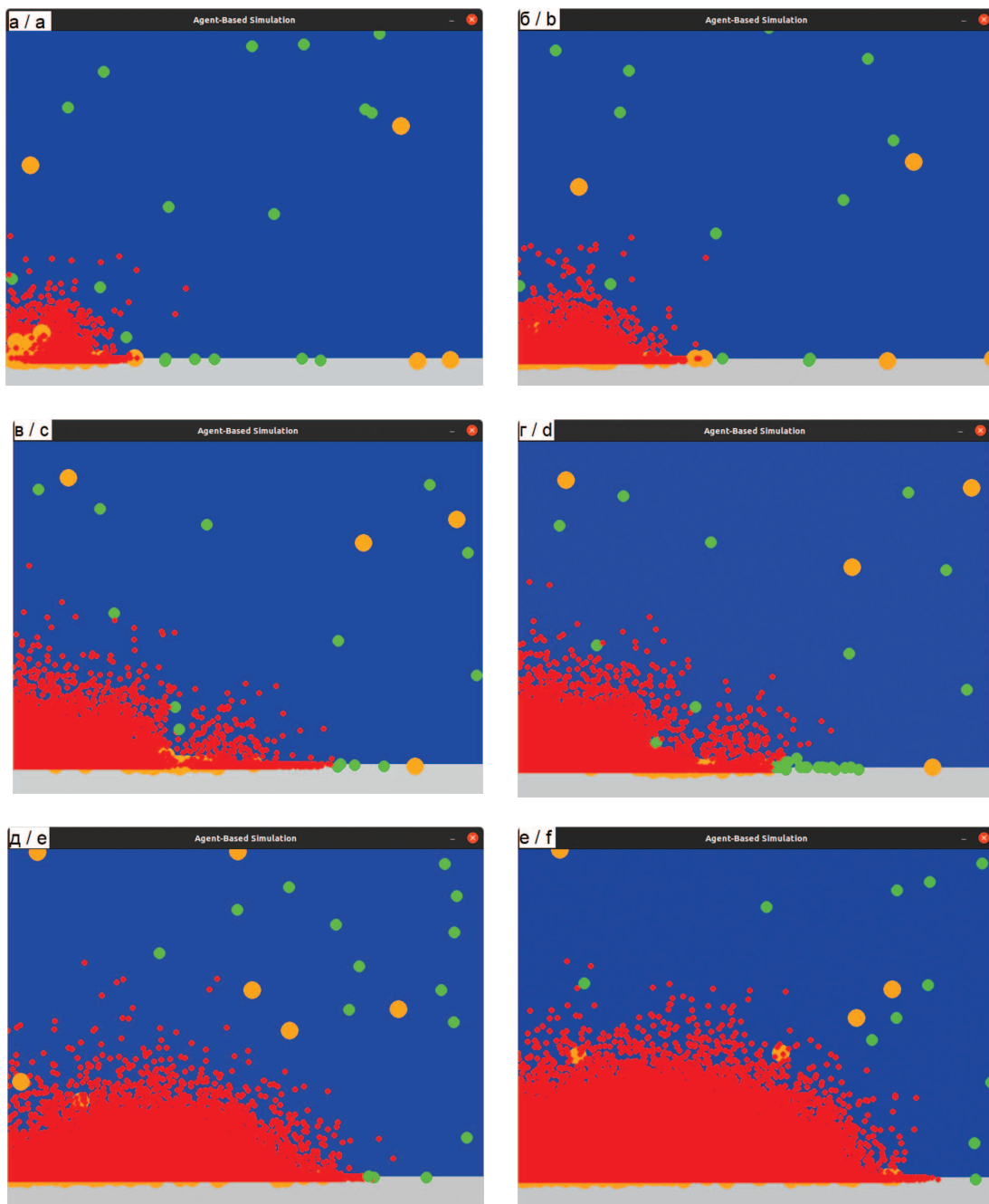


Рис. 3. Последовательные этапы (а–е) обрастания поверхности гидробионтами в модельном эксперименте. Здесь и далее на рисунках: красным цветом показаны обрастатели первого уровня, питающиеся субстратом (серый), зелёным – обрастатели второго уровня, питающиеся обрастателями первого уровня, оранжевым – обрастатели третьего уровня, которые поедают обрастателей второго уровня

Fig. 3. Sequential stages (a–f) of surface fouling by hydrobionts in a simulation experiment. Here and further in the pictures: red – the first-level foulers feeding on the substrate (gray), green – the second-level foulers feeding the first-level foulers, orange – the third-level foulers that eat the second-level foulers

А. В. Кузнецов, Д. Н. Втюрина
«Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование». С. 48

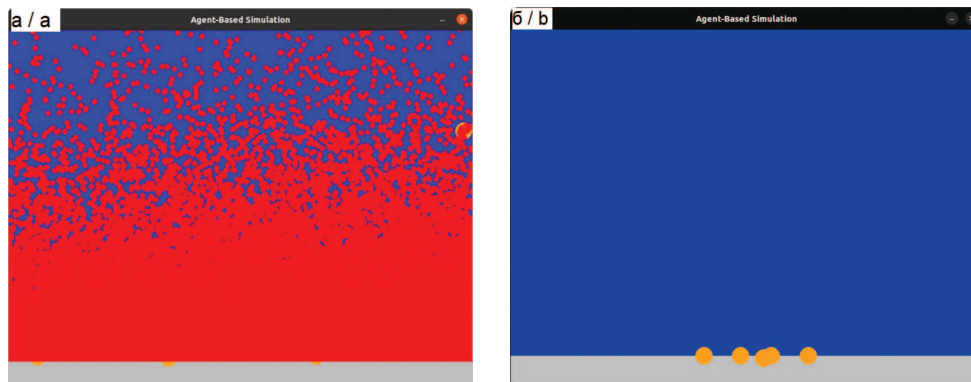


Рис. 4. Альтернативные устойчивые состояния системы с угнетённой репродукцией виртуальных организмов при длительной симуляции: а) неограниченный рост обрастателей первого уровня, б) выжившие обрастатели третьего уровня / **Fig. 4.** Alternative stable states of a system with suppressed reproduction of virtual organisms during long-term simulation: a) unlimited growth of the first-level foulers, b) the third-level foulers that survived

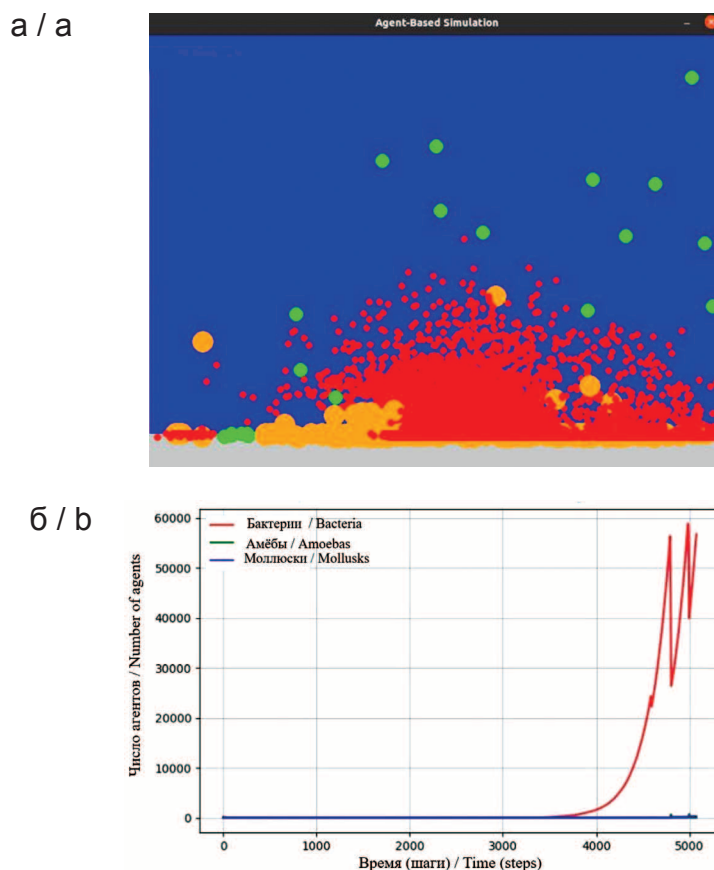


Рис. 5. Сукцессия виртуального сообщества обрастания: а) замена обрастателей первого («бактерии») и второго («амёбы») уровня на обрастателей третьего уровня («моллюски»); б) изменение количества обрастателей во времени **Fig. 5.** Succession of a virtual fouling community: a) replacement of the first-level (“bacteria”) and the second level (“amoebas”) foulers by the third-level foulers (“mollusks”); b) changes in the number of foulers over time

А. В. Кузнецов, Д. Н. Втюрина
«Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование». С. 48

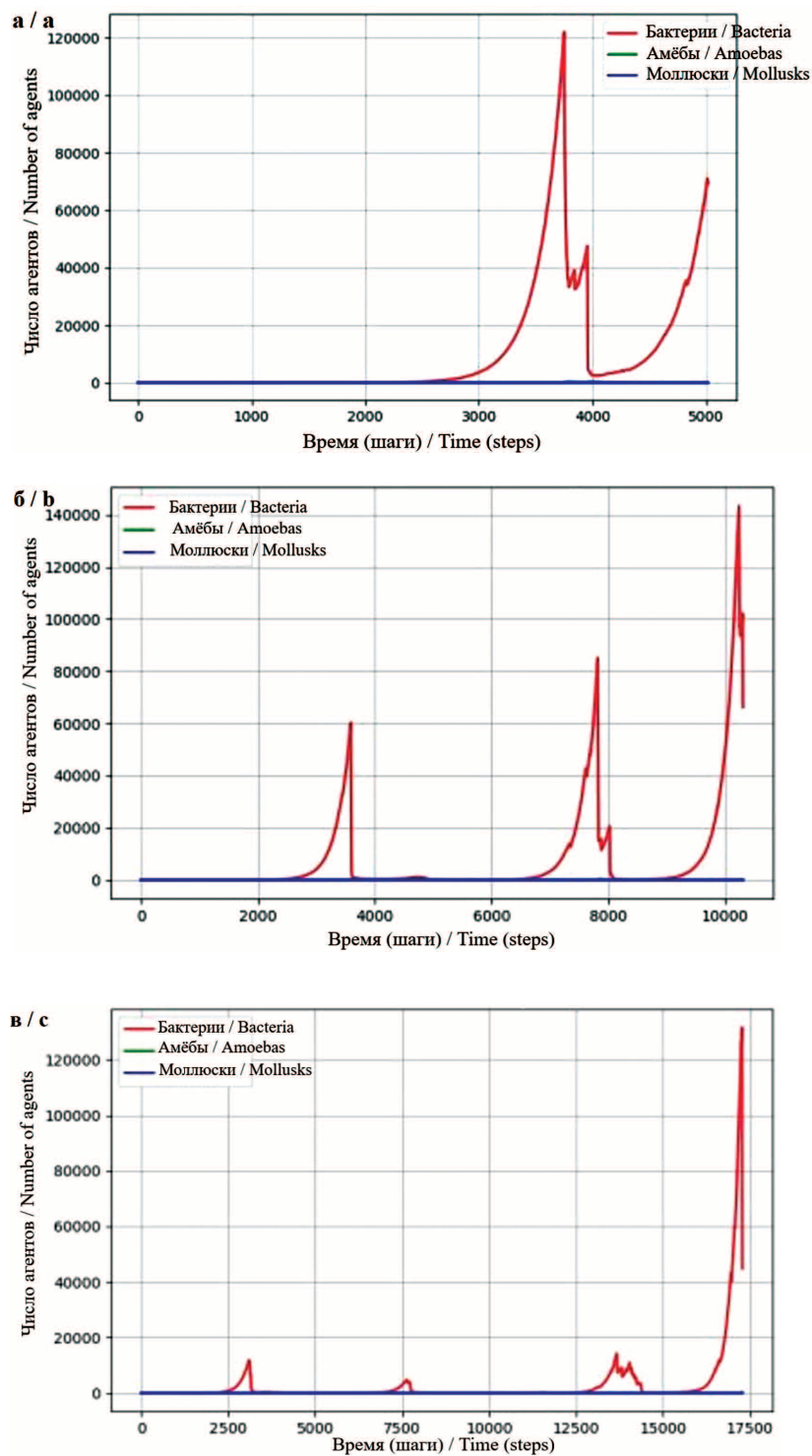


Рис. 6. Примеры последовательных множественных сукцессий при обрастании: а) краткосрочная, б) промежуточная и в) длительная симуляции / **Fig. 6.** Examples of consecutive multiple successions during fouling: а) short-term, б) intermediate, в) long-term simulations

организмов разных типов составляет 200, 50 и 5, соответственно; шанс на репродукцию всех организмов – 1 %; время симуляции 600 или 6000 программных циклов. Данный сценарий (рис. 3, см. цв. вкладку I) развивается в половине случаев. Изменение начального числа организмов в симуляции приводит к конечному состоянию с преобладанием агентов первого и/или третьего уровней в виртуальной пищевой цепи. Следует отметить сложность отношений между агентами-обрастателями на поверхности в локальных областях, приводящих к замене одних организмов другими, что подобно экологической сукцессии. Агенты могут оседать на поверхность и покидать колонию при размножении. Программа имитирует динамику развития популяции в течение заданного времени. Агенты первого уровня демонстрируют экспоненциальный рост, который могут прерывать агенты второго уровня (рис. 3а–г). Ситуация критическим образом зависит от взаимного положения агентов на одномерной поверхности, так как агенты 3-го уровня могут «защищать» агентов 1-го уровня от агентов 2-го уровня.

На следующем этапе моделирования вероятность размножения всех агентов уменьшали в 10 или 100 раз по сравнению с нормой (контролем), что соответствует внешнему экспериментальному воздействию. Такое изменение программы замедляет процесс обрастания и порождает альтернативные сценарии развития событий: а) неограниченный медленный рост агентов первого типа (рис. 4а, см. цв. вкладку II); б) **терминальное выживание агентов** третьего типа (рис. 4б, см. цв. вкладку II), что не предполагает полноценного обрастания в биологическом смысле. Вместо комплексного обрастания поверхности сообществом организмов мы получаем образование однородного бактериального мата или заселение малочисленными агентами последнего уровня (рис. 4), где начальное число организмов разных типов 200, 50 и 5, шанс на репродукцию для всех организмов 0,1 или 0,01 %, а время симуляции 6000 программных циклов.

К наиболее драматичным событиям при имитационном моделировании обрастания поверхности приводило непропорциональное изменение шансов на репродукцию у отдельных типов агентов, что на практике соответствует избирательному экспериментальному воздействию на отдельные виды организмов. В таком случае происходит нарушение баланса в системе (рис. 5, см. цв. вкладку II), где начальное число агентов разных типов

200, 50 и 5, а шанс на репродукцию 0,05, 0,5 и 1 %, соответственно, и появляются случаи частой замены одних агентов другими (рис. 6, см. цв. вкладку III), где использованы обозначения как на рисунке 5. Понижение вероятности размножения виртуальных «амёб» и «моллюсков» на два порядка приводило к развитию «бактериального мата» в 66 % случаев. Напротив, исключение отдельных типов организмов или парами из симуляции вело к однообразным результатам.

Защита от обрастателей с помощью ультразвука – это технология, которая использует высокочастотные звуковые волны для предотвращения или минимизации биологического обрастания подводных конструкций и поверхностей. Существует два основных способа защиты от обрастания с помощью ультразвука: 1) **кавитация**, при которой ультразвук высокой интенсивности вызывает кипение воды, что приводит к физическому уничтожению живых организмов и биоплёнки, которая их поддерживает; 2) **субкавитация**, при которой звук вызывает вибрацию поверхностей, к которым прикреплён преобразователь, что препятствует адгезии биообрастающих частиц на субстрате. Важно отметить, что ультразвуковые системы защиты от обрастания обычно только поддерживают чистоту поверхности; они не способны очистить субстрат, на котором уже сформировались очаги биообрастания. В связи с этим ультразвук является скорее мерой профилактики. Предназначение любой системы защиты от обрастания – сохранять чистоту поверхности. Повышение мощности ультразвукового устройства обычно снижает плотность поселения и разнообразие видов [21]. Альтернативный подход основан на предположении, что специфические звуковые воздействия низкой интенсивности могут восприниматься механорецепторами как сигнал к откреплению клетки от субстрата [24]. Однако природа таких сигналов и их рецепторов, а также пути трансдукции до конца не изучены [25, 26], поэтому мы использовали программный меандр.

Наблюдения за процессом обрастания пластиковых поверхностей в морской воде зимой и стеклянных поверхностей в летний период свидетельствуют о том, что данный процесс представляет собой динамическое явление, которое протекает в несколько этапов и приводит к образованию сложного сообщества морских организмов. Сначала на поверхность оседают бактерии и микроводоросли [27]. Эти микроскопические организмы об-

разуют тонкую, опалесцирующую биоплёнку, которая служит основой для дальнейшего обрастания (рис. 1а–в). Образовавшаяся биоплёнка становится местом обитания для многих морских организмов, включая разнообразных инфузорий и червей, которые добавляют соответствующие звенья в сложную экосистему. Последующий этап включает оседание более крупных организмов, таких как личинки моллюсков, которые прикрепляются к стеклу и начинают расти. Такие митилиды, как митиластр полосатый (*Mytilaster lineatus*), активно передвигаются по поверхности в поисках оптимального положения (рис. 1а, б). Оседание личинок митиластра в наших опытах совпало с периодом его активного размножения в конце лета [28].

В данном исследовании было установлено, что действие звука частотой до 30 кГц существенно влияет на процесс обрастания. Интенсивность микрообрастания, выраженная в количестве тёмных пикселей на цифровых изображениях, была в 20 раз ниже в экспериментальной группе (рис. 1г), по сравнению с контрольной группой (рис. 1а–в). Тот факт, что стекло не пропускает ультрафиолетовое (УФ) излучение с длиной волны менее 380 нм, не помешало нам использовать одну из характерных оптических активностей полисахаридов на длине 320 нм для выявления достоверного отличия между биоплёнками в контроле и под экспериментальным воздействием (данные не представлены). Подсчёт осевших особей и статистический анализ показали, что звук в диапазоне 0–30 кГц с вероятностью более 99 % оказывает влияние на количество организмов, присутствующих на стеклянных поверхностях (рис. 2).

Следует отметить богатство черноморских перифитонных организмов-обрастателей, принадлежащих к семействам Hydrozoa, Ascidiacea, Bryozoa, Polychaeta, Bivalvia и Cirripedia [48]. Так, в бухте Казачья было отмечено 22 вида макрообрастателей, относящихся к 8 крупным таксонам: гидроидные полипы, усонogie раки, актинии, мшанки, полихеты, двустворчатые моллюски, оболочники и макрофиты [29]. В ходе длительного исследования мы наблюдали появление в эксперименте со звуком организмов, которых не наблюдали в контроле, т. е. без звукового воздействия. Например, на озвучиваемых пластинах были обнаружены планарии, а результат соскоба и ПЦР-анализа в реальном времени дал на 35–50 циклах интенсивный сигнал о наличии ДНК дрожжеподобных гри-

бов *Malassezia* spp. в пробе (данные не приводятся), которые могут встречаться в морской среде [30, 31]. Всё это указывает на сложность и неоднозначность процессов обрастания, что акцентировалось ранее [32].

Представленная модель обрастания, включающая три типа агентов, которые образуют пищевую цепь, демонстрирует ряд интересных аналогий с агрегацией, ограниченной диффузией (Diffusion Limited Aggregation, DLA). Подобно DLA [33], в модели обрастания наблюдается формирование кластеров из агентов в результате их размножения и пространственного взаимодействия. При неограниченном питании агенты первого уровня образуют крупные агрегаты, заполняя всю доступную поверхность. Как и в DLA, где ключевую роль в формировании структур играет диффузия частиц, в модели обрастания скорость случайного перемещения агентов также должна влиять на их распределение и взаимодействие. В обоих процессах различные типы агентов конкурируют за пространство. В модели обрастания это выражается в замене одних агентов другими, что напоминает экологическую сукцессию [34]. Наша модель реалистично воспроизводит поэтапное развитие биоплёнки, включая фазы адгезии, образования монослоя, созревания, роста и дисперсии – выброс бактерий (рис. 3), хорошо известные микробиологам [35, 36].

Однако в отличие от DLA, модель обрастания рассматривает более сложную систему с тремя типами агентов, образующих пищевую цепь. Это позволяет моделировать тонкие биологические взаимодействия и динамику популяции организмов-обрастателей. Внешние факторы, например, влияющие на репродукцию, существенно изменяют динамику агентов при симуляции. Предложенная модель демонстрирует разные сценарии развития событий, что делает её гибкой и позволяет иллюстрировать действие внешних факторов на процесс обрастания. Уменьшение вероятности размножения агентов на порядок приводит в десятой доле случаев к формированию бактериального мата в эксперименте *in silico* (рис. 4а), что согласуется с образованием слизистой плёнки на поверхности стекла в лабораторном эксперименте (рис. 1г).

Кроме того, имитационная модель обрастания позволяет исследовать множество дополнительных вопросов (рис. 5, 6). Как на динамику модели влияют различные значения параметров: способ передвижения, скорость размножения и смертность? Как можно обоб-

щитить предлагаемый подход для моделирования более сложных экосистем с большим количеством видов? Каким образом можно использовать модель для прогнозирования развития реальных событий, таких как обрастание кораблей или морских сооружений?

Заключение

Наблюдения за процессом обрастания пластиковых и стеклянных поверхностей в морской воде показали, что это динамическое явление, которое протекает в несколько этапов и приводит к образованию сложного сообщества морских организмов. Использование ультразвукового воздействия для предотвращения обрастания представляет собой инновационную технологию, которая может быть полезна для понимания механизмов взаимодействия организмов с окружающей средой. В данной работе установлено, что действие звука частотой до 30 кГц существенно влияет на процесс обрастания, снижая количество осевших организмов. Это указывает на потенциальную возможность использования акустического воздействия как альтернативного метода для предотвращения обрастания. Имитационное моделирование с использованием агентно-ориентированного подхода позволило выявить сложные структурные отношения внутри популяции обрастателей и продемонстрировать различные сценарии развития событий при изменении внешних факторов. Наша модель имеет ряд аналогий с известными экосистемными процессами, включая сукцессию и агрегацию [34] и, несмотря на свою простоту, демонстрирует механизмы образования кластеров. Она рассматривает комплекс агентов, взаимодействующих в пищевой цепи. Натурные эксперименты и моделирование показали, что применение акустического воздействия может приводить к образованию бактериального мата со слизистой полисахаридной поверхностью, которая не только не увеличивает, но и, возможно, даже уменьшит гидродинамическое сопротивление. Данное исследование подчёркивает необходимость дальнейшего изучения методов акустической биозащиты в контексте сохранения морского биоразнообразия и устойчивости экосистем.

Благодарим Пасенина С.Н и Рябушко В.И. за поддержку, Ревкова Н.К. за консультацию по личинкам митилеистра, Холодова А.В. за помощь при проведении ПЦР, Царина С.А., Шадрина Н.В. и Петрова А.Н. за критическое

прочтение рукописи, Празукина А.В. за обсуждение, Пепина И.С., Савицкого М.А и Шуралёва Л.А. за помощь в работе. Работа выполнена в соответствии с темами № 124022400152-1 и № 124022400148-4), «1.13 Фемтосекундная лазерная фотоника, масс-спектрометрия и спинтроника сложных химических и биологических систем», № 122040500074-1, Код научной темы: FFZE-2022-015.

Литература

1. Айзатуллин Т.А., Лебедев В.Л., Хайлов К.М. Океан. Активные поверхности и жизнь. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 191 с.
2. Никитин В.Н. Биология обрастания судов в Чёрном море // Докл. АН СССР. 1947. Т. 58. № 6. С. 1183–1185.
3. Chambers L.D., Stokes K.R., Walsh F.C., Wood R.J.K. Modern approaches to marine antifouling coatings // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 201. No. 6. P. 3642–3652. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.129
4. Ryabushko L.I., Bondarenko A.V., Miroshnichenko E.S., Lishaev D.N., Shiroyan A.G. Diatoms and cyanobacteria of periphyton of experimental synthetic polymer materials in Karantinnaya Bay in the Black Sea // Inland Water Biol. 2020. V. 13. No. 3. P. 399–407. doi: 10.1134/S1995082920020285
5. Fouling Science and Technology / Eds. L.F. Melo, T.R. Bott, C.A. Bernardo. Dordrecht: Springer, 1988. 744 p. doi: 10.1007/978-94-009-2813-8
6. Бобкова А.Н. Сезонные изменения структуры и биохимического состава микроперифитона // Гидробиол. журн. 1990. Т. 26. № 2. С. 33–37.
7. Гринцов В.А., Мурина В.В., Евстигнеева И.К. Биоразнообразие и структура сообщества обрастания твёрдых субстратов Карадагского природного заповедника (Чёрное море) // Мор. экол. журн. 2005. Т. 4. № 3. С. 37–47.
8. Раилкин А.И. Колонизация твердых тел бентосными организмами. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2008. 427 с.
9. Зевина Г.Б. Обрастания в морях СССР. М.: Изд-во МГУ, 1972. 219 с.
10. Брайко В.Д. Обрастание в Чёрном море. Киев: Наукова думка, 1985. 123 с.
11. Горбенко Ю.А., Крышев И.И. Статистический анализ динамики морской экосистемы микроорганизмов. Киев: Наукова думка, 1985. 144 с.
12. Савельев И.Б., Вольберг М.М., Гусев М.В. Методы исследования и пути управления взаимодействием партнёров в альгобактериальных ассоциациях // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 16, Биология. 1990. № 1. С. 3–4.
13. Зевина Г.Б. Биология морского обрастания. М.: Изд-во МГУ, 1994. 134 с.
14. Раилкин А.И., Твердов А.И., Отвалко Ж.А., Коротков С.И., Фомин С.Е. Оценка противобрастающих

свойств материалов по показателям обилия многовидовых сообществ обрастания // Вода: Химия и экология. 2015. № 7. С. 52–56.

15. Бондаренко А.В., Рябушко Л.И., Благинина А.А. Подвержены ли биообрастанию синтетические медицинские маски в морской воде? // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 114–128.

16. Рябушко Л.И., Мирошниченко Е.С., Широ-ян А.Г. Биологическое обрастание бассейна Карадагского дельфинария (Крым, Чёрное море) // Экосистемы. 2024. № 37. С. 7–16. doi: 10.29039/2413-1733-2024-37-7-16

17. Раилкин А.И., Отвалко Ж.А., Коротков С.И., Фомин С.Е., Кулева Н.В. Концепция экологически безопасной защиты от морского обрастания и её разработка с использованием каучук-эпоксидных покрытий // Морской биол. журн. 2017. Т. 2. № 3. С. 40–52. doi: 10.21072/mbj.2017.02.3.04

18. Смирнова Л.Л. Методология изучения обрастания в прибрежных акваториях Чёрного моря и экспедиционных исследованиях в Индийском и Атлантическом океанах. Севастополь: ИПТС, 2021. 155 с. doi: 10.33075/978-5-6047088-1-1

19. Gomez-Banderas J. Marine natural products: a promising source of environmentally friendly antifouling agents for the maritime industries // Front. Mar. Sci. 2022. V. 9. Article No. 858757. doi: 10.3389/fmars.2022.858757

20. 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.

21. Неврова Е.Л., Петров А.Н., Мороз Н.А., Касьянов А.Б. Экспериментальное изучение воздействия ультразвука на микроперифитон искусственных субстратов с целью защиты от биопомех систем технического водоснабжения атомных электростанций // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 98–113.

22. Зацаринная Т.Г., Мороз Н.А., Анисевич К.П., Неврова Е.Л., Петров А.Н. Ультразвук в технологиях борьбы с биообрастаниями в системах оборотного водоснабжения на АЭС // Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 42–54.

23. Passmann C., Ermert H. A 100-MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1996. V. 43. No. 4. P. 545–552. doi: 10.1109/58.503714

24. Кузнецов А.В., Гришин И.Ю., Втюрина Д.Н. Пространственные модели пьезобелков и сетей белок-белковых взаимодействий у трихоплакса (пластинчатые) // Молекулярная биология. 2023. Т. 57. № 5. С. 895–897. doi: 10.31857/S0026898423050075

25. Фадеева М.В., Сергеева Е.В., Рыбакова К.А., Кузнецов А.В. Характеристика семейства катионных TRPA1-каналов *Trichoplax* sp. H2 (Placozoa) // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2022. Т. 7. № 3. С. 493–500. doi: 10.29039/rusjbpce.2022.0550

26. Kuznetsov A.V., Vtyurina D.N. Spatial reconstruction of TRPC mechanoreceptors in the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 // Mol. Biol. 2023. V. 57. No. 4. P. 755–763. doi: 10.1134/S0026893323040106

27. Dempsey M.J. Marine bacterial fouling: a scanning electron microscope study // Mar. Biol. 1981. V. 61. P. 305–315. doi: 10.1007/BF00401570

28. Валовая Н.А. О формировании поселений *Mytilaster lineatus* в прибрежной зоне Чёрного моря // Донные сообщества и морские обрастания / Отв. ред. В.Е. Заика. Киев: Наукова думка, 1979. Вып. 48. С. 48–53.

29. Лебедевская М.В. Мшанки в сообществе обрастания искусственных субстратов в бухте Казачья Чёрного моря // Вестник РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 3. С. 313–322. doi: 10.22363/2313-2310-2023-31-3-313-322

30. Gao Z., Li B., Zheng C., Wang G. Molecular detection of fungal communities in the Hawaiian marine sponges *Suberites zeteki* and *Mycale armata* // Appl. Environ. Microbiol. 2008. V. 74. No. 19. P. 6091–6101. doi: 10.1128/AEM.01315-08

31. Amend A. From dandruff to deep-sea vents: *Malassezia*-like fungi are ecologically hyper-diverse // PLoS Pathog. 2014. V. 10. No. 8. Article No. e1004277. doi: 10.1371/journal.ppat.1004277

32. Кузнецов А.В., Петров А.Н., Пиркова А.В., Сергеева Е.В. Структура механорецепции и способность к адгезии у молоди мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) при воздействии ультразвука // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 4 (54). С. 41–51. doi: 10.33075/2220-5861-2023-4-41-51

33. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. No. 19. P. 1400–1403. doi: 10.1103/PhysRevLett.47.1400

34. Полтаруха О.П. Об изучении сукцессии сообщества обрастания на противоположающихся покрытиях // Экология моря. 2000. Т. 52. С. 39–43.

35. Немцева Н.В. Изучение образования биоплёнок в питьевой воде в процессе водоподготовки // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2017. Т. 2. 10 с. [Электронный ресурс] <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2017-2/Articles/NVN-2017-2.pdf> (Дата обращения: 25.04.2025).

36. Симонова И.Р., Головин С.Н., Веркина Л.М., Березняк Е.А., Титова С.В. Методы культивирования и изучения бактериальных биоплёнок // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2017. № 1. С. 73–79. doi: 10.51620/3034-1981-2024-29-4-194-19

References

1. Aizatullin T.A., Lebedev V.L., Khailov K.M. Ocean. Active surfaces and life. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 191 p. (in Russian).

2. Nikitin V.N. Biology of vessel fouling in the Black Sea // *Doklady AN SSSR*. 1947. V. 58. No. 6. P. 1183–1185 (in Russian).
3. Chambers L.D., Stokes K.R., Walsh F.C., Wood R.J.K. Modern approaches to marine antifouling coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2006. V. 201. No. 6. P. 3642–3652. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.129
4. Ryabushko L.I., Bondarenko A.V., Miroshnichenko E.S., Lishaev D.N., Shiroyan A.G. Diatoms and cyanobacteria of periphyton of experimental synthetic polymer materials in Karantinnaya Bay in the Black Sea // *Inland Water Biol.* 2020. V. 13. No. 3. P. 399–407. doi: 10.1134/S1995082920020285
5. *Fouling Science and Technology* / Eds. L.F. Melo, T.R. Bott, C.A. Bernardo. Dordrecht: Springer, 1988. 744 p. doi: 10.1007/978-94-009-2813-8
6. Bobkova A.N. Seasonal changes in the structure and biochemical composition of microperiphyton // *Hydrobiol. J.* 1990. V. 26. No. 2. P. 33–37 (in Russian).
7. Grintsov V.A., Murina V.V., Evstigneyeva I.K. Biodiversity and structure of fouling community on the hard substrata of Karadag natural reservation (the Black Sea) // *Mar. Ecol. J.* 2005. V. 4. No. 3. P. 37–47 (in Russian).
8. Raïlkin A.I. Colonization of solid bodies by benthic organisms. Sankt-Peterburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2008. 427 p. (in Russian).
9. Zevina G.B. Fouling in the seas of the USSR. Moskva: Publishing House of Moscow State University, 1972. 219 p. (in Russian).
10. Brayko V.D. Fouling in the Black Sea. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 123 p. (in Russian).
11. Gorbenko Yu.A., Krychev I.I. Statistical analysis of the dynamics of the marine ecosystem of microorganisms. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 144 p. (in Russian).
12. Saveliev I.B., Volberg M.M., Gusev M.V. Methods of studying and managing partner interactions in algal-bacterial associations // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16. Biologiya*. 1990. No. 1. P. 3–4 (in Russian).
13. Zevina G.B. Biology of marine fouling. Moskva: Publishing House of Moscow State University, 1994. 134 p. (in Russian).
14. Raïlkin A.I., Tverdov A.I., Otvalko Z.A., Korotkov S.I., Fomin S.E. The assessment of antifouling properties of materials upon indicators of abundance of many species fouling communities // *Water: Chemistry and Ecology*. 2015. No. 7. P. 52–56 (in Russian).
15. Bondarenko A.V., Ryabushko L.I., Blagynina A.A. Are polymer-based single-use face masks subject biofouling in seawater? // *Ecological safety of coastal and shelf zones of the sea*. 2023. No. 3. P. 114–128 (in Russian).
16. Ryabushko L.I., Miroshnichenko E.S., Shiroyan A.G. Biological fouling in the Karadag Dolphinarium (Crimea, Black Sea) // *Ekosistemy*. 2024. No. 37. P. 7–16 (in Russian). doi: 10.29039/2443-1733-2024-37-7-16.
17. Raïlkin A.I., Otvalko Zh.A., Korotkov S.I., Fomin S.E., Kuleva N.V. Concept of environmentally friendly protection against sea fouling and its development using epoxy-rubber coats // *Mar. Biol. J.* 2017. V. 2. No. 3. P. 40–52 (in Russian). doi: 10.21072/mbj.2017.02.3.04
18. Smirnova L.L. Methodology of studying fouling in coastal waters of the Black Sea and expedition research in the Indian and Atlantic Oceans. Sevastopol: IPTS, 2021. 155 p. (in Russian). doi: 10.33075/978-5-6047088-1-1
19. Gomez-Banderas J. Marine natural products: a promising source of environmentally friendly antifouling agents for the maritime industries // *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9. Article No. 858757. doi: 10.3389/fmars.2022.858757
20. Dolgopolskaya M.A., Axelband A.M. The effect of ultrasonic vibrations on marine fouling organisms and the fouling process // *Trudy Sevastopolskoy biologicheskoy stantsii*. 1964. V. 17. P. 309–324 (in Russian).
21. Nevrova E.L., Petrov A.N., Moroz N.A., Kasyanov A.B. Experimental study of the effect of ultrasound effect on microperiphyton on artificial substrates for fouling protection of technical water supply circuit of nuclear power plants // *Ecological safety of coastal and shelf zones of the sea*. 2023. No. 3. P. 98–113 (in Russian).
22. Zatsarinnyaya T.G., Moroz N.A., Anikevich K.P., Nevrova E.L., Petrov A.N. Ultrasound in biofouling control technologies in circulating water supply systems at nuclear power plants // *Energy Installations and Technologies*. 2024. V. 10. No. 1. P. 42–54 (in Russian).
23. Passmann C., Ermert H. A 100-MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. 1996. V. 43. No. 4. P. 545–552. doi: 10.1109/58.503714
24. Kuznetsov A.V., Grishin I.Yu., Vtyurina D.N. Spatial models of piezoproteins and networks of protein-protein interactions in *Trichoplax* animals (Placozoa) // *Molecular Biology*. 2023. V. 57. No. 5. P. 895–897 (in Russian). doi: 10.31857/S0026898423050075
25. Fadeeva M.V., Sergeeva E.V., Rybakova K.A., Kuznetsov A.V. Characteristics of the cationic TRPA1-channels family in *Trichoplax* sp. H2 (Placozoa) // *Russian Journal of Biological Physics and Chemistry*. 2022. V. 7. No. 3. P. 493–500 (in Russian). doi: 10.29039/rusjbpce.2022.0550
26. Kuznetsov A.V., Vtyurina D.N. Spatial reconstruction of TRPC mechanoreceptors in the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 // *Mol. Biol.* 2023. V. 57. No. 4. P. 755–763. doi: 10.1134/S0026893323040106
27. Dempsey M.J. Marine bacterial fouling: a scanning electron microscope study // *Mar. Biol.* 1981. V. 61. P. 305–315. doi: 10.1007/BF00401570
28. Valovaya N.A. On the formation of *Mytilaster lineatus* colonies in the coastal zone of the Black Sea // *Benthic communities and marine fouling* / Ed. V.E. Zaika. Kiev: Naukova Dumka, 1979. No. 48. P. 48–53 (in Russian).
29. Lebedovskaya M.V. Bryozoans in fouling communities on artificial substrates in Kazachya Bay of the Black

Sea // RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2023. V. 31. No. 3. P. 313–322 (in Russian). doi: 10.22363/2313-2310-2023-31-3-313-322

30. Gao Z., Li B., Zheng C., Wang G. Molecular detection of fungal communities in the Hawaiian marine sponges *Suberites zeteki* and *Mycale armata* // Appl. Environ. Microbiol. 2008. V. 74. No. 19. P. 6091–6101. doi: 10.1128/AEM.01315-08

31. Amend A. From dandruff to deep-sea vents: *Malassezia*-like fungi are ecologically hyper-diverse // PLoS Pathog. 2014. V. 10. No. 8. Article No. e1004277. doi: 10.1371/journal.ppat.1004277

32. Kuznetsov A.V., Petrov A.N., Pirkova A.V., Sergeeva E.V. Structure of mechanoreception and adhesion capability in juvenile mussels *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) under ultrasound impact // Monitoring systems of environment. 2023. No. 4 (54). P. 41–51 (in Russian). doi: 10.33075/2220-5861-2023-4-41-51

33. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. No. 19. P. 1400–1403. doi: 10.1103/PhysRevLett.47.1400

34. Poltarukha O.P. On the study of the succession of the fouling community on antifouling coatings // Ecologiya Morya. 2000. No. 52. P. 39–43 (in Russian).

35. Nemtseva N.V. Study of the formation of biofilms in drinking water in the process of technological preparation // Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of RAS. 2017. V. 2. 10 p. [Internet resource] <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2017-2/Articles/NVN-2017-2.pdf> (Accessed: 25.04.25) (in Russian).

36. Simonova I.R., Golovin S.N., Verkina L.M., Berzaniak E.A., Titova S.V. Methods of culturing and studying bacterial biofilms // Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. 2017. No. 1. P. 73–79 (in Russian). doi: 10.51620/3034-1981-2024-29-4-194-198